



Integrierte Verwertungsanlage und Strategie für kommunale Biomasse – HTC Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft

**FKZ 03KB049A und FKZ 03KB049B
Schlussbericht nach Nr. 8.2 NKBF 98**

**Blümel, Regina
Clemens, Andreas
Döhling, Frank
Kietzmann, Falko
Klemm, Marco
Meisel, Kathleen
Zeymer, Martin**

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Tel.: +49 341 2434 - 112
Fax: +49 341 2434 - 133
www.dbfz.de
info@dbfz.de

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zuwendungsgeber Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über
Forschungszentrum Jülich GmbH
Postfach 610247
10923 Berlin

Ansprechpartner: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige
GmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 2434-112
Fax: +49 (0)341 2434-133
E-Mail: info@dbfz.de
Internet: www.dbfz.de

Dr.-Ing. Marco Klemm

Tel.: +49 (0)341 2434-537
E-Mail: marco.klemm@dbfz.de

Dipl.-Ing. Andreas Clemens

Tel.: +49 (0)341 2434-479
E-Mail: andreas.clemens@dbfz.de

Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft GmbH
Bornknechtstraße 5
06108 Halle
Internet: www.hws-halle.de

Dipl.-Ing. Falko Kietzmann

Tel.: +49 (0)345 581-4227
E-Mail: falko.kietzmann@hws-halle.de

Dr.-oec. Regina Blümel

Tel.: +49 (0)345 581-1017
E-Mail: regina.bluemel@stadtwerke-halle.de

Erstelldatum: 11.08.2015

Projektnummer DBFZ: 3530006

Gesamtseitenzahl 77

Anlagen Berichtsblatt

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	IV
I. Kurzdarstellung.....	6
1. Hintergrund und Aufgabenstellung.....	6
2. Planung und Ablauf	8
3. Wissenschaftlicher und technischer Ausgangspunkt	9
4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
II. Eingehende Darstellung.....	11
1. Ergebnisse des Projektes	11
<i>AP 1 Charakterisierung der Einsatzmaterialien</i>	<i>11</i>
<i>AP 2 HTC-Laboruntersuchungen</i>	<i>16</i>
<i>AP 3 Anlagenvorplanung</i>	<i>20</i>
<i>AP 4 Errichtung und Betrieb der HTC-Anlage</i>	<i>26</i>
<i>AP 5 Wissenschaftliche Begleitung des Anlagenbetriebs.....</i>	<i>31</i>
<i>AP 6 Energetische Nutzung der HTC-Kohle</i>	<i>32</i>
<i>AP 7 Konzeptbewertung.....</i>	<i>39</i>
<i>AP 7a Stoff- und Energiebilanzen.....</i>	<i>40</i>
<i>AP 7b Ökonomische Bewertung</i>	<i>42</i>
<i>AP 7c Ökologische Bewertung</i>	<i>51</i>
<i>Zusammenfassung und Ausblick</i>	<i>57</i>
<i>Handlungsempfehlungen</i>	<i>59</i>
<i>Abbildungsverzeichnis</i>	<i>60</i>
<i>Tabellenverzeichnis</i>	<i>61</i>
<i>Anhang</i>	<i>62</i>
2. Voraussichtlicher Nutzen	65
3. Fortschritt Dritter.....	67
4. Veröffentlichungen und Ergebnistransfer	68
5. Literatur- und Referenzverzeichnis	72
III. Berichtsblatt.....	76

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
ASN	Abfallschlüsselnummer
AWH	Abfallwirtschaft GmbH Halle-Lochau
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CO ₂ -Äq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie
DTG	Differenzthermogravimetrie
EC	Europäische Kommission
EG	Europäische Gemeinschaft
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
HHS	Holzhackschnitzel
Hi	Heizwert
HTC	Hydrothermale Carbonisierung
HWS	Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft GmbH
I ₀	Anfangsinvestition
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
OS	Originalsubstanz
p.a.	Per annum
Ref	Referenz

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
σ	Standardabweichung
STA	Simultane thermische Analyse
THG	Treibhausgas
THGV	Treibhausgasvermeidungskosten
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VKU	Verband kommunaler Unternehmen e.V.
vTI	Johann Heinrich von Thünen-Institut
waf	Wasser- und aschefrei)
wf	Wasserfrei
WGK	Wärmegestehungskosten

I. Kurzdarstellung

1. Hintergrund und Aufgabenstellung

Die stoffliche und energetische Nutzung von Holz stieg in Deutschland in den letzten Jahren kontinuierlich an, so dass, ungeachtet der vorhandenen Vorräte, die Preise für Holz ebenfalls steigen. Regional kommt es dabei zum Teil schon heute zu spürbaren Engpässen bzw. Preisspitzen, die den rentablen Betrieb von Energieanlagen auf Biomassebasis erschweren. Diese Entwicklung wird sich wahrscheinlich zukünftig fortsetzen. Deshalb wird derzeit intensiv über alternative, biogene Festbrennstoffe nachgedacht. Auf der anderen Seite fallen im kommunalen Bereich große Mengen biogener Reststoffe an, die derzeit nicht oder nicht zufriedenstellend energetisch genutzt werden, so auch bei der Halleschen Wasser und Stadtwirtschaft GmbH (HWS). Ziel des Forschungsprojektes war die Bereitstellung alternativer Biomasse-Festbrennstoffe durch die Erschließung und effiziente Nutzung kommunaler, biogener Reststoffe mit Hilfe der Hydrothermalen Carbonisierung (HTC). Dabei sollte in Kooperation mit dem Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ) ein integriertes Verwertungskonzept entwickelt, umgesetzt und erprobt werden, das auf Grund der ähnlichen Problemstellungen auf eine Vielzahl anderer Kommunen übertragbar ist. Das integrierte Verfahren ergänzt dabei die bisherigen Verwertungslinien der HWS für Grünschnitt und Bioabfall. Abbildung I-1 zeigt die geplante Erweiterung der bestehenden Verwertungslinien um eine HTC-Anlage und die damit ermöglichten verbesserten und zusätzlichen Verwertungspfade.

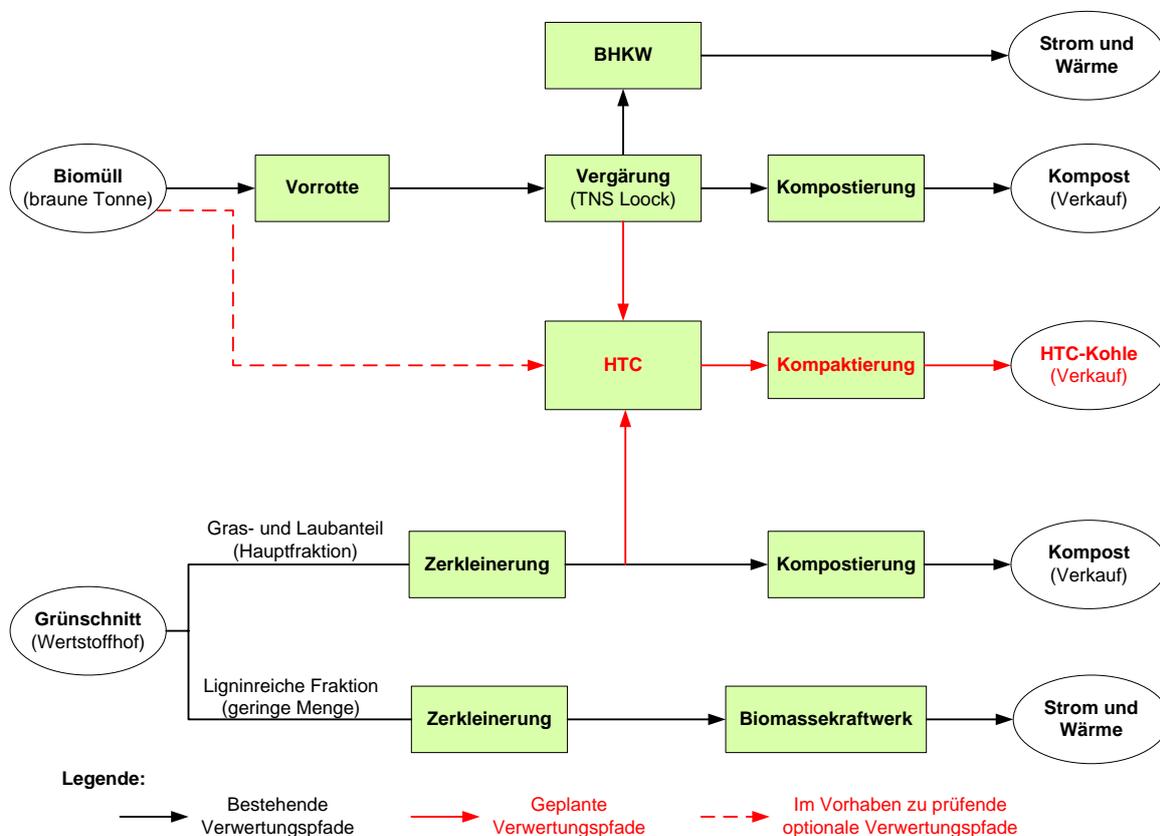


Abbildung I-1: Bestehende und geplante Verwertungspfade für biogene Reststoffe der HWS.

Durch die Integration einer HTC-Anlage in die Verwertungswege der HWS sollte eine innovative, wirtschaftlich vorteilhafte und klimafreundliche Verwertung von biogenen Reststoffen demonstriert werden. Dabei sollte ein hochwertiges Verkaufsprodukt in Form von HTC-Kohle produziert werden.

Aus diesem Gesamtziel wurden folgende Teilziele abgeleitet:

- Technologieauswahl und -anpassung,
- Errichtung einer Demonstrationsanlage zur Hydrothermalen Carbonisierung mit einer Jahreskapazität von 2.500 Mg Input,
- Nachweis der technischen Funktionalität der HTC-Anlage für die Behandlung unterschiedlicher Stoffströme,
- Optimierung des Anlagenbetriebes,
- Nachweis der hochwertigen Nutzungsmöglichkeit der produzierten HTC-Kohle in Kleinfeuerungsanlagen,
- Optimierung der brennstofftechnischen Eigenschaften der HTC-Kohle,
- Entwicklung eines optimierten Stoffstromkonzeptes für die energetische Verwertung kommunaler Biomassen,
- Nachweis der Wirtschaftlichkeit und der Treibhausgasemissionsminderung gegenüber bestehenden Verwertungskonzepten.

Zum Erreichen der genannten Ziele wurde das Projekt in sieben Arbeitspakete unterteilt (vgl. Abbildung I-2). Die Arbeiten im AP 1 und AP 2 stellten notwendige Informationen für die Vorplanung und Ausschreibung der HTC-Anlage im AP 3 bereit. Im AP 4 sollte die HTC-Demonstrationsanlage errichtet und betrieben werden. Die wissenschaftliche Begleitung des Anlagenbetriebs im AP 5 sollte den Anlagenbetrieb und die Anlagenoptimierung unterstützen und die notwendigen Daten für die Ermittlung der Stoff- und Energiebilanz generieren. Parallel dazu sollte im AP 6 die Pelletierung und die energetische Nutzung der HTC-Kohlen in Kleinfeuerungsanlagen untersucht werden. Im AP 7 wurde das integrierte Verwertungskonzept ökonomisch und ökologisch bewertet. Im Projekt waren zwei Meilensteine M1 und M2 vorgesehen. Meilenstein 1 war die positive Investitionsentscheidung der HWS zur Errichtung der HTC-Anlage. Meilenstein 2 war das Erreichen eines stabilen HTC-Anlagenbetriebs und das Bereitstellen von HTC-Kohle, deren Qualität die Anforderungen an die Vermarktbarkeit erfüllt.

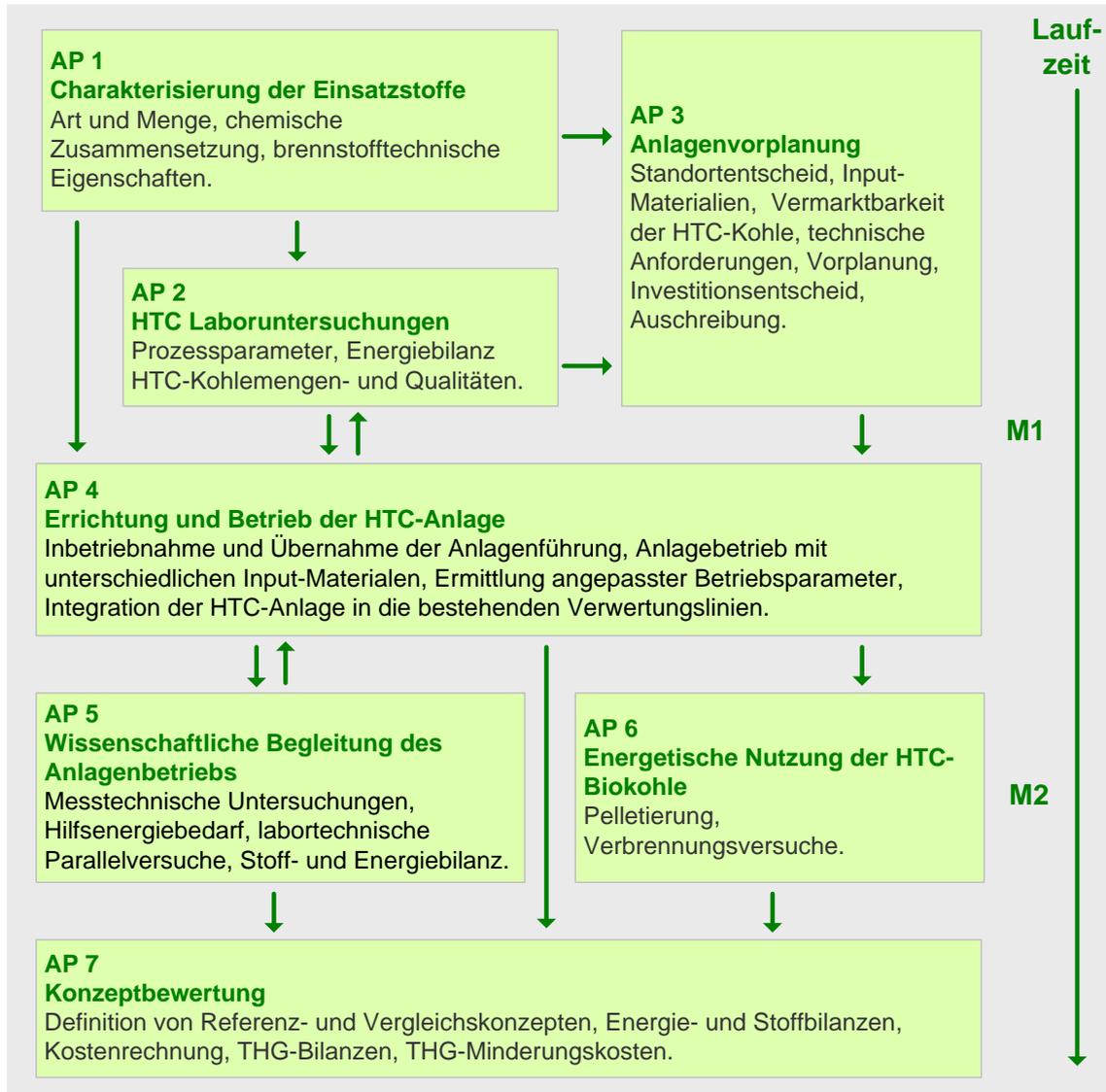


Abbildung I-2: Überblick über die Projektstruktur.

2. Planung und Ablauf

Für das Projekt war eine Laufzeit vom 01.12.2010 bis zum 31.05.2013 vorgesehen. Auf Grund zeitlicher Verzögerungen bei der Errichtung und auf Grund technischer Probleme bei der Inbetriebnahme der HTC-Demonstrationsanlage konnte der Zeitplan nicht eingehalten werden. Das Projekt wurde daher mehrmals kostenneutral verlängert. Letztendlich wurde das Projekt nach 49 Monaten am 31.12.2014 beendet, ohne dass die HTC-Anlage in den stabilen Betrieb überführt werden konnte.

Der Zahlungsplan wurde jeweils mit Änderung des Zeitplans entsprechend angepasst. Wie in den jeweiligen sachstandsbezogenen Zwischenberichten an die PTJ dargestellt, erfolgten kleinere Mittelumwidmungen. Auf Grund der technischen Probleme und der damit verbundenen Reparaturen und Umbauten wurde der kalkulierte, finanzielle Rahmen für die HWS deutlich überschritten. Dies führte in der Konsequenz dazu, dass die Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft GmbH und damit die Stadtwerke Halle GmbH deutlich mehr Eigenmittel in das Projekt eingebracht haben, als ursprünglich geplant war. Auch nach offiziellem Projektende ist mit weiterem Aufwand zu rechnen.

3. Wissenschaftlicher und technischer Ausgangspunkt

Die HTC ist ein thermochemischer Prozess zur Konversion von Biomasse, der in heißem Hochdruckwasser als Reaktionsmedium stattfindet. Die HTC arbeitet mit einer Temperatur von 180 bis 250 °C und einem Druck von 10 bis 40 bar. Die Reaktionsdauer beträgt mehrere Stunden. Nach einer Vorwärmung wird die Biomasse teilweise durch einen Abbau der organischen Makromoleküle in die flüssige Phase überführt. Im weiteren Verlauf erfolgt unter Abspaltung von Wasser und funktionellen Gruppen ein Wiederaufbau langer Kohlenstoffketten.

Die hydrothermale Umwandlung biogener Modellsubstanzen wie Zucker, Stärke und Cellulose wurde u.a. von (Peterson u.a. 2008), (Sevilla und Fuertes 2009), (Kruse 2010) und (Funke und Ziegler 2010) untersucht. Zum Zeitpunkt der Antragsstellung gab es erste Arbeiten zur HTC kommunaler, biogener Reststoffe im Labor- und Technikumsmaßstab (u.a. Ramke 2009; Schlitt 2010). (Schuchardt und Vorlop 2010) veröffentlichten eine erste Abschätzung zum Potential biogener Reststoffe für die HTC in Deutschland.

Mehre Anlagenanbieter arbeiteten an der technischen Umsetzung der HTC. Es wurden Verfahren mit verschiedenen Reaktortypen und Betriebsweisen entwickelt. Der Stand der einzelnen Technologieanbieter war dabei sehr unterschiedlich und reichte von rein theoretischen Anlagenkonzepten über Laboranlagen bis zu Technikumsanlagen. Die Firma HydroCarb GmbH errichtete 2009 eine HTC-Anlage mit einem Durchsatz von 1,7 Mg/d (Schlitt 2010). Die Firma TerraNova Energy nahm 2010 ihre HTC-Anlage mit einer Kapazität von 1.200 Mg/a in Betrieb (TerraNova 2015). Beide Anlagen wurden nur kampagnenweise betrieben. Letztere war für den Einsatz von Klärschlamm ausgelegt. Damit gab es keine HTC-Anlage im industriellen Maßstab, die kommunale biogene Reststoffe verarbeitete und die integriert in ein Verwertungskonzept unter kommerziellen Bedingungen im Dauerbetrieb betrieben wurde.

Weiterhin wurde die Verbrennung der HTC-Kohle als eine Nutzungsoption immer wieder angeführt. Untersuchungen zu den Nutzungseigenschaften als Brennstoff sowie systematische Verbrennungsversuche fehlten. Insbesondere die Verbrennung der HTC-Kohle in Kleinfeuerungsanlagen stellte einen wesentlichen Neuheitsgrad des Vorhabens dar.

Ergebnisse zur ökologischen Bewertung der HTC waren nicht veröffentlicht.

4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes erfolgte ein enger Austausch mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft. Wie der Liste der Veröffentlichungen zu entnehmen ist, haben die Projektpartner das Projekt und dessen Ergebnisse vielfach auf nationalen und internationalen Fachveranstaltungen vorgestellt und diskutiert. Im Rahmen der Statusseminare des Service- und Begleitvorhabens haben sich die Projektpartner mit anderen Teilnehmern des Förderprogrammes „Energetische Biomassenutzung“ vernetzt.

Mit dem HTP-Fachforum „Biobasierte hydrothermale Prozesse - Technologien zur stofflichen und energetischen Nutzung“ am 11./ 12. November 2014 in Leipzig sind das DBFZ und die Stadtwerke Halle als Organisatoren und Veranstalter einer Fachtagung zum Thema Hydrothermale Prozesse aufgetreten. Die Veranstaltung wurde von 80 Teilnehmern besucht. Die Projektpartner konnten damit einen bedeutenden Beitrag zum wissenschaftlichen Austausch leisten.

Die Stadtwerke Halle GmbH ist Mitglied im Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU) und im Cluster Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt. Das Projekt wurde durch die HWS in beide Netzwerke getragen. Damit konnte ein Ergebnistransfer mit Akteuren der kommunalen Abfallwirtschaft sichergestellt werden. Die HWS trat ferner dem Bundesverband Hydrothermale Carbonisierung e.V. bei und erzielt so auch über dieses Netzwerk eine Multiplikatorwirkung.

Das DBFZ ist in der VDI-Arbeitsgruppe *Biokarbonisate der Kommission der Reinhaltung der Luft im VDI* vertreten, womit Ergebnisse des Projektes in die Normungsarbeit des Ausschusses einfließen.

Weiterhin erfolgte über die Betreuung von vier studentischen Abschlussarbeiten sowie durch gehaltene Vorlesungen zum Thema HTC und damit verbundenen Studentenpraktika ein Wissenstransfer mit den Hochschulen. Überdies steht die HWS im engen Kontakt mit Herrn Prof. Dr. Glaser, Professur Bodenbiogeochemie des Instituts für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

II. Eingehende Darstellung

1. Ergebnisse des Projektes

AP 1 Charakterisierung der Einsatzmaterialien

a. Zielstellung

Die bei der Halleschen Wasser und Stadtwirtschaft GmbH (HWS) anfallenden biogenen Stofffraktionen sind ein heterogenes Gemisch unterschiedlicher Materialien, das jahreszeitlichen und anderen Schwankungen unterliegt. Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Charakterisierung der stofflichen und energetischen Eigenschaften der Einsatzstoffe mit Hilfe von Parametern, die für die Auslegung und den Betrieb der Konversionsanlagen von Bedeutung sind.

b. Vorgehen und Methodik

Die bei der HWS angelieferten bzw. durch sie erfassten biogenen Abfälle beschränken sich in erster Linie auf Grünschnitt (Baum-, Strauch- und Rasenschnitt, Laub) sowie Bioabfall, welcher flächendeckend haushaltsnah über die braune Tonne erfasst wird. Der Grünschnitt wird auf dem Betriebshof der HWS gesammelt, geschreddert und über Kompostwerke verwertet. Der Bioabfall wird direkt oder über Umladestationen zu einer Vergärungsanlage verbracht und dort zu Biogas und Gärrest umgewandelt.

Um die Qualität der biogenen Reststoffströme – kommunaler Grünschnitt, Bioabfall und Gärrest – zu ermitteln, wurden diese über einen Zeitraum von einem Jahr alle zwei Monate beprobt und deren chemische und brennstofftechnische Eigenschaften analysiert. Die verwendeten Analysemethoden sind im Anhang in Tabelle II-14 aufgelistet.

c. Ergebnisse

Die jährlichen Mengen der durch die HWS erfassten biogenen Reststoffströme Grünschnitt (ASN 200201) und Bioabfall (ASN 200301) sind dabei in Summe ähnlich, wobei es immer wieder Jahre mit höherem Aufkommen gibt, wie die Jahre 2011 und 2014 (vgl. Tabelle II-1). Dabei korreliert das erhöhte Aufkommen von Grünschnitt mit dem des Bioabfalls, da die Bürger auch die Möglichkeit nutzen, einen Teil des bei ihnen anfallenden Grünschnittes über die bereitgestellten braunen Tonnen zu entsorgen.

Ursachen für die erhöhten Jahresaufkommen sind in der Regel witterungsbedingt. Hier hervorzuheben ist insbesondere das Jahr 2014, in dem das Aufkommen von Grünschnitt den Durchschnitt der vier vorangegangenen Jahre um 19 % überstieg. Ursächlich werden hier die sehr milden Winter gesehen, die dazu führten, dass die Vegetationsperiode einerseits früher begann und andererseits bis in den November reichte. Speziell in der zweiten Jahreshälfte 2014 überstieg das Aufkommen die Vorjahreswerte und erreichte erst im Dezember wieder ein übliches Niveau.

Ein Trend lässt sich aus dem betrachteten Zeitraum nicht ableiten. Es ist jedoch anzunehmen, dass bei einer Zunahme milderer Winter mit einem dauerhaft gesteigerten Aufkommen zu rechnen ist.

Tabelle II-1: Jahresmengen der bei der HWS anfallenden biogenen Stofffraktionen kommunaler Grünschnitt und Bioabfall.

Jahr	Kommunaler Grünschnitt in Mg/a	Bioabfall in Mg/a
2010	14.723	8.707
2011	15.576	9.198
2012	14.349	8.496
2013	14.367	8.232
2014	17.581	9.174

Die Darstellung der Jahreskurven des Grünschnittaufkommens zeigt, dass in den Wintermonaten Dezember bis Februar im Allgemeinen deutlich weniger Grünschnitt anfällt als in den restlichen Monaten. Hervorzuheben ist dabei das Jahr 2013, in welchem es auch noch im März ein sehr geringes Aufkommen gab. Dies ist mit sehr niedrigen Temperaturen im März des genannten Jahres ebenfalls witterungsbedingt zu erklären. Das Monatsmittel der Lufttemperatur lag an der Messstation *Geologischer Garten* bei $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ und damit deutlich unter dem Durchschnittswert für März von $4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 2015).

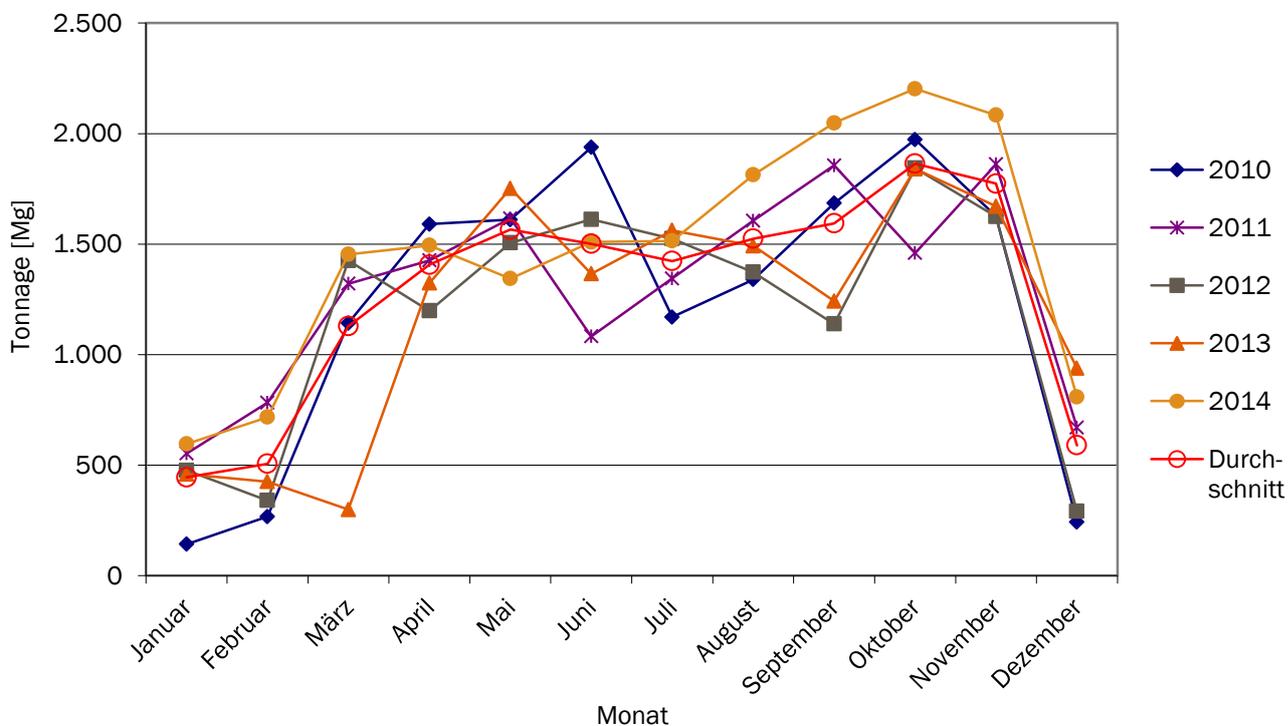


Abbildung II-1: Jahreskurve des kommunalen Grünschnittaufkommens der HWS.

Generell kann festgestellt werden, dass Grünschnitt als potentieller Energieträger genau dann anfällt, wenn kein ausgeprägter Wärmebedarf besteht. Um den Einsatz als Bioenergieträger insbesondere in den relevanten Zeiträumen zu gewährleisten, ist damit die Erreichung einer stabilen Lagerfähigkeit notwendig.

Die drei oben genannten Stoffströme wurden im Zeitraum zwischen Januar und Dezember 2011 alle zwei Monate beprobt. Tabelle II-2 gibt eine Übersicht über die ermittelten chemischen und brennstofftechnischen Parameter.

Tabelle II-2: Übersicht der ermittelten chemischen und brennstofftechnischen Parameter des kommunalen Grünschnittes.

Parameter	Einheit	Jan./ Feb.	Mrz./ Apr.	Mai/ Jun.	Jul./ Aug.	Sep./ Okt.	Nov./ Dez.	Mittelwert
Wassergehalt	Ma.-%	54,6	66,8	14,7	49,6	44,6	43,5	45,6 ± 15,8
Aschegehalt 550 °C	Ma.-% (waf)	56,4	39,1	35,1	34,1	14,5 ¹	26,2 ¹	41,2 ± 9,0
Aschegehalt 815 °C	Ma.-% (waf)	53,8	37,7	34,1	33,7	13,6 ¹	24,6 ¹	39,8 ± 8,2
Silicium	Ma.-% (waf)	14,5	10,1	12,6	11,6	4,7 ¹	5,9 ¹	12,2 ± 1,6
Brennwert Ho	MJ/kg (waf)	20,0	19,8	18,1	19,4	19,9	20,8	19,7 ± 0,8
Heizwert Hi (H,N,S korr.)	MJ/kg (waf)	19,0	18,5	16,7	17,9	18,6	19,5	18,3 ± 0,8
Kohlenstoff	Ma.-% (waf)	57,8	53,7	50,4	53,6	49,4	54,6	53,2 ± 2,8
Wasserstoff	Ma.-% (waf)	6,3	5,7	6,0	6,4	6,1	6,4	6,2 ± 0,3
Stickstoff	Ma.-% (waf)	1,6	1,0	1,2	1,7	1,0	1,3	1,3 ± 0,3
Schwefel	Ma.-% (waf)	0,28	0,13	0,18	0,18	0,27	0,26	0,22 ± 0,05

Der Grünschnitt besitzt einen mittleren Wassergehalt von 45,6 Ma.-%. Wie zu erkennen ist, schwankt der Wassergehalt von Probenahme zu Probenahme stark. Ein wesentlicher Grund für die große Schwankungsbreite ist, dass der Grünschnitt auf dem Betriebshof der HWS gesammelt und unter freiem Himmel gelagert wird. Damit ist dieser den Witterungsverhältnissen ausgesetzt und wird je nach Wetter getrocknet oder befeuchtet. Der Aschegehalt ist saisonalen Schwankungen unterworfen und liegt zwischen 56,4 Ma.-% (Wintermonaten) und 34,1 Ma.-% (Sommermonaten). Der mittlere Aschegehalt des Grünschnittes beträgt 41,2 Ma.-% und ist damit im Vergleich zu anderen Biomassen wie Fichtenholz (0,6 Ma.-%) und Weizenstroh (5,7 Ma.-%) sehr hoch (Kaltschmitt u.a. 2009, S. 360). Hauptbestandteil der Asche ist mit einem mittleren Gehalt von 12,2 Ma.-% Silicium. Der hohe Siliciumgehalt bestätigt den optischen Eindruck der Biomasse, dass der hohe mineralische Gehalt maßgeblich durch anhaftende Erde und Sand verursacht wird. Der Grünschnitt der Probenahmen September / Oktober bzw. November / Dezember wurde am DBFZ gewaschen. Dazu wurden die Biomasseproben in Maurer-

¹ Gewaschener und gesiebter Grünschnitt; Werte wurden nicht für die Berechnung der Mittelwerte herangezogen.

wannen mit Leitungswasser vermischt und durch mehrmaliges Rühren aufgetrennt. Die auf der Wasseroberfläche aufschwimmende, sowie die im Wasser schwebende Fraktion wurde mit Hilfe eines 5 mm Siebes abgeschöpft und für die weitere Analyse verwendet. Am Boden der Gefäße hatte sich eine Sandfraktion abgesetzt. Durch diese Vorbehandlung konnte der Aschegehalt des Grünschnittes auf 14,5 Ma.-% bzw. 26,2 Ma.-% reduziert und die These, dass der hohe Aschegehalt durch anhaftende Erde und Sand begründet wird, bestätigt werden. Neben den negativen Auswirkungen auf die Brennstoffqualität der HTC-Kohle, erwies sich der hohe Anteil an Sand als eine wesentliche Störquelle für die Funktionalität und den Betrieb der HTC-Anlage (vgl. Kapitel AP 4 *Errichtung und Betrieb der HTC-Anlage*). Um den Einfluss des hohen und schwankenden Aschegehaltes auf die chemische Zusammensetzung und den Brennwert bzw. Heizwert auszublenden, sind die Werte in Tabelle II-2 wasser- und aschefrei (waf) aufgelistet. Dadurch ist erkennbar, dass der organische Anteil des Grünschnittes eine gleichbleibende Zusammensetzung aufweist. Der mittlere Kohlenstoffgehalt beträgt 53,2 Ma.-%, der mittlere Wasserstoffgehalt 6,2 Ma.-%. Der Grünschnitt enthält 1,3 Ma.-% Stickstoff und 0,22 Ma.-% Schwefel. Der Brennwert und Heizwert des Grünschnittes variiert ebenfalls nur sehr leicht und beträgt im Mittel 19,7 MJ/kg bzw. 18,3 MJ/kg.

Tabelle II-3: Mittelwerte der ermittelten chemischen und brennstofftechnischen Parameter der Einsatzmaterialien kommunaler Grünschnitt, Bioabfall und Gärrest.

Parameter	Einheit	Grünschnitt	Bioabfall	Gärrest
Wassergehalt	Ma.-%	45,6 ± 15,8	64,1 ± 7,9	52,3 ± 7,4
Aschegehalt 550°C	Ma.-% (waf)	41,2 ± 9,0	40,4 ± 10,1	58,5 ± 9,4
Aschegehalt 815°C	Ma.-% (waf)	39,8 ± 8,2	38,1 ± 10,0	55,8 ± 9,8
Silicium	Ma.-% (waf)	12,2 ± 1,6	10,6 ± 3,1	13,6 ± 5,4
Brennwert Ho	MJ/kg (waf)	19,7 ± 0,8	20,8 ± 1,9	21,3 ± 1,5
Heizwert Hi (H,N,S korr.)	MJ/kg (waf)	18,3 ± 0,8	19,4 ± 1,8	19,8 ± 1,3
Kohlenstoff	Ma.-% (waf)	53,2 ± 2,8	53,5 ± 4,8	58,0 ± 3,5
Wasserstoff	Ma.-% (waf)	6,2 ± 0,3	6,2 ± 0,7	6,3 ± 0,8
Stickstoff	Ma.-% (waf)	1,3 ± 0,3	2,0 ± 0,5	2,3 ± 0,6
Schwefel	Ma.-% (waf)	0,22 ± 0,05	0,35 ± 0,17	1,10 ± 0,37

In Tabelle II-3 sind die mittleren Werte des kommunalen Grünschnittes, des Bioabfalles und des Gärrestes gegenübergestellt. Der Grünschnitt besitzt mit 45,6 Ma.-% den geringsten Wassergehalt, gefolgt vom Gärrest mit 52,3 Ma.-% und vom Bioabfall mit 64,1 Ma.-%. Der Aschegehalt des Bioabfalles (40,4 Ma.-%) ist sehr hoch und liegt im Bereich des Grünschnittes (41,2 Ma.-%). Mit 58,5 Ma.-% ist der mineralische Anteil des Gärrestes dagegen nochmals deutlich höher. Der jeweils hohe Gehalt an Silicium zeigt, dass bei allen drei Stofffraktionen der hohe Aschegehalt maßgeblich durch anhaftende Erde und Sand verursacht wird. Die Werte für die chemische Zusammensetzung und den Brennwert bzw. Heizwert sind wasser- und aschefrei (waf) angegeben. Demnach liegt der Brennwert der drei Stofffraktionen im Bereich zwischen 19,7 MJ/kg (Grünschnitt) und 21,3 MJ/kg (Gärrest). Der etwas höhere

Brennwert des Gärrestes resultiert aus dem höheren Kohlenstoffgehalt von 58,0 Ma.-% gegenüber 53,2 Ma.-% (Grünschnitt) bzw. 53,5 Ma.-% (Bioabfall). Der Wasserstoffgehalt der drei biogenen Reststoffe ist annähernd gleich. Bioabfall (2,0 Ma.-%) und Gärrest (2,3 Ma.-%) weisen einen höheren Stickstoffgehalt auf als Grünschnitt (1,3 Ma.-%). Hervorzuheben ist der hohe Schwefelgehalt des Gärrestes mit 1,1 Ma.-%. Insgesamt unterscheiden sich die drei Stofffraktionen in ihren chemischen und brennstofftechnischen Eigenschaften, mit Ausnahme des Asche- und Schwefelgehaltes, kaum.

AP 2 HTC-Laboruntersuchungen

a. Zielstellung

Die Behandlung biogener Reststoffe durch Hydrothermale Carbonisierung ist ein neues Verfahren, dessen wissenschaftliche Durchdringung noch nicht vollständig gelungen ist. Die Materialfraktionen der HWS wurden vor dem Projekt noch nicht hinsichtlich ihres Konversionsverhaltens bei der HTC untersucht. Ziel des Arbeitspakets war es, die grundsätzliche Eignung der vorliegenden Inputmaterialien für die Hydrothermale Carbonisierung beurteilen zu können, eine Einschätzung günstiger Betriebsparameter (wie TS-Gehalt, Temperatur und Haltezeit) vorzunehmen und die zu erwartenden Mengen und Qualitäten der HTC-Kohle abzuschätzen.

b. Vorgehen und Methodik

Die Methodik und die Ergebnisse der durchgeführten HTC-Versuche sind bereits so im Konferenzband des *4. Statustreffens des Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“* veröffentlicht (Clemens u.a. 2013, S. 239 - 246).

Am DBFZ wurden Laboruntersuchungen durchgeführt, um die Eignung der genannten Stoffströme für die HTC zu beurteilen und den Einfluss der Prozessparameter auf den Carbonisierungsprozess zu untersuchen.

Zunächst wurden die drei Ausgangsmaterialien aufbereitet. Hierzu wurden die drei Substrate jeweils im Ofenschrank bei 105 °C getrocknet und auf eine Partikelgröße von 6 mm gemahlen. Dieser Aufbereitungsschritt war notwendig, um homogene Proben für die HTC-Versuche zur Verfügung zu stellen und um die Proben zu lagern. Danach wurde jedes Substrat bei einer Temperatur von 180, 200 und 220 °C jeweils für die Verweilzeit von 2, 4 und 6 h hydrothermal carbonisiert. Tabelle II-4 zeigt die Versuchsmatrix der HTC-Laboruntersuchungen. Die Carbonisierungsversuche wurden in einem 500-ml-Laborautoklav (Berghof, Highpreactor BR-500) durchgeführt. Der Laborautoklav war mit einem elektrischen Heizmantel sowie einem Rührwerk ausgestattet. Für jeden HTC-Versuch wurde eine Suspension bestehend aus 100 g biogenen Reststoff und 300 g Wasser in den Reaktor gefüllt. Es wurde kein Katalysator verwendet. Der Reaktor wurde verschlossen und auf die Reaktionstemperatur erwärmt. Die Heizrate betrug 2 K/min. Nach Erreichen der Reaktionstemperatur wurde die Temperatur für die definierte Verweilzeit von 2, 4, bzw. 6 h konstant gehalten. Anschließend wurde die Heizung abgestellt und das System kühlte sich wieder auf Raumtemperatur ab. Die Suspension wurde während der gesamten Versuchsdauer mit 100 Drehungen pro Minute gerührt, um während der Aufheiz- und Abkühlphase den Wärmeübergang von der Reaktorwand ins Innere zu erhöhen und während der Reaktionsphase eine homogene Temperaturverteilung zu realisieren. Die Reaktorinnentemperatur und der Reaktorinnendruck wurden während der gesamten Versuchsdauer gemessen. Nachdem sich das System wieder auf Raumtemperatur abgekühlt hatte, wurde der Autoklav über das Gasentnahmeventil entspannt. Das Volumen der Gasphase wurde gemessen. Die HTC-Kohle-Wasser-Suspension wurde gewogen und mittels Vakuumfiltration in eine feste und flüssige Phase aufgetrennt. Die feste Phase wurde im Ofenschrank bei 105 °C getrocknet. Anschließend wurden die Elementarzusammensetzung (DIN EN 15104), der Brennwert (DIN 14918) und der Aschegehalt (DIN EN 14775) der HTC-Kohle bestimmt.

Tabelle II-4: Versuchsmatrix der HTC-Laborversuche.

Parameter	2 h	4 h	6 h
180 °C	X	X	X
200 °C	X	X	X
220 °C	X	X	X

c. Ergebnisse

Abbildung II-2 zeigt die Produktverteilung der HTC von Bioabfall. Die Massenanteile sind wasser- und aschefrei (waf) dargestellt. Demnach ist die als HTC-Kohle bezeichnete feste Phase mit einem Massenanteil von 72 bis 89 Ma.-% das Hauptprodukt der HTC. Die flüssige Phase besitzt einen Anteil von 10 bis 27 Ma%. Bei der HTC von Bioabfall entsteht weniger als 5 Ma.-% Gas. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Anteil der festen Phase mit steigender Temperatur abnimmt und dem entgegengesetzt die Anteile der flüssigen und gasförmigen Phasen mit steigender Temperatur zunehmen. Der Einfluss der Verweilzeit auf die Produktverteilung ist dagegen gering.

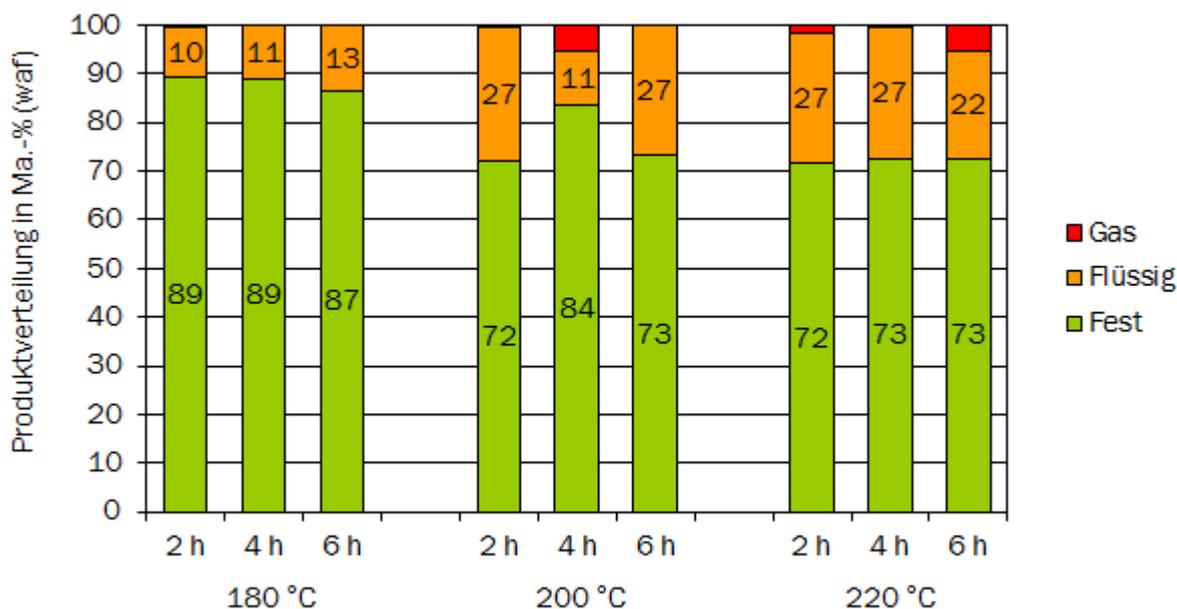


Abbildung II-2: Produktverteilung der HTC von Bioabfall; wasser- und aschefrei (Clemens u.a. 2013, S. 243).

Abbildung II-3 zeigt die wasser- und aschefreie Elementarzusammensetzung der HTC-Kohlen von Bioabfall für die Versuchsparameter 180 °C und 2 h sowie für den Versuch 220 °C und 6 h im Vergleich zur Elementarzusammensetzung des unbehandelten Bioabfalls, von Holz und von Braunkohle. Die Werte von Holz und Braunkohle wurden Kaltschmitt u.a. 2009 entnommen. Das Ausgangsmaterial, der Bioab-

fall, besitzt eine ähnliche Zusammensetzung wie Holz. Durch die HTC wird der Kohlenstoffgehalt gesteigert und der Sauerstoffgehalt verringert. Die Zunahme des Kohlenstoffgehaltes bzw. die Abnahme des Sauerstoffgehaltes in der HTC-Kohle ist umso stärker, je höher die Versuchsparameter Temperatur und Verweilzeit sind. Der Kohlenstoffgehalt steigt von 52 Ma.-% im Ausgangsmaterial über 59 Ma.-% in der HTC-Kohle bei den geringsten Versuchsparametern bis auf 68 Ma.-% in der HTC-Kohle bei den höchsten Versuchsparametern. Die HTC-Kohle des Versuches 220 °C und 6 h weist eine ähnliche Zusammensetzung wie Braunkohle auf (vgl. Abbildung II-3).

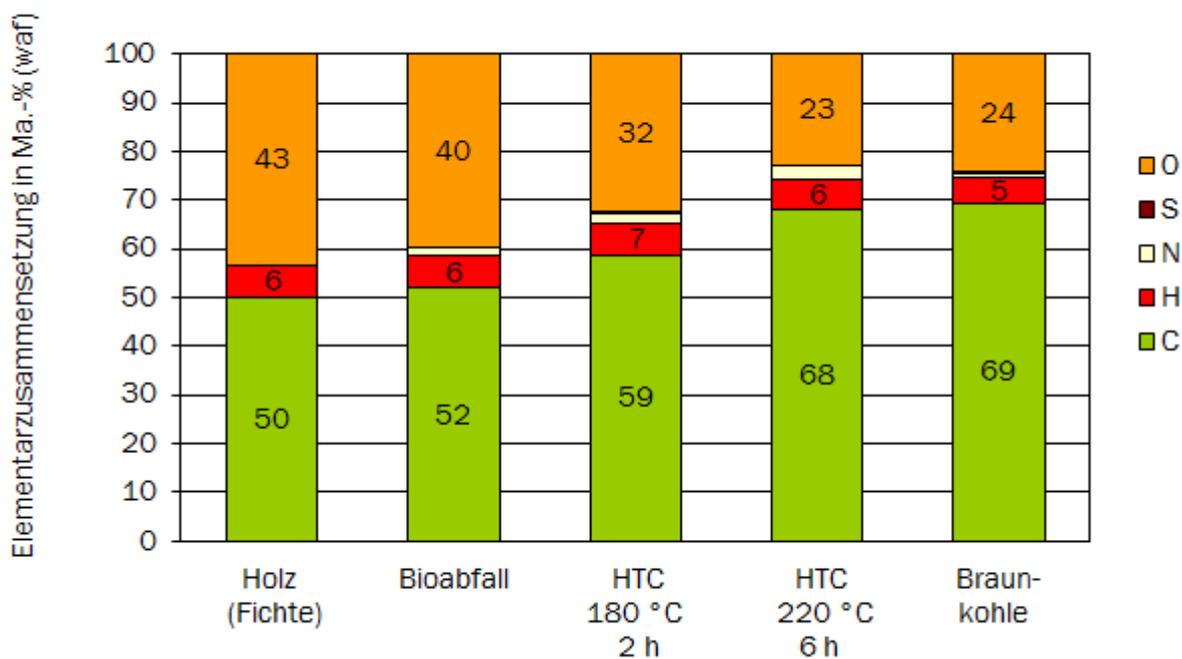


Abbildung II-3: Elementarzusammensetzung der HTC-Kohle von Bioabfall; wasser- und aschefrei (Clemens u.a. 2013, S. 243).

Tabelle II-5 stellt für alle neun HTC-Kohlen aus Bioabfall die Brennwerte den Kohlenstoffgehalten gegenüber. Der Brennwert der HTC-Kohlen steigt in gleicher Weise wie der Kohlenstoffgehalt mit zunehmender Reaktionstemperatur und zunehmender Verweilzeit. Der Bioabfall besitzt bei einem Kohlenstoffgehalt von 52 Ma.-% einen Brennwert von 21 MJ/kg. Bei der HTC mit den Parametern 180 °C und 2 h steigen der Kohlenstoffgehalt auf 59 Ma.-% und der Brennwert auf 23 MJ/kg. Nach der HTC bei 220 °C und 6 h beträgt der Kohlenstoffgehalt der HTC-Kohle 68 Ma% und der Brennwert 27 MJ/kg. Die HTC führt im Zuge der Kohlenstoffanreicherung zu einer Steigerung des Brennwertes.

Tabelle II-5: Kohlenstoffgehalt und Brennwert der HTC-Kohlen von Bioabfall; wasser- und aschefrei (Clemens u.a. 2013, S. 244).

Parameter	Kohlenstoffgehalt in Ma.-% (waf)			Brennwert in MJ/kg (waf)		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h
180 °C	59	60	60	23	24	24
200 °C	61	61	62	25	25	25
220 °C	63	61	68	25	26	27

Die HTC des Grünschnitts und des Gärrestes weisen gleiche Ergebnisse wie die HTC des Bioabfalles auf. Abbildung II-4 zeigt für die drei Substrate Grünschnitt, Bioabfall und Gärrest die jeweils aus den neun HTC-Versuchen ermittelten durchschnittlichen Elementarzusammensetzungen der HTC-Kohlen sowie die Elementarzusammensetzungen der Ausgangsmaterialien, von Holz und von Braunkohle. Demnach besitzen die drei Ausgangsmaterialien eine identische Elementarzusammensetzung und sind in ihrer Zusammensetzung mit Holz gleichzusetzen. Die durchschnittliche Elementarzusammensetzung der HTC-Kohlen ist ebenfalls identisch. Der durchschnittliche Kohlenstoffgehalt der HTC-Kohlen liegt mit 62 Ma.-% zwischen dem Kohlenstoffgehalt der Ausgangsmaterialien (52 Ma.-%) und dem Kohlenstoffgehalt der Braunkohle (69 Ma.-%). Insgesamt kann festgehalten werden, dass alle drei biogenen Reststoffströme geeignet sind in HTC-Kohle umgewandelt zu werden.

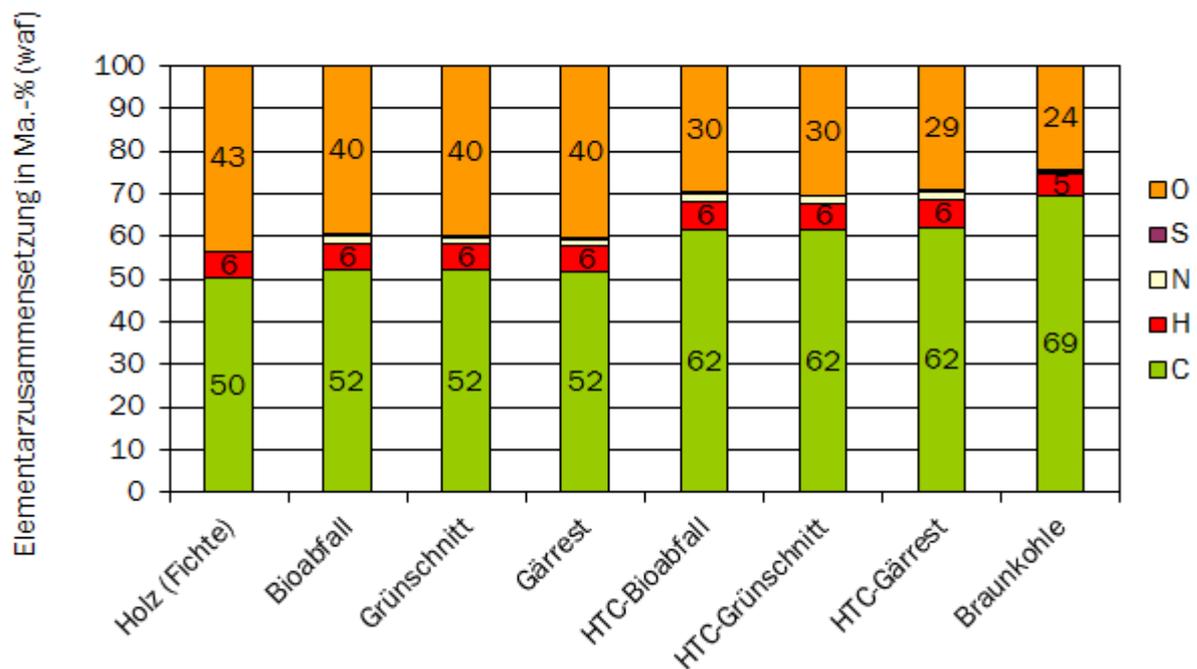


Abbildung II-4: Übersicht über die mittlere Elementarzusammensetzung der HTC-Kohle von Grünschnitt, Bioabfall und Gärrest; wasser- und aschefrei (Clemens u.a. 2013, S. 244).

AP 3 Anlagenvorplanung

a. Zielstellung

Ziel des Arbeitspaketes war die Investitionsentscheidung der HWS und die Vorbereitung der Ausschreibungsunterlagen. Entsprechend dem Meilenstein 1 sollte die Errichtung der HTC-Anlage beauftragt werden wenn die dort formulierten Kriterien erfüllt werden.

b. Vorgehen und Methodik

Im Rahmen einer Marktrecherche wurden potentielle Anbieter von HTC-Anlagen ermittelt. Diese wurden mit Hilfe eines Fragebogens zum Stand der Anlagenentwicklung befragt. Weiterhin wurden die technischen Anforderungen der HTC-Anlage festgeschrieben, die Ausschreibungsunterlagen vorbereitet und die Ausschreibung durchgeführt.

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurden potentielle Standorte für die HTC-Anlage ermittelt und bewertet. Außerdem wurden potentielle Abnehmer der HTC-Kohle recherchiert und in Vorgesprächen Abnahmemengen und -preise eruiert. Für die HTC-Anlage wurden eine Stoff- und Energiebilanz aufgestellt.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der voran genannten Arbeitsschritte wurde die Vorlage für den Aufsichtsrat der HWS über die Investitionsentscheidung zur Errichtung der HTC-Anlage vorbereitet.

c. Ergebnisse

Beauftragung der Demonstrationsanlage

Folgende in Deutschland angesiedelte Anbieter von HTC-Anlagen konnten im Zuge der Marktrecherche ermittelt werden (Stand 2011):

- Antaco GmbH, Garching / München,
- Artec Biotechnologie GmbH, Bad Königshofen,
- Brinkhege Engineering GmbH, Hilter,
- CS carbonSolutions GmbH, Kleinmachnow,
- Grenol GmbH, Wülfrath,
- Loritus GmbH, München,
- REVATEC GmbH, Geeste,
- SunCoal Industries GmbH, Ludwigsfelde,
- TerraNova Energy GmbH, Düsseldorf.

Fünf Anbieter haben den Fragebogen zu den Themen Stand der Anlagenentwicklung, Anlagendesgin, Genehmigungsverfahren und Wirtschaftlichkeit vollständig beantwortet. Zwei Anbieter haben abgesagt. Nach Auswertung der übersandten Fragebögen wurden die Anbieter aufgefordert, ein verbindliches Angebot für die Lieferung einer HTC-Anlage mit einer Jahreskapazität von 2.500 Mg Biomasse (Input) abzugeben. Insgesamt haben drei Anbieter ein Angebot abgegeben. Die HWS hat sich nach gründlicher

Prüfung und Auswertung der abgegebenen Angebote für das Angebot der HTC-Anlage „Art coal 3000k“ der Artec Biotechnologie GmbH (Artec) aus Bad Königshofen entschieden und auf der Grundlage entsprechender Gremienbeschlüsse den Auftrag zur Errichtung der HTC-Demonstrationsanlage am 11.07.2012 an die Artec vergeben. Damit wurde der Meilenstein 1 des Projektes erreicht. Die HWS wird als Bauherr eine Demonstrationsanlage zur Hydrothermalen Carbonisierung errichten und diese im Hinblick auf Prozess- und Produktoptimierung betreiben.

Anlagentechnologie

Die HTC-Anlage der Artec besteht aus einem Schredder zum Nasszerkleinern der angelieferten Biomasse, einem Vorlagebehälter zur Zwischenspeicherung der wässrigen Biomassesuspension, einem kontinuierlich arbeitenden Rohrreaktor, einer Wendelsiebpresse zur mechanischen Entwässerung und einem Tellerrockner zur thermischen Trocknung der HTC-Kohle. Der Rohrreaktor ist aus mehreren vertikal liegenden, in Reihe geschalteten Rohrschlangen aufgebaut und als Doppelrohr ausgeführt. Im Innenrohr findet die hydrothermale Umwandlung der Biomasse statt. Der Reaktormantel wird mit Thermoöl durchströmt und dient der gezielten Temperierung des Reaktorinnenrohres. Der Reaktormantel ist entsprechend den Reaktorzonen Erwärmung, HTC-Reaktion und Abkühlung in einzelne Abschnitte unterteilt. Über den Thermoölkreislauf erfolgt die Wärmerückführung.

Die Biomasse wird in einem mit Schubboden ausgerüsteten 30-m³-Container angeliefert. Der Container dient gleichzeitig als Bunker für die Biomasse. Von dort wird die Biomasse automatisch über ein Förderband in die Eintragschnecke des Schredders gefördert, mit Wasser vermischt, zerkleinert und in den Vorlagebehälter gepumpt. Die wässrige Biomassesuspension wird durch einen hydraulisch angetriebenen Kolben getaktet in den Rohrreaktor gepresst. Innerhalb des Rohrreaktors wird die Biomassesuspension kontinuierlich durch ein mechanisches Fördersystem durch den Reaktor gefördert, um Verstopfungen zu vermeiden. Die Biomasse durchläuft aufeinanderfolgend die Reaktorzonen Erwärmung, HTC-Reaktion und Abkühlung. Nach einer Verweilzeit von mehreren Stunden verlässt die HTC-Kohle den Reaktor über eine Austragsschleuse und wird in der Schneckenpresse mechanisch entwässert. Das abgetrennte Prozesswasser wird in den Vorlagebehälter am Anfang der Anlage zurückgeführt und mit neuer Biomasse vermischt. Die entwässerte HTC-Kohle wird im Trockner thermisch getrocknet.

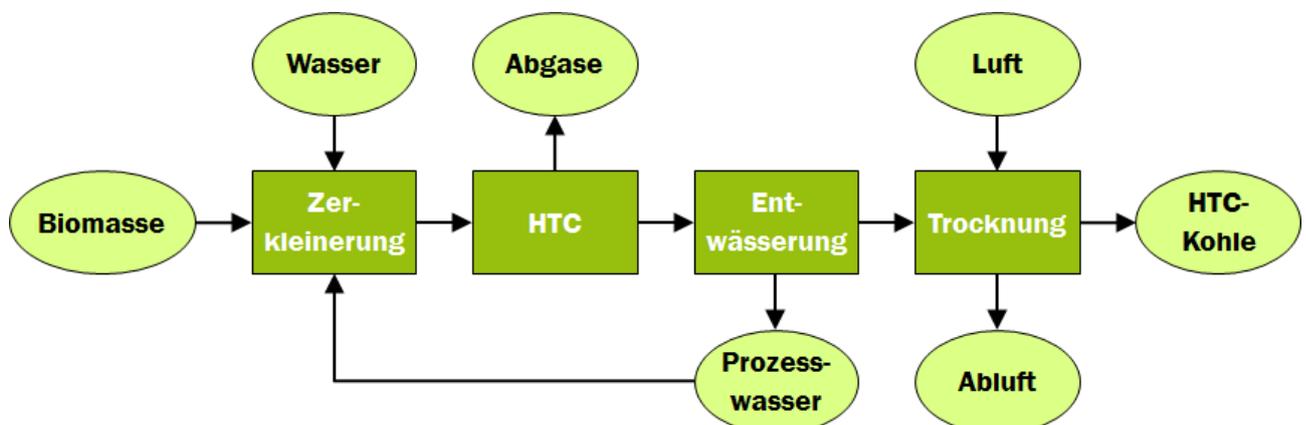


Abbildung II-5: Prozesskette der HTC-Anlage Halle.

Stoff- und Energiebilanz HTC-Anlage

Auf der Grundlage der Ergebnisse der HTC-Laborversuche sowie der Anlagendokumentation der Artec wurden die Stoff- und Energiebilanz der HTC-Anlage ermittelt. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Energiebilanz wird auf den Brennwert der trockenen Biomasse bzw. HTC-Kohle bezogen.
- Die eingesetzte Biomasse hat einen Wassergehalt von 50 Ma.-%.
- Die Jahresvolllaststunden betragen 6.526 h/a.
- Die mittlere Verweilzeit im Reaktor beträgt 5 h.
- Die HTC findet bei einer Temperatur von 210 °C statt.
- Die Massenausbeute für die HTC-Kohle beträgt 80 Ma.-%.
- Die HTC-Kohle wird auf einen Trockensubstanzgehalt (TS-Gehalt) von 40 Ma.-% mechanisch entwässert und anschließend auf einen TS-Gehalt 90 Ma.-% thermisch getrocknet.
- 10 % der auf den Brennwert bezogenen, chemisch gebundenen Energie der Biomasse werden bei der HTC als Wärme frei.
- Die Wärme wird prozessintern zurückgewonnen. Die Wärmerückgewinnungsraten betragen 80 % bis zu einem Temperaturniveau von 210 °C und 60 % bis zu einem Temperaturniveau von 70 °C.
- Wärmeverluste über die Reaktor- und Behälterwände wurden im Rahmen der Wärmerückgewinnungsraten berücksichtigt.
- Es sind Verbraucher mit einer elektrischen Leistung von insgesamt 60 kW installiert. Der Gleichzeitigkeitsfaktor beträgt 0,7.

Tabelle II-6 stellt die Stoff- und Energiebilanz der HTC-Anlage für die HTC des kommunalen Grünschnittes dar. Demnach werden 2.500 Mg_{0s} Biomasse (TS-Gehalt 50 Ma.-%) zu 1.111 Mg_{0s} HTC-Kohle mit einem TS-Gehalt von 90 Ma.-% umgewandelt. Zusätzlich fallen 125 Mg Abgas und 1.264 Mg Brüden an, welche die Anlage über die Trocknung verlassen. In der HTC-Anlage Halle erfolgt die mechanische Entwässerung der HTC-Kohle mittels einer einfachen Schneckenpresse. Für die Stoff- und Energiebilanz wurde eine Entwässerung auf einen TS-Gehalt von 40 Ma.-% unterstellt. Das abgetrennte Prozesswasser wird zum Anmaischen neuer Biomasse in den Vorlagebehälter am Anfang der Anlage zurückgeführt, reicht aber nicht aus, um den gewünschten TS-Gehalt im Reaktor einzustellen. Die HTC-Anlage benötigt zusätzlich 125 Mg Frischwasser pro Jahr.

Die HTC-Anlage benötigt 274.092 kWh/a elektrische Energie und 957.323 kWh/a thermische Energie. 38 % der thermischen Energie (365.179 kWh/a) werden für das Aufheizen der Biomasse und den HTC-Prozess benötigt. Der überwiegende Teil der Prozesswärme (592.143 kWh/a) wird für die thermische Trocknung der HTC-Kohle benötigt. Wie oben beschrieben, wird die HTC-Kohle mittels einer einfachen Schneckenpresse mechanisch entwässert. Durch die Installation einer besseren Entwässerungstechnologie (z.B. Filterpresse) besteht ein deutliches Optimierungspotential. Da am Standort der Demonstrationsanlage aber genügend Abwärme der Deponiegas-BHKWs zur Verfügung steht, wurde auf eine effizientere Entwässerungstechnologie, die wiederum mit höheren Investitionskosten verbunden ist,

verzichtet. Insgesamt beträgt der energetische Wirkungsgrad der HTC-Anlage 72 % (Verhältnis der chemisch gebundenen Energie der HTC-Kohle zur Summe aus chemisch gebundener Energie der Biomasse und zugeführter elektrischer und thermischer Energie).

Tabelle II-6: Stoff- und Energiebilanz der HTC-Anlage mit einer Jahreskapazität von 2.500 Mg_{os}/a.

Massenbilanz				Energiebilanz		
Stoff	Einheit	Menge	Energie	Einheit	Menge	
HTC mit Entwässerung und Trocknung						
Eingang	Grünschnitt	Mg _{os} /a	2.500	Grünschnitt	kWh/a	5.048.044
	TS-Gehalt	Ma.-%	50			
	Wasser	Mg _{os} /a	125			
				elektrische Energie	kWh/a	274.092
				thermische Energie	kWh/a	957.323
Ausgang	HTC-Kohle	Mg _{os} /a	1.111	HTC-Kohle	kWh/a	4.543.239
	TS-Gehalt	Ma.-%	90			
	Abgas	Mg _{os} /a	125			
	Brüden	Mg _{os} /a	1.389			

Standortwahl

Im Rahmen einer Bachelor-Arbeit „Hydrothermale Carbonisierung – eine anlagenbezogene Standortuntersuchung“, eingereicht an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Naturwissenschaftliche Fakultät III, Institut für Geowissenschaften, wurden die Standortanforderungen nach den Faktoren Roh- und Hilfsstoffe, Flächenverfügbarkeit, Energieversorgung und genehmigungsseitige Anforderungen bewertet und der Vorschlag für den Standort auf dem Deponiegelände der Abfallwirtschaft GmbH Halle-Lochau (AWH) in unmittelbarer Nähe eines Deponiegas-BHKWs unterbreitet. Die HWS hat sich nach eingehender Prüfung für den vorgeschlagenen Standort entschieden. Die Deponiegasverwertungsanlage befindet sich im Eigentum der AWH, die wie die HWS ein Unternehmen der Stadtwerke Halle ist. Der in der Anlage produzierte Strom wird in das Stromnetz eingespeist, die anfallende Wärmeenergie wurde bis zur Errichtung der HTC-Anlage ungenutzt in die Umwelt abgeleitet. Durch die Installation zweier Abgaswärmetauscher und eines Thermoölkreislaufes ist es möglich, die HTC-Anlage mit der notwendigen Prozesswärme zu versorgen.

Ursprünglich handelt es sich bei diesem Standort um einen Tagebau, in dem von 1901 bis 1973 Braunkohle abgebaut wurde. Ab 1976 erfolgte der Deponiebetrieb, der ab 1990 durch die AWH fortgesetzt wurde. Die Deponie wurde den Anforderungen gemäß ständig ertüchtigt, so auch mit einer Deponiegasfassung, und befindet sich nunmehr seit dem 01.06.2005 in der Stilllegungsphase. Grundstückseigentümer der Deponie ist die Lausitzer- und Mitteldeutsche Bergbauverwaltungsgesellschaft (LMBV). Für die Anlagenerrichtung wurde am 21.12.2012 ein entsprechender Pachtvertrag geschlossen.



Abbildung II-6: Deponiegas-BHKW Nord auf dem Deponiegelände der Abfallwirtschaft GmbH Halle-Lochau.

Potentielle Abnehmer der HTC-Kohle

Trotz intensiver Bemühungen der Projektpartner und mehrerer Gespräche mit Betreibern von Braunkohlekraftwerken und Biomasseheizkraftwerken, konnte kein verbindlicher Abnahmevertrag für die HTC-Kohle geschlossen werden. Auf der Grundlage der in *AP 2 HTC-Laboruntersuchungen* ermittelten, chemischen und brennstofftechnischen Parameter, kann die HTC-Kohle aber aus technischer Sicht nach Einschätzung der Betreiber in den Kraftwerken mitverbrannt werden. Unabhängig davon haben die Betreiber als Voraussetzung für verbindliche Verträge und für die Festlegung von Preisen vorab die Lieferung von mehreren Tonnen HTC-Kohle gefordert, um die HTC-Kohle in ihren Anlagen zu testen. Diese Forderung konnte im Vorfeld der Errichtung und des Betriebs der HTC-Anlage nicht erfüllt und somit kein Abnahmevertrag geschlossen werden.

Vor dem Hintergrund, keinen Abnahmevertrag gesichert zu haben, und des Projektzieles, einen Verwertungsweg für die HTC-Kohle abseits der Mitverbrennung in Großkraftwerken zu etablieren, planen die Stadtwerke Halle eine eigene Feuerungsanlage (>100 kW) für HTC-Kohle zu errichten. Die Feuerungsanlage soll einen alten Heizölkessel ersetzen und ein Betriebsgebäude am Standort der Deponie Halle-Lochau mit Wärme versorgen. Damit wäre es den Stadtwerken Halle möglich, sowohl die Bereitstellung als auch die energetische Nutzung der HTC-Kohle an einem Standort zu demonstrieren. Hierfür konnte bereits ein Feuerungsanlagenhersteller gebunden werden, der beabsichtigt, seine Feuerungsanlage für die Verbrennung der HTC-Kohle zu optimieren. Die Optimierung und Errichtung einer Feuerungsanlage für HTC-Kohle ist Bestandteil des Forschungsprojektes *„HTChem – Spitzencluster BioEconomy: TG4, Bioraffinerie zur integrierten hydrothermalen Produktion von Brennstoff sowie der Grundchemikalien*

Phenol und Furan aus Biomasse (BMBF, 11/2014 – 09/2017)“, welches erfolgreich eingeworben werden konnte und sich an das vorliegende Projekt anschließt.

Weiterhin hat die HWS Anfragen mehrerer Universitäten und Forschungseinrichtungen zur Bereitstellung von HTC-Kohle für Versuche zur bodenbezogenen Anwendungen erhalten. Obwohl diese Nutzungsoption nicht Bestandteil dieses Forschungsprojektes ist, bietet sie perspektivisch für die HWS, neben dem Einsatz im Energiesektor, einen weiteren Vermarktungsweg der HTC-Kohle.

AP 4 Errichtung und Betrieb der HTC-Anlage

a. Zielstellung

Ziel des Arbeitspaketes 4 war die Errichtung und das Erreichen eines stabilen Betriebes der HTC-Anlage mit den Materialfraktionen Grünschnitt, Bioabfall sowie Gärrest als Teil der bestehenden Verwertungslinien in der HWS. Die HWS sollte nach der Inbetriebnahme der Anlage, entsprechend den Festlegungen des Liefervertrages, den Anlagenbetrieb übernehmen.

b. Vorgehen und Methodik

Die HWS koordinierte in ihrer Funktion als Bauherr und Auftraggeber der Anlage die Arbeiten im Arbeitspaket 4 und die Abstimmung zwischen allen Beteiligten.

c. Ergebnisse

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, hat die HWS den Auftrag zur Errichtung der HTC-Demonstrationsanlage am 11.07.2012 an die Artec Biotechnologie GmbH vergeben. Die Auftragsbestätigung seitens der Artec erfolgte am 16.07.2012.

Am 19.07.2012 fand der Kick-Off-Termin für die Anlagenerrichtung statt. Die Artec hat eine detaillierte Zeitplanung für die Umsetzung der einzelnen Baugruppen dieser Anlage in eine technische Gesamtlösung vorgelegt. Mit der Erstellung der Genehmigung für die Anlage wurde durch die Artec das Architekturbüro Armin Röder aus Bad Neustadt/Saale beauftragt.

Am 21.08.2012 fand ein Scopingtermin zur Genehmigung der HTC-Anlage im zuständigen Landratsamt Merseburg statt, um die planungsrechtlichen Grundlagen zu klären. Im Ergebnis dieses Treffens und weiterer Gespräche wurde festgestellt, dass für diese Anlage, die genehmigungsrechtlich Nr. 8.8 Sp.2 im Anhang zur 4. BImSchV zuzuordnen wäre, eine Genehmigung nach BImSchG nicht erforderlich ist, da der beantragte Mengendurchsatz die Schwelle zur Genehmigungsbedürftigkeit nicht überschreitet (Input <10 Mg/d). Die Anlage ist damit nach Baurecht zu genehmigen, was auch für den Betrieb der Anlage nach Beendigung des Projektes zutrifft. Davon ausgenommen ist der Einbau der Abgaswärmetauscher in den Abgastrakt des bestehenden Deponiegas-BHKW. Hier musste eine entsprechende Anzeige beim Landesverwaltungsamt Sachsen-Anhalt erfolgen, weil es sich um einen Eingriff in die nach § 4 BImSchG genehmigte Anlage handelt.

Der Bauantrag wurde am 29.10.2012 beim Bauordnungsamt eingereicht und am 26.04.2013 hat das Bauordnungsamt des Landkreises Saalekreis der HWS die Baugenehmigung erteilt.

Die Anzeige über den Einbau der Abgaswärmetauscher wurde am 19.12.2012 durch die AWH als Betreiber des Deponiegas-BHKW beim Landesverwaltungsamt Sachsen-Anhalt eingereicht. Die Behörde hat mit Schreiben vom 08.02.2013 einen Bescheid über die ordnungsgemäße Anzeige erlassen und entschieden, dass die angezeigte Änderung keiner Genehmigung nach BImSchG bedarf.

Für die Auslegung der Vorzerkleinerung der Biomasse wurden beim Hersteller Versuche mit Substratproben der HWS durchgeführt, wodurch diese Baugruppe der Anlage weiter spezifiziert werden konnte.

Parallel dazu wurde der HTC-Reaktor gefertigt sowie das Engineering für den Thermoölkreislauf zur Einbindung der Abgaswärmetauscher begonnen.

Auf der Grundlage einer vom Landratsamt vor dem 26.04.2013 ausgefertigten Teilbaugenehmigung hat die HWS die Bauleistungen zur Herrichtung der Fläche für das Aufstellen der Anlagenmodule ausgeschrieben und in der 18. Kalenderwoche 2013 abgeschlossen. Bis zur 26. Kalenderwoche waren die Abgaswärmetauscher in den bestehenden Abgastrakt eingebunden, die Zerkleinerungseinheit, der Reaktorcontainer und der Peripheriecontainer am Anlagenstandort aufgestellt und installiert. Der Trocknungscontainer wurde in der 29. Kalenderwoche geliefert. Die vollständige Verrohrung aller Baugruppen sowie zum Peripheriecontainer und zu den Abgaswärmetauschern war in der 34. Kalenderwoche abgeschlossen. Bereits zu diesem Zeitpunkt zeigten sich erste Abweichungen zum geplanten Zeitplan, was der Komplexität des Verfahrens geschuldet ist.



Abbildung II-7: Montage Abgaswärmetauscher.

Am 28.08.2013 kam es bei der ersten Warminbetriebnahme des Thermoölkreislaufes zu einem Schadensfall an einem der beiden Abgaswärmetauscher, die letztendlich auch zu einer Notabschaltung des BHKW führte.

Der Abgaswärmetauscher wurde bei der Herstellerfirma repariert und in der 46. Kalenderwoche wieder eingebaut. Bei der anschließenden Druckprüfung wurde eine weitere Undichtigkeit an dem zweiten Ag-

gregat festgestellt. Beide Aggregate wurden ausgebaut und eine Neulieferung beim Hersteller veranlasst.

Die Schadensursache konnte innerhalb der Projektlaufzeit nicht eindeutig geklärt werden. Dem Zulieferer wurden vor der Auftragsvergabe Analysen der Abgaszusammensetzung als Grundlage für die Auslegung der Wärmetauscher übermittelt. Unmittelbar nach dem Schadensfall wurde eine erneute Abgasanalyse vorgenommen, wobei es keine signifikante Veränderung der Werte gab. Der Zulieferer zeigte sich in der Ursachenforschung und bei der Schadensbehebung leider nur wenig kooperativ. Der Artec Biotechnologie GmbH entstand ein beträchtlicher wirtschaftlicher Schaden.

Nach Einbindung neuer Abgaswärmetauscher am 07. und 08.01.2014 konnte die Warminbetriebnahme der Anlage nach 5 Monaten Unterbrechung fortgesetzt werden. Die Anlagenparameter (Druck und Temperatur) wurden erreicht, konnten aber über einen längeren Zeitraum nicht stabilisiert werden, weil in unregelmäßigen Abständen und bei unterschiedlichen Ausgangssituationen die Berstscheibe im HTC-Reaktor zerstört wurde. Im Ergebnis der Ursachenforschung (kurzzeitige Druckschwankungen und Druckstöße) wurde die Berstscheibe in Abstimmung mit dem TÜV durch zwei Sicherheitsventile ersetzt.

Im weiteren Verlauf des Inbetriebnahmeprozesses kam es dann zu Leckagen am Befüllzylinder der Anlage. Dieser musste am 07.07.2014 ausgebaut und dem Hersteller übergeben werden. Der Hersteller traf die Aussage, dass tiefe Riefen im Kolben die Ursachen für die Undichtigkeit sind. Zunächst sollte eine Überarbeitung erfolgen, letztendlich war jedoch die Neufertigung eines Kolbens erforderlich, so dass erst in der 36. Kalenderwoche die Anlage wieder betriebsbereit gestellt werden konnte.

Nach dem Wiedereinbau des Befüllzylinders liefen im Oktober 2014 alle Testläufe darauf hinaus, die Voraussetzungen für die Abnahme der Anlage durch die HWS zu erfüllen. Zu diesen Voraussetzungen gehört ein störungsfreier Betrieb der Anlage über 120 h ohne Stillstandszeiten länger als 6 h und die Produktion von mindestens 6 Mg HTC-Kohle mit einem TS-Gehalt von 90 Ma.-% in dieser Zeit. Die Temperatur im Reaktor muss während der geforderten Dauer in einem Bereich zwischen 198 °C und 220 °C stabil gehalten werden.

Keiner der Tests konnte auch nur annähernd diese Kriterien erfüllen, so dass der Abnahmezeitplan wiederum mehrfach verschoben werden musste.

Zunehmend erwies sich der Antrieb des Fördersystems im HTC-Reaktor als störanfällig. Die erforderliche Öffnung des HTC-Reaktors und seine Spülung machten sichtbar, dass es in den Reaktorrohren zu mineralischen Ablagerungen (Sand) gekommen war. In der Projektgruppe sind verschiedene Überlegungen angestellt worden, die Aufbereitung des Input so zu gestalten, dass noch weniger mineralische Anteile in den HTC-Reaktor eingeführt werden. Konsens besteht darüber, dass Biomasse, wie sie bei der HWS anfällt und mit der Anlage verarbeitet werden soll, immer mineralische Anhaftungen aufweisen wird (vgl. Kapitel *AP 1 Charakterisierung der Einsatzmaterialien*). Dies wurde im Rahmen der Projektlaufzeit schon vor Auftragserteilung an die Artec durch verschiedene Analysen der potentiellen Inputstoffe durch das DBFZ nachgewiesen.



Abbildung II-8: HTC-Anlage Halle.

Trotz immenser Anstrengungen aller Beteiligten und mehrfacher kostenneutraler Verlängerungen des Projektzeitraumes endete das Projekt offiziell am 31.12.2014, ohne dass bis zu diesem Zeitpunkt die Abnahme der Anlage, und damit der Nachweis eines stabilen Dauerbetriebes unter Einhaltung der notwendigen Prozessparameter, erfolgen konnte. Nichtsdestotrotz wurde wiederholt in kürzeren Kampagnen die prinzipielle, technische Funktionalität der Anlage unter Beweis gestellt, indem HTC-Kohle in kleineren Mengen produziert wurde.

Nachdem auch Anfang März 2015 eine Spülung des HTC-Reaktors verstopfungsbedingt wiederholt werden musste, wurden weitere Veränderungen an den Antriebssystemen im HTC-Reaktor vorgenommen.

Außerdem kam es auch zu Verstopfungen im Austragsrohr der mechanischen Presse, die vordergründig auf die häufigen Unterbrechungen im Betriebsprozess und die damit verbundene Austrocknung zurückzuführen waren.

Am 28.05.2015 erfolgte vor Ort die erfolgreiche TÜV-Abnahme der HTC-Anlage Art.coal 3000k. Alle Anstrengungen der Projektpartner und der Artec laufen auch nach Beendigung der Projektlaufzeit darauf hinaus, mit Erreichen eines stabilen Dauerbetriebes der Demonstrationsanlage den Nachweis zu erbringen, dass das HTC-Verfahren in einer technischen Anlage außerhalb des Labormaßstabes umgesetzt werden kann. Im Wissen darum, dass mit dieser Anlage prozess- und anlagentechnisches Neuland betreten wurde, sind die Vertragspartner Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft GmbH und Artec Biotechnologie GmbH immer wieder Kompromisse eingegangen, weil das Projekt zu einem erfolgreichen Ende geführt werden soll.

Abschließend muss attestiert werden, dass die Komplexität des Projektes, insbesondere bei der Errichtung einer Pilotanlage dieser Größenordnung, von allen Beteiligten unterschätzt wurde. Dies betrifft

einerseits die vorgegebene Projektlaufzeit, die mehrfach verlängert werden musste. Andererseits ist der kalkulierte finanzielle Rahmen deutlich überschritten worden. Dies führte in der Konsequenz dazu, dass die Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft GmbH, und damit die Stadtwerke Halle GmbH, deutlich mehr Eigenmittel in das Projekt eingebracht haben als ursprünglich geplant war. Inwieweit sich dies auf zukünftige Forschungsaktivitäten abseits des HTC-Prozesses auswirkt, kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht beantwortet werden, insbesondere da auch nach offiziellem Projektende mit weiterem Aufwand zu rechnen ist.

AP 5 Wissenschaftliche Begleitung des Anlagenbetriebs

a. Zielstellung

Ziele des Arbeitspaketes waren die Ermittlung der realen Stoff- und Energiebilanz der HTC-Anlage und die Unterstützung der Anlagenführung und -optimierung hinsichtlich unterschiedlicher Eingangsmaterialien im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung des Anlagenbetriebes.

b. Vorgehen und Methodik

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung sollten Vor-Ort-Messungen an der Demonstrationsanlage, Beprobungen der Eingangsmaterialien und der Produkte sowie labortechnische Parallelversuche durchgeführt werden.

c. Ergebnisse

Wie oben beschrieben, konnte die HTC-Anlage innerhalb der Projektlaufzeit nicht in den stabilen Dauerbetrieb überführt werden. Demzufolge konnte die geplante wissenschaftliche Begleitung des Anlagenbetriebs nicht durchgeführt werden. Unbenommen davon wurden die Errichtung und die Inbetriebnahme wissenschaftlich begleitet. Hierzu wurden im Rahmen der Inbetriebnahmeversuche mehrmals die Einsatzstoffe, die Suspension im Vorlagebehälter sowie die erzeugten HTC-Kohlen beprobt und analysiert (siehe Tabelle II-7). Weiterhin wurden in Laborversuchen HTC-Kohlen für Untersuchungen im AP 6 *Energetische Nutzung der HTC-Kohlen* hergestellt.

AP 6 Energetische Nutzung der HTC-Kohle

a. Zielstellung

Derzeit sehen viele HTC-Verfahrensentwickler die Mitverbrennung der HTC-Kohle als Braunkohleersatz in Großkraftwerken als geeigneten energetischen Nutzungspfad an. Eine höherwertige Einsatzalternative könnte die Veredelung zu normungsfähigen Energiepellets darstellen, die für den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen (1. BImSchV) geeignet sind. Das Ziel dieses Arbeitspakets lag in der technischen Evaluierung dieser Verwertungspfade sowie der Ableitung der entsprechenden Aufbereitungserfordernisse.

b. Vorgehen und Methodik

Wie oben beschrieben, konnte die HTC-Anlage innerhalb der Projektlaufzeit nicht in den stabilen Betrieb überführt und damit keine ausreichende Menge an HTC-Kohle für die geplanten Pelletier- und Verbrennungsversuche bereitgestellt werden. Um dennoch eine Einschätzung über die Brennstoffqualität und die Eignung der HTC-Kohlen für den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen zu geben, wurden die Stofffraktionen kommunaler Grünschnitt (zwei Proben), Bioabfall und Gärrest (jeweils eine Probe) im Labor hydrothermal carbonisiert. Eine Probe des kommunalen Grünschnittes war frischer Grünschnitt, der direkt vom Sammelplatz der HWS entnommen wurde. Die andere Probe war geschredderter, abgeseibter und bereits mehrere Wochen an der HTC-Anlage gelagerter Grünschnitt (im Folgenden als aufbereiteter Grünschnitt bezeichnet).

Die chemischen und brennstofftechnischen Eigenschaften der Inputmaterialien und der im Labor erzeugten HTC-Kohle sowie einer HTC-Kohle aus der HTC-Anlage Halle (HTC-Kohle Inbetriebnahmeversuch; Inputmaterial: aufbereiteter Grünschnitt) und ein Holzbrennstoff als Vergleichsmaterial wurden analysiert. Die verwendeten Analysemethoden entsprechen den in der DIN EN ISO 17225-1 (DIN EN ISO 17225-1 2014) aufgeführten Referenzen. Zur weiteren Charakterisierung der Brennstoffe und deren Veränderung während des HTC-Prozesses wurde eine simultane thermische Analyse (STA) unter oxidierenden Bedingungen bei einer Heizrate von 5 K pro Minute bis zu einer Endtemperatur von 900 °C an den Brennstoffen durchgeführt. Mit Hilfe dieser Methode werden die Vorgänge der Verbrennung im Labormaßstab abgebildet. Dafür wurden die Brennstoffe auf eine Korngröße von <0,5 mm aufgemahlen. Es wurden jeweils Doppelbestimmungen vorgenommen. Das mit Hilfe der STA erhaltene Thermogramm gilt als charakteristisch für einen Brennstoff und bietet unter anderem die Möglichkeit, einen Vergleich zu anderen Brennstoffen zu ziehen. Die Ergebnisse wurden um STA-Messungen an Kiefernholz, die unter gleichen Bedingungen gemessen wurden, ergänzt. Die Messungen wurden mit einem Gerät der Firma Netzsch (Modell 449 F3 Jupiter), im Folgenden kurz STA genannt, durchgeführt. Die STA erlaubt es, zeitgleich an kleinen Probenmassen (~15 mg) kalorische Effekte und Masseänderungen zu bestimmen. Dadurch können die Messergebnisse direkt miteinander verglichen, Probenmaterial gespart und der messtechnische Aufwand verringert werden. Weiterhin können Hinweise auf die während eines Temperaturprogrammes ablaufenden Reaktionen in einer Probe gewonnen werden. Insbesondere die Beurteilung des temperaturabhängigen Massenverlustes ist hierbei von Interesse.

c. Ergebnisse

Brennstofftechnische Beurteilung

Für die praktische Nutzung von biogenen Festbrennstoffen ist eine Reihe von Merkmalen, die den Verbrennungsprozess in unterschiedlich hohem Ausmaß beeinflussen, von Bedeutung. Dazu gehören die chemische Zusammensetzung sowie die verbrennungstechnischen und physikalisch-mechanischen Eigenschaften des eingesetzten Brennstoffs. Im Kleinfeuerungsbereich dürfen nur die in der 1. BImSchV definierten Regelbrennstoffe eingesetzt werden. Die Eigenschaften von unter Nummer 8 und Nummer 13 aufgeführten nicht-holzartige Pellets sind in der Norm DIN EN ISO 17225-6 (DIN EN ISO 17225-6 2014) festgelegt. Brennstoffe, die mit einem HTC-Verfahren behandelt wurden, sind derzeit noch keine Regelbrennstoffe im Sinne der 1. BImSchV. Darüber hinaus existiert auch noch keine Norm, die die geforderten Qualitätsmerkmale für solche Brennstoffe festlegt. Daher ist der Einsatz von HTC-Kohle im Kleinfeuerungsanlagenbereich nach aktuellem Stand nicht zulässig. Um dennoch eine brennstofftechnische Einordnung der Inputmaterialien und der daraus hergestellten HTC-Kohle vornehmen zu können, wurden dementsprechend die in Tabelle II-7 dargestellten Brennstoffparameter analysiert und miteinander verglichen. Zusätzlich sind auszugsweise normative Anforderungen der DIN EN ISO 17225-6 an Pellets aus halmgutartiger Biomasse, Biomasse von Früchten, aquatischer Biomasse, definierte und undefinierte Mischungen, Klasse B aufgeführt.

Der Aschegehalt der Inputmaterialien ist mit 23,6 bis 50,6 Ma.-% sehr hoch, insbesondere wenn man als Vergleichsgrößen den Aschegehalt von Holz oder die DIN EN ISO 17225-6 heranzieht. Derzeit verfügbare Verbrennungsanlagen im Kleinfeuerungsbereich sind für Brennstoffe mit solch hohen Aschegehalten nicht ausgelegt. Wie im *AP 1 Charakterisierung der Einsatzmaterialien* ausgeführt, wird der hohe Aschegehalt durch anhaftende Erde und Sand verursacht. Für den Einsatz zur Wärmebereitstellung ist daher eine angepasste Feuerungstechnik, mit einem entsprechend leistungsfähigen Ascheausstrag zwingend erforderlich. Durch den hohen Aschegehalt, d.h. mineralische Bestandteile, fällt der Kohlenstoffgehalt im Brennstoff im Vergleich zu Holz gering aus und auch der Anteil flüchtiger Bestandteile ist deutlich herabgesetzt. Hinsichtlich der Elemente Stickstoff, Schwefel, Chlor und Kalium, welche bei der Verbrennung aufgrund ihres potentiell korrosiven beziehungsweise emissionsrelevanten Charakters von Bedeutung sind, zeigt sich ein uneinheitliches Bild. So sind die Stickstoffkonzentrationen der Inputmaterialien gegenüber Holz stark erhöht, liegen jedoch in einem für halmgutartige Brennstoffe typischen Bereich (Kaltschmitt u.a. 2009, S. 343). Dagegen liegen die Schwefelkonzentrationen in drei von vier Fällen über den normativen Anforderungen. Der Chlorgehalt aller Inputmaterialien liegt deutlich über dem von Holz und ist für Bioabfall und Gärrest ebenfalls über dem normativen Wert. Der Kaliumgehalt der Brennstoffe als wichtige Orientierungsgröße bezüglich Feinstaubbildung und Verschlackungsverhalten ist nicht normativ geregelt. Bei allen Inputmaterialien fällt er im Vergleich zu Holz aber sehr hoch aus, was wahrscheinlich nachteilige Auswirkungen auf das Abbrand- und Emissionsverhalten hat. Hinsichtlich nichtholzartiger Biomassen werden im Geltungsbereich der DIN EN ISO 17225-6 zusätzlich Schwermetalle berücksichtigt. Dabei lässt sich feststellen, dass die Grenzwerte der Norm bis auf Cd von mindestens drei der vier Brennstoffe und im Fall von As, Cu, Pb und Ni sogar von allen vier Inputmaterialien überschritten wird. Hauptgrund ist hier die hohe Verunreinigung durch mineralische Anhaftungen, welche sich in den hohen Aschegehalten ausdrücken.

Tabelle II-7: Ergebnisse der brennstofftechnische Analysen der Inputmaterialien, HTC-Kohlen und Holz sowie geforderte Werte entsprechend der DIN EN ISO 17225-6, Klasse B (DIN EN ISO 17225-6 2014).

Brennstoffparameter	Einheit	DIN EN ISO 17225-6, Klasse B	Holzpellelets	Bioabfall	Gärrest	Grünschnitt	Grün-schnitt (aufbereitet)	HTC-Bioabfall	HTC-Gärrest	HTC-Grünschnitt	HTC-Grünschnitt (auf- bereitet)	HTC-Kohle Inbetriebnahme
		Referenz	Inputmaterialien					HTC-Kohlen				
Heizwert (H _U)	MJ/kg (wf)	≥14,5	19,3	16,7	13,6	10,7	14,0	17,4	14,8	13,4	15,2	9,9
Aschegehalt (550 °C)	Ma.-% (wf)	≤10	0,6	23,6	37,5	50,6	35,5	31,6	44,3	47,4	41,2	60,5
Flüchtige Bestandteile	Ma.-% (wf)	-	83,7	58,3	52,5	40,8	48,7	49,1	41,4	38,1	40,4	31,2
C	Ma.-% (wf)	-	52,7	41,1	35,0	30,7	32,7	43,6	39,9	38,1	37,7	25,7
H	Ma.-% (wf)	-	5,35	4,79	4,23	3,11	3,41	4,51	4,28	3,73	3,63	2,55
N	Ma.-% (wf)	≤2,0	0,51	1,81	1,73	1,06	1,55	1,61	1,77	1,17	1,31	0,85
S	Ma.-% (wf)	≤0,2	0,18	0,24	0,24	0,19	0,22	0,28	0,32	0,28	0,24	0,17
O	Ma.-% (wf)	-	40,7	28,5	21,3	14,3	26,6	18,4	9,4	9,3	15,9	10,2
Cl	Ma.-% (wf)	≤0,3	0,005	0,318	0,388	0,079	0,155	0,241	0,224	0,102	0,12	0,019
K	Ma.-% (wf)	-	0,06	1,54	1,39	1,46	1,78	1,16	1,18	1,14	1,15	1,06
As	mg/kg (wf)	≤1	n.n.	1,24	1,86	4,53	3,52	1,62	2,75	2,87	2,92	2,08
Cd	mg/kg (wf)	≤0,5	0,179	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,633	1,09	1,12	0,93	n.n.
Cr	mg/kg (wf)	≤50	1,57	66,5	94,1	44,1	477	75,1	139	156	75,3	331
Cu	mg/kg (wf)	≤20	1,84	23,8	30,3	34,5	32,8	31,5	41,1	33,1	25,4	24,8
Pb	mg/kg (wf)	≤10	1,98	17,2	26,8	49,6	42,4	18,7	37,6	39,4	39,5	43,8
Hg	mg/kg (wf)	≤0,1	0,003	0,059	0,145	0,143	0,163	0,015	0,006	0,015	n.n.	0,146
Ni	mg/kg (wf)	≤10	0,534	21,7	32,1	23,3	203	26,5	47,2	59,6	27,9	107
Zn	mg/kg (wf)	≤100	9,18	96,4	199	175	147	107	294	186	150	483

Ein Vergleich der HTC-Kohlen mit den Inputstoffen zeigt, einerseits, dass durch den HTC-Prozess der Heizwert gesteigert werden konnte, maximal um 2,7 MJ/kg (wf), andererseits, dass, bis auf den Grünschnitt, ein deutlicher Anstieg des Aschegehalts zu verzeichnen war. Im Fall der HTC-Kohle des Inbetriebnahmeversuches der HTC-Anlage beträgt der Aschegehalt sehr hohe 60,5 Ma.-% (wf). Der Heizwert dieser HTC-Kohle liegt bei lediglich 9,9 MJ/kg (wf). Der im Vergleich zu den Inputmaterialien zu verzeichnende Anstieg des Heizwertes geht hauptsächlich auf den Anstieg des Kohlenstoffanteils in den HTC-Kohlen zurück. Weiterhin ist ein Rückgang der flüchtigen Bestandteile zu verzeichnen. Hinsichtlich der Elemente Stickstoff, Schwefel, Chlor und Kalium, welche bei der Verbrennung aufgrund ihres potentiell korrosiven beziehungsweise emissionsrelevanten Charakters von Bedeutung sind, zeigt sich ein uneinheitliches Bild. Der Schwefelgehalt der HTC-Materialien liegt geringfügig über denen der Inputstoffe. Die HTC-Kohlen weisen teilweise einen höheren und teilweise einen niedrigeren Stickstoffgehalt als die Inputmaterialien auf. Dies geht wahrscheinlich auf natürliche Schwankungen des Stickstoffgehalts in den Brennstoffchargen zurück. Die Chlorkonzentration weist in drei von vier Fällen eine Tendenz zu niedrigeren Werten nach dem HTC-Prozess auf. Bezüglich der Kaliumkonzentration sind die größten Veränderungen durch den HTC-Prozess festzustellen. In Abhängigkeit vom Inputmaterial sind hier Minderungen um 2.100 bis 6.300 mg/kg (wf) zu verzeichnen, was auf eine verbesserte Verschlackungsneigung und möglicherweise niedrigere Feinstaubemissionen hindeutet. Allerdings ist diesbezüglich auch der stark erhöhte Aschegehalt zu berücksichtigen. Die betrachteten Schwermetallkonzentrationen werden durch den HTC-Prozess ebenfalls beeinflusst. Hinsichtlich der Quecksilberkonzentration ist ein geringes Absinken bei allen vier Brennstoffen zu erkennen. Bezüglich der übrigen Schwermetalle kommt es tendenziell zu einem Anstieg der Konzentrationen nach dem Durchlaufen des HTC-Prozesses. Die Messergebnisse der Aschegehalte und der Schwermetalle legen nahe, dass es durch den teilweisen Abbau der organischen Bestandteile zu einer relativen Anreicherung der anorganischen Bestandteile, einschließlich der Schwermetalle, kommt. Eine Ausnahme bildet die Charge des aufbereiteten Grünschnitts, bei dem teilweise auch starke Konzentrationsminderungen gemessen wurden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass hier Inhomogenitäten der chemischen Zusammensetzung großer Brennstoffchargen zu diesem Ergebnis beitragen können. Die Anforderungen der DIN EN ISO 17225-6 hinsichtlich der Schwermetallkonzentrationen können bis auf Quecksilber nicht eingehalten werden.

Es ist generell schwierig, einzig von den chemischen Analysen auf das Verhalten bei der Verbrennung zu schließen, da die Matrix der Reaktionsbedingungen (z.B. Temperatur, Vermischung der Brenngase, Konzentration beteiligter Reaktionspartner, Sauerstoffzufuhr, Verbleib in der heißen Zone) das Verbrennungsverhalten stark mitbestimmen. Insbesondere neue und stark veränderte Brennstoffe entziehen sich einer umfassenden Interpretation. Besonders die Feinstaubbildung und das Verschlackungsverhalten lassen sich nur bedingt beurteilen und betonen die Bedeutung von Verbrennungsversuchen in realen Feuerungen. Generell ist die Verringerung der Aschefracht durch entsprechende Vorbehandlung oder geeignete Klassifizierung (siehe Kapitel AP1) erforderlich, um den Einsatz als Brennstoff zu ermöglichen bzw. zu erleichtern.

Thermochemisches Zersetzungsverhalten

Um das thermochemische Zersetzungsverhalten unter oxidierenden Bedingungen trotz fehlender Mengen an HTC-Kohle beurteilen zu können, ist es möglich, mit Hilfe der STA den Verbrennungsprozess im kleinen Maßstab darzustellen. So liefert zum Beispiel die differenzierte Kurve der Thermogravimetrie (DTG) Aussagen über die Geschwindigkeit (gemessen in Ma.-%/min) der thermischen Zersetzung von verschiedenen Biomassefraktionen und den Temperaturbereich, in dem diese stattfinden. Für holzartige Biomassen wurden in einigen Studien die in der Kurve auftretenden, charakteristischen Peaks als

die Zersetzung von Cellulosen und Hemicellulosen (im Bereich 300 – 330 °C) bzw. die Zersetzung des restlichen in der Biomasse enthaltenen Lignins (im Bereich 400 – 420 °C), der Anteil der flüchtigen Bestandteile und der Anteil nicht thermisch zersetzter Bestandteile (Asche, Kohle) interpretiert (Amutio u.a. 2012), (Munir u.a. 2009), (Vamvuka u. Sfakiotakis 2011). Für holzartige Biomassen wird in der Regel ein erster Peak (P1) im Temperaturbereich von 300 – 330 °C beobachtet und ein zweiter Peak (P2) im Bereich von 400 – 420 °C. Mit welcher Geschwindigkeit die thermische Zersetzung an den jeweiligen Peaks stattfindet, ist durch die jeweilige Masseverlustrate (R) indiziert. An der Spitze des Peaks ist die Masseverlustrate maximal (R_{\max}). Zusätzlich gibt die STA Auskunft über die freigesetzte bzw. benötigte Energie für die thermischen Zersetzungsprozesse. Die Kurve der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) lässt sich dabei ähnlich lesen wie die TG-Kurve bezüglich der Peaks (P), wobei im Falle der DSC-Kurve R den jeweiligen Wärmestrom pro umgewandelter Masse (mW/mg) darstellt, der exotherme oder endotherme Prozesse indiziert.

Die Ergebnisse der STA-Messungen und der daraus gewonnenen charakteristischen Merkmale sind in der Abbildung II-9 bis Abbildung II-12 dargestellt. Die Thermogramme der Inputmaterialien sind jeweils auf der linken Seite, die der daraus gewonnenen HTC-Kohlen auf der rechten Seite abgebildet. Weiterhin sind die Zahlenwerte der Messungen zusätzlich in tabellarischer Form, wie auch die Thermogramme des Holzes und der HTC-Kohle HWS im Anhang aufgeführt.

Die TG-Kurven aller Inputmaterialien weisen bis zu einer Temperatur von 120 °C Masseverluste auf, die vorrangig auf die Verdunstung und Verdampfung von freiem und in Zellstrukturen gebundenem Wasser zurückgehen. Ab diesem Temperaturbereich beginnen erste thermochemische Zersetzungsreaktionen. Die negativen Werte des DSC-Signals zeigen an, dass die Zersetzungsreaktionen exotherm verlaufen. Weiterhin ist ein rapider Masseverlust (TG-Kurve) erkennbar. Der Beginn dieser Oxidationsreaktionen bzw. die Temperatur des Onset (T_{Onset}) des ersten Peaks der TG-Kurve wird in diesem Fall als Zündtemperatur definiert. Diese liegen bei den Inputmaterialien zwischen 254,6 und 270 °C. Der Masseverlust läuft für die Bioabfall- und die Gärrestprobe zweistufig ab. Die jeweils gemittelten DTG-Maximalwerte liegen bei Temperaturen im Bereich 281,2 bzw. 275,7 °C und 423,1 bzw. 420,2 °C. Die Maxima der Energiefreisetzung (vgl. Verlauf der DSC-Kurven) liegen ebenfalls in diesem Temperaturbereich. Ab den zweiten Maxima geht die DSC-Kurve fast auf den Wert Null zurück. Weiterhin sinkt bis zum Erreichen der Endtemperatur von 900 °C die Probemasse nur noch geringfügig ab. Woran erkennbar ist, dass bereits ein Großteil der Probemasse zersetzt und oxidiert worden ist. Die beiden Grünschnittproben zeigen demgegenüber ein thermochemisches Zersetzungsverhalten, welches nicht durch zwei ausgeprägte, nacheinander folgende Zersetzungsschritte charakterisiert ist. Hier erfolgt nach der Trocknung der Proben ebenfalls eine rapide Zersetzung eines Teils der Probe. Auch ist der Temperaturbereich, in dem dies stattfindet, ähnlich (291,2 und 275,2 °C). Jedoch ist ein zweiter ausgeprägter Zersetzungsschritt nicht feststellbar. Beim aufbereiteten Grünschnitt erfolgt der erste Schritt sehr schnell, was an der hohen Masseverlustrate R_{\max} von durchschnittlich -30 Ma.-%/min erkennbar ist. Während R_{\max} des nicht aufbereiteten Grünschnitts etwa um Faktor 10 kleiner ausfällt. Ab einer Temperatur von 300 °C verläuft die thermochemische Zersetzung beider Grünschnittproben bis zu einer Temperatur von etwa 500 °C relativ konstant, wobei teilweise kleinere Peaks auftraten. Bei höheren Temperaturen nimmt die Masse nur noch geringfügig ab. Der nach Durchlaufen des Temperaturprogramms zurückbleibende Proberest beträgt zwischen 22,3 und 41,1 Ma.-% der zu Beginn der Messung vorliegenden Masse. Eng damit verbunden ist der Masseverlust des im Temperaturbereich von 120 bis 900 °C thermochemisch zersetzten Probematerials. Dieser liegt je nach Brennstoff zwischen 53,5 und 72,0 Ma.-% der Ausgangsmasse, wobei die beiden Grünschnittproben aufgrund ihrer höheren Restmasse niedrigere Werte aufweisen.

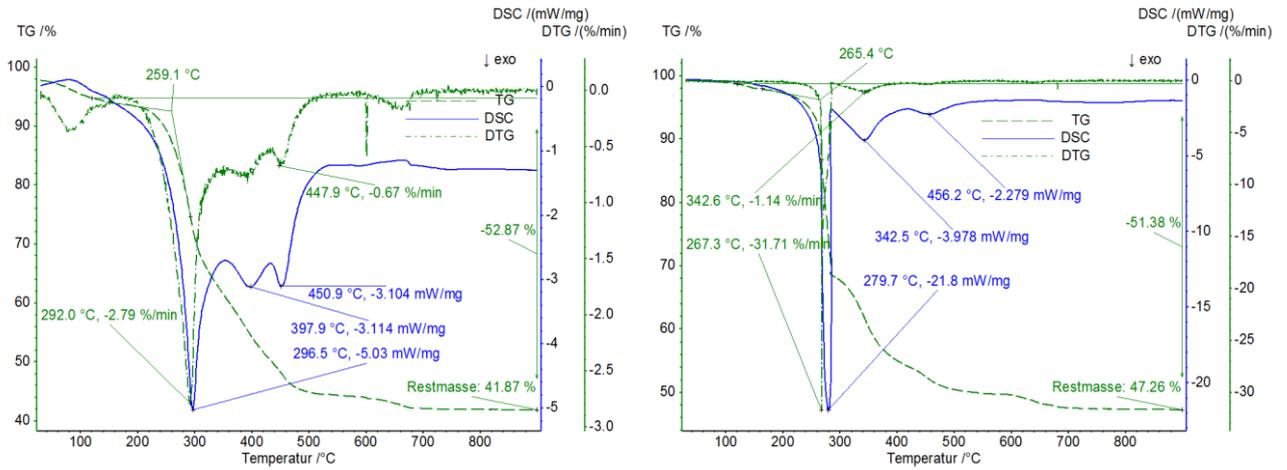


Abbildung II-9: Vergleich der Thermogramme von Grünschnitt (links) und dessen HTC-Kohle (rechts).

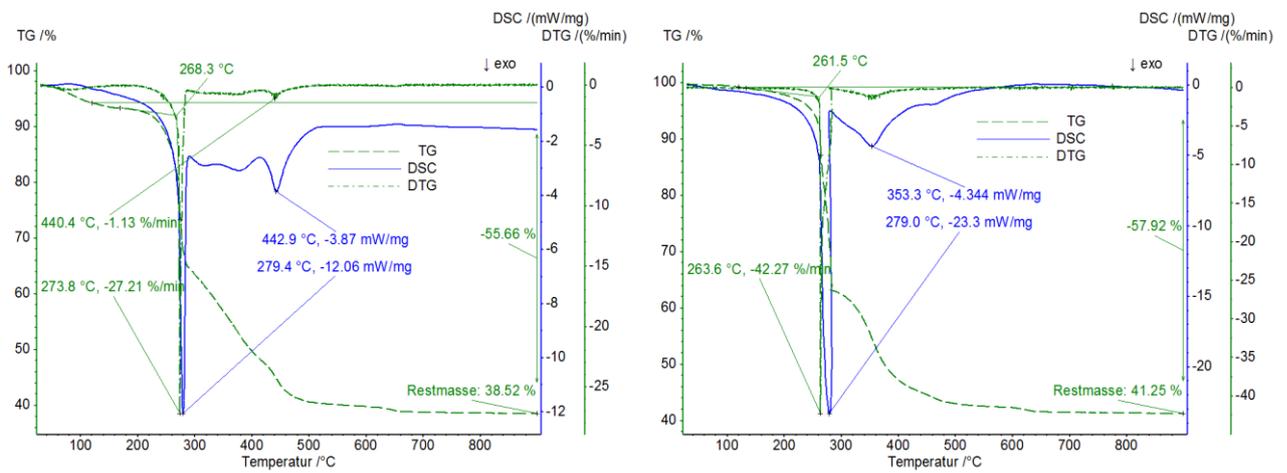


Abbildung II-10: Vergleich der Thermogramme von Grünschnitt (aufbereitet) (links) und dessen HTC-Kohle 2 (rechts).

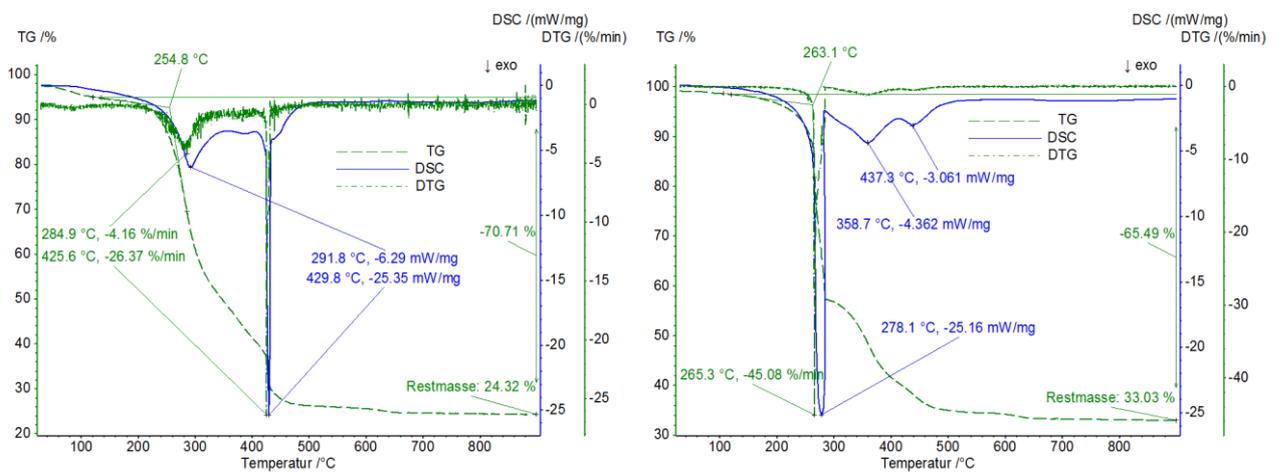


Abbildung II-11: Vergleich der Thermogramme von Bioabfall (links) und dessen HTC-Kohle (rechts).

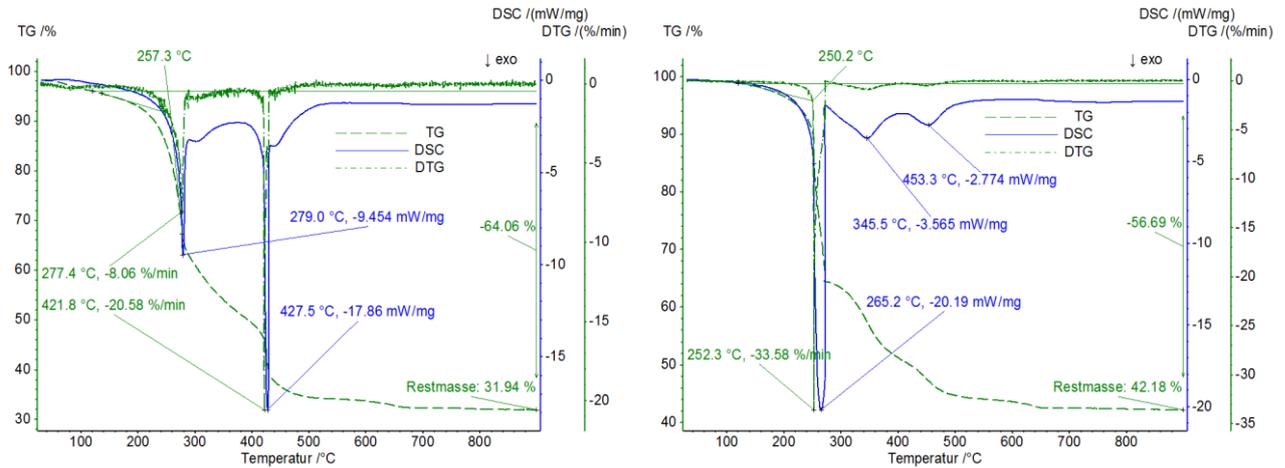


Abbildung II-12: Vergleich der Thermogramme von Gärräst (links) und dessen HTC-Kohle (rechts).

Beim Vergleich der HTC-Kohlen mit den Inputmaterialien fällt auf, dass das thermochemische Zersetzungsverhalten nun bei allen Brennstoffen durch einen ausgeprägten einstufigen Prozess charakterisiert werden kann. Die, insbesondere bei Bioabfall und Gärräst festgestellte, zweite Stufe bei etwa 420 °C ist nach dem HTC-Prozess nicht mehr vorhanden. Vielmehr ist bei allen Brennstoffen nun ein einzelner rapider Masseverlust mit Peaktemperaturen zwischen 253,7 bis 270,4 °C im Bereich bis 300 °C zu verzeichnen, dessen Intensivität an den hohen maximalen Masseverlustraten (R_{max}) von -32,5 bis -48,3 Ma./min zu erkennen ist. Dieser Masseverlust wird von einer ebenfalls starken exothermen Reaktion begleitet. Weiterhin fallen die beiden kleineren DSC-Peaks bei etwa 350 und 450 °C auf, die der ersten Reaktion folgen und zur Wärmeentstehung beitragen. Offenbar erfolgt nach der heftigen ersten Reaktion ein relativ gleichmäßiger Ausbrand der verbleibenden Brennstoffbestandteile. Wie auch schon die chemische Analyse der Brennstoffe (Aschegehalt) indizierte, sind im Vergleich zu den Inputstoffen die Restmassen nach Ende des Versuchsprogramms höher. Dementsprechend ist in den meisten Fällen auch der Anteil der im Temperaturbereich 120 bis 900 °C thermochemisch zersetzbaren Bestandteile geringer. Die Zündtemperaturen liegen in einem Temperaturbereich von 251,5 bis 268,2 °C und scheinen durch den HTC-Prozess nicht beeinflusst zu werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die Inputmaterialien und die durch Hydrothermale Carbonisierung behandelten Brennstoffe in ihrem thermochemischen Zersetzungsverhalten deutlich unterscheiden. Durch die HTC kommt es zu einer Angleichung des thermochemischen Verhaltens ursprünglich verschiedener Biomassen. Dies geht wahrscheinlich auf die im HTC-Prozess stattfindenden Depolymerisationsvorgänge zurück. Eine Aussage, welche Biomassebestandteile dafür konkret verantwortlich sind, kann an dieser Stelle nicht getroffen werden. Weiterführende Untersuchungen sollen jedoch die Bestimmung der Hemicellulose-, Cellulose- und Ligninbestandteile vor und nach der HTC mit einbeziehen, um ein detailliertes Bild der ablaufenden Vorgänge zu entwerfen. Für den praktischen Betrieb könnten die Ergebnisse so interpretiert werden, dass bezüglich des thermochemischen Verhaltens HTC-Brennstoffe unabhängig von Ihrem Ursprung als gleich angesehen werden können. Das Verfahren der HTC ist damit geeignet, unterschiedliche Biomasse in einen einheitlichen Brennstoff zu überführen. Dies muss jedoch noch durch umfangreiche Verbrennungsversuche an marktüblichen Verbrennungsanlagen bestätigt werden.

AP 7 Konzeptbewertung

Inhalt des Arbeitspaketes ist die Bewertung der integrierten Verwertungsstrategie für kommunale Biomasse. Die Verwertungsstrategie zielt auf die Bereitstellung biogener Festbrennstoffe aus kommunalen Reststoffen mit Hilfe der Hydrothermalen Carbonisierung (HTC). Das Produkt der HTC ist HTC-Kohle, die im Bereich der Energieversorgung in Konkurrenz zu anderen fossilen und biogenen Brennstoffen steht. Soll sich die HTC-Kohle am Markt behaupten, und damit eine wesentliche Voraussetzung für das Umsetzen der Verwertungsstrategie schaffen, muss die HTC-Kohle sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Vorteile gegenüber den etablierten Brennstoffen bieten. Im Rahmen der ökonomischen und ökologischen Bewertung werden daher sowohl die Herstellung der HTC-Kohle als auch deren Nutzung zur Bereitstellung von Wärme bewertet.

Im Rahmen der ökonomischen Bewertung der Verwertungsstrategie werden die Gesteungskosten der HTC-Kohle berechnet und den Kosten der konkurrierenden Brennstoffe gegenübergestellt. Die Nutzungspfade verschiedener Brennstoffe verursachen unterschiedlich hohe Folgekosten. Daher erfolgt im Anschluss an die Bewertung der Gesteungskosten der HTC-Kohle eine ökonomische Bewertung des gesamten Nutzungspfades hin zur Bereitstellung von Wärme. Abschließend wird der gesamte Nutzungspfad bis zur Bereitstellung von Wärme an Hand der Treibhausgasemissionen ökologisch bewertet.

Die Ergebnisse des *AP 2 HTC-Laboruntersuchungen* und des *AP 6 Energetische Nutzung der HTC-Kohlen* haben gezeigt, dass prinzipiell alle drei biogenen Reststoffströme als Einsatzmaterial für die HTC geeignet sind. Die HTC wandelt dabei die drei verschiedenen Biomassen in HTC-Kohlen um, die bei der Verbrennung ein gleiches thermochemisches Zersetzungsverhalten aufweisen. Der Bioabfall wird aber durch die Verwertung in einer Biogasanlage bereits heute einer etablierten Verwertung zugeführt, die mit der Bereitstellung von Energie verbunden ist. Dagegen ist die Kompostierung des Grünschnittes mit der Freisetzung klimaschädlicher Gase verbunden, ohne dass die chemisch gebundene Energie genutzt wird. Der aus der Vergärung des Bioabfalls stammende Gärrest, und damit dessen HTC-Kohle, besitzt im Mittel die höchsten Aschegehalte und damit die schlechteste Qualität, was den Einsatz in Feuerungsanlagen erschwert. Aus diesen Gründen soll die HTC-Demonstrationsanlage in Halle vorwiegend mit einem Teilstrom des durch die HWS erfassten kommunalen Grünschnittes betrieben werden. Die nachfolgenden Bilanzierungen und Bewertungen der HTC für die Bereitstellung biogener Festbrennstoffe erfolgen vor diesem Hintergrund auf Grundlage der Ergebnisse für kommunalen Grünschnitt.

AP 7a Stoff- und Energiebilanzen

a. Zielstellung

Ziel ist die Bereitstellung der Stoff- und Energiebilanzen als Grundlage der ökonomischen und ökologischen Bewertung.

b. Vorgehen und Methodik

Da im AP 5 *Wissenschaftliche Begleitung* keine Stoff- und Energiebilanz auf Basis realer Daten der Demonstrationsanlage berechnet werden konnten, basieren die ökologische und ökonomische Bewertung auf den Bilanzen des Arbeitspaketes AP 3 *Anlagenvorplanung*. Gegenüber der Stoff- und Energiebilanz im AP 3 *Anlagenvorplanung* wurden folgende Annahmen geändert:

- Die Energiebilanz wurde auf den Heizwert der feuchten Biomasse bzw. HTC-Kohle anstelle des Brennwertes bezogen, um die Vergleichbarkeit mit den anderen Brennstoffen herzustellen.
- Für die Fälle, in denen die Prozesswärme nicht durch Abwärme bereitgestellt wird, wird die Wärme durch einen Erdgaskessel mit einem energetischen Wirkungsgrad von 96 % erzeugt.
- In der HTC-Anlage Halle erfolgt die mechanische Entwässerung der HTC-Kohle mittels einer einfachen Schneckenpresse, da an dem Standort kostenlose Abwärme zur thermischen Trocknung genutzt werden kann. Für die Stoff- und Energiebilanz im AP 3 wurde eine Entwässerung auf einen TS-Gehalt von 40 Ma.-% unterstellt. Um die Übertragbarkeit der Bewertung auf andere Standorte, an denen keine kostenlose Abwärme zur Verfügung steht, zu gewährleisten, wurde für die Bewertung und Bilanzierung angenommen, dass an diesen Standorten eine bessere Entwässerungstechnologie (z.B. Filterpresse) installiert wird. Der angenommene TS-Gehalt nach der mechanischen Entwässerung beträgt dann 60 Ma.-% anstatt 40 Ma.-%.
- Der Bilanzraum wurde um die Prozessstufen Zerkleinerung und Pelletierung erweitert.

c. Ergebnisse

Tabelle II-8 zeigt die Stoff- und Energiebilanz einer kontinuierlich betriebenen HTC-Anlage mit anschließender Pelletierung bei 6.047 Jahresvolllaststunden².

² Unter der Annahme von 6.526 Jahresvolllaststunden sowie einer Auslastung von 50 % im ersten bzw. 90 % im zweiten Betriebsjahr entspricht das geometrische Mittel bei einer Betrachtungsdauer von 10 Jahren und einem Diskontierungszinssatz von 5 % 6.047 Jahresvolllaststunden.

Tabelle II-8: Stoff- und Energiebilanz einer HTC-Anlage mit anschließender Pelletierung.

Massenbilanz				Energiebilanz		
Stoff	Einheit	Menge	Energie	Einheit	Menge	
Zerkleinerung (Schredder)						
Eingang	Grünschnitt	Mg ₀₅ /a	2.316	Grünschnitt	kWh/a	3.579.915
	TS-Gehalt	Ma.-%	50			
	Diesel	Liter/a	2.007	Diesel	kWh/a	20.070
Ausgang	Grünschnitt	Mg ₀₅ /a	2.316	Grünschnitt	kWh/a	3.579.915
HTC mit Entwässerung und Trocknung						
Eingang	Grünschnitt	Mg ₀₅ /a	2.316	Grünschnitt	kWh/a	3.579.915
	TS-Gehalt	Ma.-%	50			
				elektrische Energie	kWh/a	253.969
				thermische Energie	kWh/a	363.386
Ausgang	HTC-Kohle	Mg ₀₅ /a	1.029	HTC-Kohle	kWh/a	3.888.312
	TS-Gehalt	Ma.-%	90			
	CO ₂ im Abgas	Mg ₀₅ /a	116			
	Abwasser	Mg ₀₅ /a	1.171			
Pelletierung						
Eingang	HTC-Kohle	Mg ₀₅ /a	1.029	HTC-Kohle	kWh/a	3.888.312
				elektrische Energie	kWh/a	166.648
Ausgang	HTC-Kohle	Mg ₀₅ /a	1.029	HTC-Kohle	kWh/a	3.888.312

AP 7b Ökonomische Bewertung

a. Zielstellung

Die ökonomische Bewertung hat gemäß der Aufgabenstellung mehrere Schwerpunkte, die sich in folgende Punkte gliedern lassen:

- Betriebswirtschaftliche Beurteilung der Marktfähigkeit und ökonomischer Vergleich der Nutzung von Grünschnitt in einer bestehenden Anlage.
- Einschätzung der ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit im Vergleich zu fossilen Referenzsystemen.

b. Vorgehen und Methodik

Die ökonomischen Kenngrößen wurden auf Grundlage der zuvor ermittelten Stoff- und Energieströme, des Investitionsvolumens und anderer ökonomischer Anlagenspezifika der HTC-Demonstrationsanlage berechnet. Die folgenden Ausführungen sind bereits so in dem Tagungsband des *9. Rostocker Bioenergieforums* (Zeymer et al. 2015, S. 205 - 220) veröffentlicht.

Kalkulation der Gesteungskosten der HTC-Kohlenproduktion

Zur zunächst vereinfachten Abschätzung der Wirtschaftlichkeit von HTC-Kohleprodukten findet eine Gegenüberstellung der Gesteungskosten abzüglich möglicher Entsorgungserlöse, die jedoch für Grünschnitt mit 0 €/t angesetzt sind, und deren Opportunitätskosten (z.B. Kosten für Heizöl) statt, wie in Abbildung II-13 dargestellt. Da die Nutzungspfade verschiedener Rohstoffe unterschiedlich hohe Folgekosten verursachen, erfolgt anschließend zudem eine ökonomische Bewertung der gesamten Nutzungspfade zur Wärmebereitstellung. Mittels der Annuitätsmethode erfolgt die Transformation nicht periodischer sowie periodischer Zahlungen mit veränderlichen Beträgen während eines Betrachtungszeitraumes in periodisch konstante Zahlungen. Dies ist notwendig, um die Gesteungskosten, der Quotient aus den jährlich konstanten Produktionskosten und der jährlichen Energiebereitstellung, zu berechnen. Für alle Berechnungen sind der Heizwert (Hi) und das Basisjahr 2013 angesetzt. Für die Rohstoffpreise werden einheitliche Jahresmittelwerte angenommen. Da der Vergleich mit aktuellen Rohstoffpreisen erfolgt, ist es nicht notwendig, bei einer gleichartigen Preisentwicklung Preissteigerungen während des Betrachtungszeitraumes in die Kalkulation mit einzubeziehen. Zu beachten ist, dass der Kostenvergleich nur als Indikator für die Wirtschaftlichkeit einer Produktion dienen kann, da z.B. steuerliche Aspekte und Folgekosten der Nutzung bei der Berechnung unberücksichtigt bleiben.

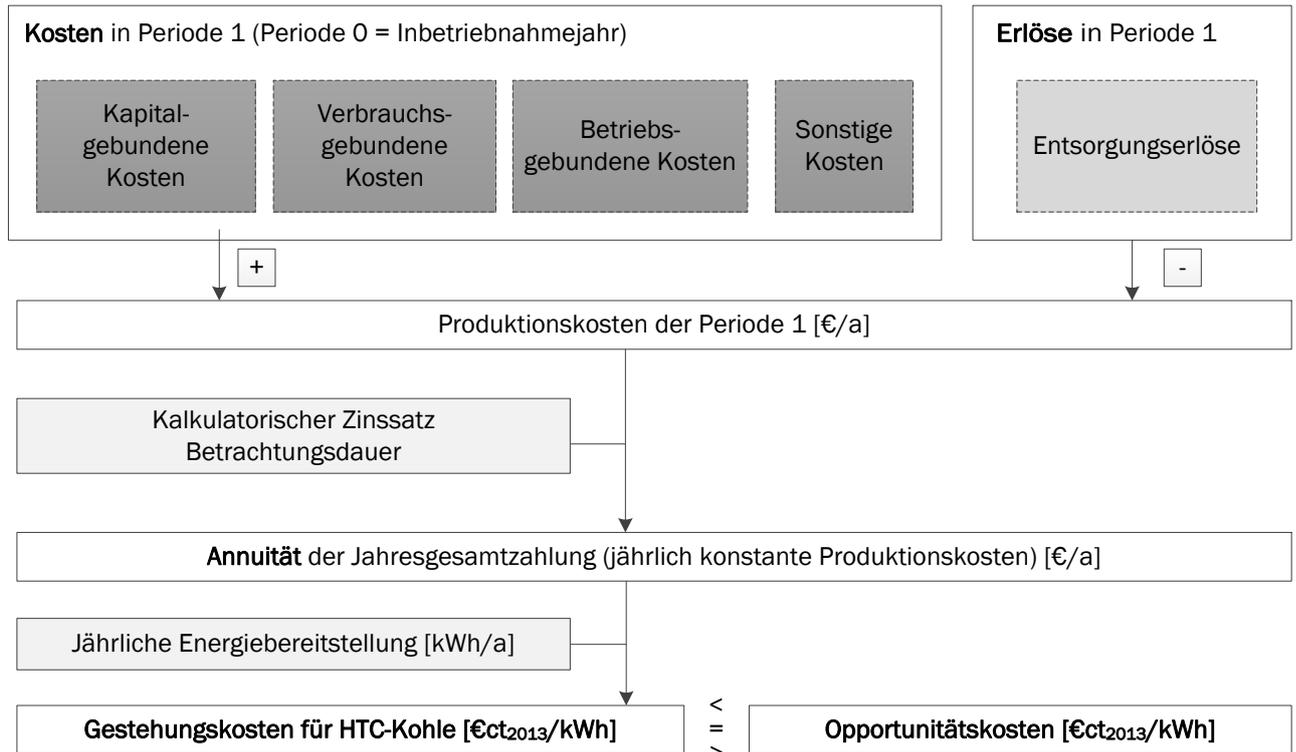


Abbildung II-13: Vorgehen zur Berechnung der Gestehungskosten der HTC-Kohleproduktion. Darstellung basierend auf Zeymer 2013, S. 77.

Kalkulation der Wärmegestehungskosten als Grundlage der ökonomischen Bewertung

Die Kalkulation der Wärmegestehungskosten erfolgt analog zu den Gestehungskosten der HTC-Kohleprodukte, nur wird die auskoppelbare Wärme als Hauptprodukt angesehen. Zudem spielen auch hier Preissteigerungen für die ein- und ausgehenden Zahlungsströme keine Rolle, da ein Vergleich mit derzeitigen Wärmegestehungskosten anderer Alternativen (Opportunitätskosten) erfolgt. Sind die Opportunitätskosten höher als die Wärmegestehungskosten der untersuchten Anlage, ist dies ein Indikator für die Wirtschaftlichkeit.

Die Nachteile der Wärmegestehungskosten (WGK) als Wirtschaftlichkeitsindikator liegen zum einen in der Berechnung der Opportunitätskosten. Diese Kalkulation ist mit weiteren Annahmen verbunden und kann nur schwer das vollständige Angebot der am Markt verfügbaren Technologien abbilden. Zum anderen muss davon ausgegangen werden, dass zukünftige Preissteigerungen der untersuchten Referenzkonzepte über den Betrachtungszeitraum höher oder maximal gleich hoch sind. Andernfalls ist die Vorteilhaftigkeit der untersuchten Anlage nicht gewährleistet. Dennoch bieten die Wärmegestehungskosten eine gute Möglichkeit die Wirtschaftlichkeit für einen konkreten Standort abschätzen zu können. (Zeymer 2013, S. 78 f.)

Kalkulation der Treibhausgasvermeidungskosten

Aufbauend auf den Wärmegestehungskosten erfolgt die Berechnung der spezifischen THG-Vermeidungskosten. Diese Kalkulation basiert auf einem vereinfachten Ansatz (Formel 1), wobei zunächst die spezifischen Differenzkosten (in €/MWh) zwischen der erneuerbaren Energiebereitstellung und einer oder mehreren fossilen Referenzen, im konkreten Fall der Wärmebereitstellung durch einen Heizöl-

bzw. Erdgaskessel, zu ermitteln sind. Danach sind die spezifischen THG-Minderungen (in Mg CO₂-Äq./MWh) aus der Differenz der spezifischen THG-Emissionen der regenerativen und der fossilen Energiebereitstellung zu ermitteln. Um abschließend die THG-Vermeidungskosten zu berechnen, ist der Quotient aus den spezifischen Differenzkosten und den spezifischen THG-Minderungen zu bilden. Die spezifischen THG-Vermeidungskosten stellen einen wichtigen Kennwert für den Vergleich der ökonomischen Effizienz von Bioenergiekonversionsketten dar. Sie geben an, wie viel die Vermeidung einer definierten Menge Treibhausgase gegenüber der entsprechenden fossilen Referenz kostet (Zeymer 2013, S. 80).

$$k_{\text{THGV}} = \frac{\text{WGK}_{\text{HTC}} - \text{WGK}_{\text{Ref}}}{e_{\text{Ref}} - e_{\text{HTC}}}$$

Formel 1

k_{THGV}	=	THG-Vermeidungskosten des Nutzungspfades (€/Mg CO ₂ -Äq.)
WGK_{HTC}	=	Wärmegestehungskosten der HTC-Kohlenutzung (€/MWh)
WGK_{Ref}	=	Wärmegestehungskosten der fossilen Referenz (€/MWh)
e_{HTC}	=	spezifische THG-Emissionen der Wärmebereitstellung (Mg CO ₂ -Äq./MWh)
e_{Ref}	=	spezifische THG-Emissionen der fossilen Referenz (Mg CO ₂ -Äq./MWh)

c. Ergebnisse

Aufbauend auf der Gestehungskostenberechnung für HTC-Kohle und für verschiedene Wärmenutzungspfade erfolgt die Gesamtbewertung ausgewählter Anlagen. Aufgrund der Datenlage basiert die Gegenüberstellung der Ergebnisse auf den Jahresmittelwerten von 2013.

Gestehungskosten der HTC-Kohleproduktion

In der Tabelle II-9 sind verschiedene Varianten einer möglichen HTC-Anlage aufgelistet. Dabei bleibt der HTC-Reaktor unverändert, ist jedoch im Konzept A 1 um eine Pelletierung und Verpackung ergänzt, womit eine Produktion von HTC-Pellets möglich ist. Konzept A 2 ist hingegen auf eine Produktion von HTC-Kohle als Granulat ausgelegt, womit sich der Investitions- und der elektrische Hilfsenergiebedarf deutlich reduziert. Im Konzept A 3 und A 4 ist eine kostenlose Wärmeversorgung unterstellt, was die Kosten der Wärmeversorgung senkt. Durch eine Optimierung der hydraulischen Verweilzeit des Grünschnitts im Reaktor, ist es angedacht, den Durchsatz der Anlage um 25 % zu steigern (Konzept A 4).

Tabelle II-9: HTC-Anlagenkonzepte und ökonomische Kennzahlen. Zeymer et al. 2015, S. 210.

Parameter	Einheit	A 1	A 2	A 3	A 4
Technologie		Zerkleinerung, HTC, Trockner, Pelletierung	Zerkleinerung, HTC, Trockner	Zerkleinerung, HTC, Trockner	Zerkleinerung, HTC, Trockner, 25% höherer Durchsatz
Gesamtinvestition (I ₀)	T€	1.014	864	864	864
Schredder (anteilig)	T€	64	64	64	64
HTC-Anlage	T€	800	800	800	800
Pelletierung inkl. Lager und Verpackung	T€	150	-	-	-
Förderquote	% I ₀	0	0	20	20
Betrachtungszeitraum	A	10			
Jahresvolllaststunden	h/a	6.047			
Kalkulationszins	%	6			
Instandhaltung und Wartung	% I ₀ p.a.	7			
Strompreis (bei 500<x<2000 MWh/a)	€ct/kWh	15,9			
Erdgaspreis (bei 1.000<x<10.000 GJ/a)	€ct/kWh	5,8			
Abwasserentsorgung	€/t	20			
Versicherung	% I ₀ p.a.	1,0			
Verwaltung	% I ₀ p.a.	0,5			

Die Gestehungskosten der HTC-Kohlenproduktion sind in Abbildung II-14 dargestellt. Dabei verursacht die Anfangsinvestition und die Instandhaltung bis zu 60 % der Gesamtkosten. Besonders der erhöhte Strombedarf bei einer nachgeschalteten Pelletierung, aber auch der Hilfsenergiebedarf der HTC-Anlage selbst, sind die Haupttreiber der verbrauchsgebundenen Kosten. Als Rohstoffkosten sind 0 €/t Grünschnitt angesetzt, weshalb weder Entsorgungserlöse noch Rohstoffkosten anfallen. Kann zudem auf eine Pelletierung für die Folgenutzung verzichtet werden, sinken die Produktionskosten von 300 €/t auf 250 €/t. Fällt gleichzeitig der Investitionsbedarf 20 % geringer aus, sind letztlich 200 €/t HTC-Kohle denkbar. Durch weitere Optimierung des Prozesses und einer Verringerung der Verweildauer, erhöht sich der Durchsatz bei gleicher Anlagenkonfiguration, womit sich die spezifischen kapitalgebundenen Kosten weiter reduzieren und 170 €/t als untere Grenze erreichbar wäre.

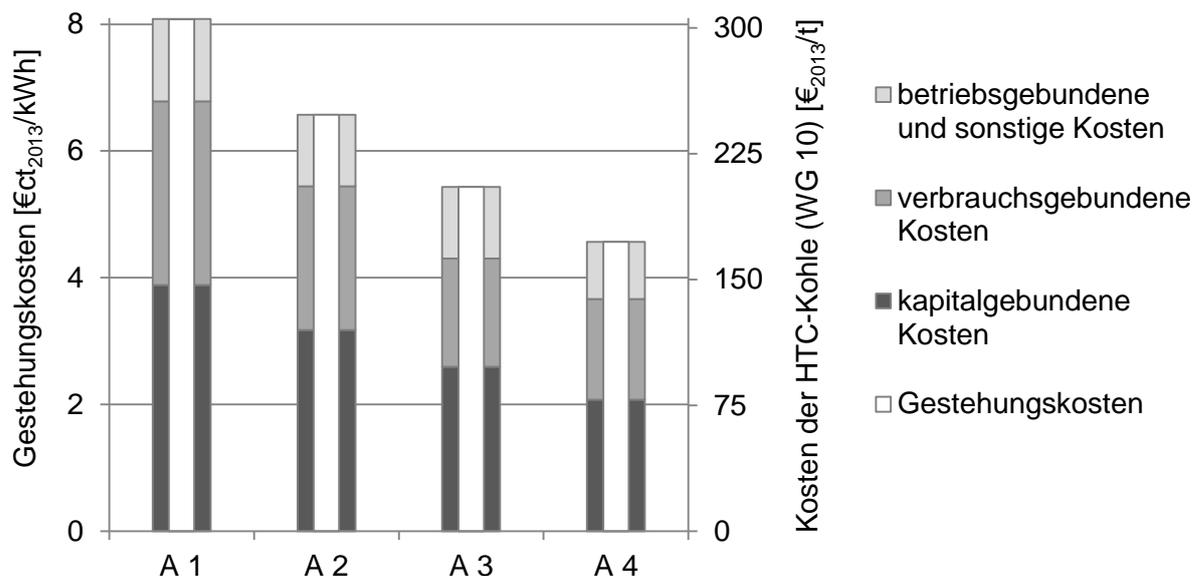


Abbildung II-14: Gestehungskosten der HTC-Kohle aus Zeymer et al. 2015, S. 211.

In Abbildung II-15 sind die berechneten Gestehungskosten für HTC-Kohle Preisen biogener und fossiler Energieträger gegenübergestellt. Besonders HTC-Kohlepellets sind deutlich kostenintensiver als die fossilen und biogenen Alternativen. Auch HTC-Kohlestaub ist unter günstigen Rahmenannahmen teurer als Industriepellets mit vergleichbarer Qualität oder HHS, jedoch preiswerter als leichtes Heizöl im Jahr 2013. Besonders deutlich fällt der Unterschied im Vergleich zu Braunkohle bzw. Braunkohlestaub aus. Selbst unter der Annahme von CO₂-Emissionszertifikatspreisen von 30 €/Mg THG-Äq. ist der HTC-Kohlestaub zwei- bis dreimal so teuer wie die fossile Kohle.

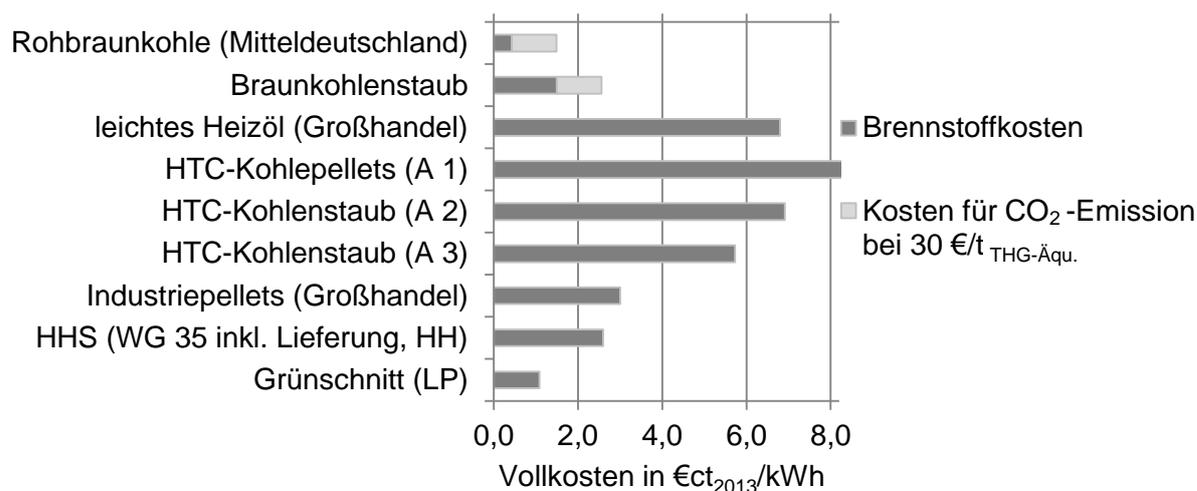


Abbildung II-15: Gegenüberstellung von Vollkosten bzw. Preisen biogener und fossiler Energieträger (heizwertbezogen, Originalsubstanz). Zeymer et al. 2015, S. 212.

Wärmegestehungskosten beim Einsatz biogener und fossiler Energieträger

Wie oben beschrieben, ist HTC-Kohle aus kommunalem Grünschnitt wesentlich teurer als Braunkohle und deren Mitverbrennung in Braunkohlekraftwerken unwirtschaftlich. Aus diesem Grund wird diese energetische Nutzung im Folgenden nicht weiter betrachtet. Stattdessen wird der Einsatz von HTC-Kohlepellets in Kleinfeuerungsanlagen am Beispiel eines 30-kW-Pelletkessels und der Einsatz unpelletierter HTC-Kohle zur gewerblichen bzw. industriellen Wärmeversorgung am Beispiel eines 500-kW-Kohlekessels bewertet. In Tabelle II-10 sind die untersuchten Nutzungskonzepte für HTC-Kohle und deren biogenen und fossilen Referenzen zur Wärmebereitstellung dargestellt.

Tabelle II-10: Technische Kennzahlen der Wärmenutzungskonzepte. Zeymer et al. 2015. S. 213.

Parameter	Einheit	W 1	W 2	W 3	W 4	W 5	W 6	W 7	W 8
Rohstoff		HTC-Pellets	Industriepellets	HHS	Heizöl	Erdgas	Heizöl	HTC-Kohle	Erdgas
Leistung (brutto)	kW	30	30	30	30	30	500	500	500
Jahresvolllaststunden	h/a	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	2.750	2.750	2.750
Thermischer Nutzungsgrad	%	82	82	80	83	84	83	80	84
Brennstoffbedarf	MWh/a	45	45	45	45	45	1.375	1.375	1.375
Wassergehalt (Eingang)	%	10	10	20	–	–	–	10	–
Wärmebereitstellung (netto)	MWh/a	37	37	36	37	38	1.141	1.100	1.155
Elektr. Bezug	kW	0,75	0,75	0,75	0,30	0,30	5,00	12,50	5,00

In Tabelle II-11 sind die ökonomischen Annahmen der Wärmenutzungskonzepte als auch die resultierenden Wärmegestehungskosten (WGK) bezogen auf das Jahr 2013 aufgelistet. Der Einsatz in HTC-Kohlepellets³ in einem 30-kW-Pelletkessel (W 1) weist dabei 40 % höhere WGK als der Einsatz von Industriepellets (W 2) auf, die ähnliche Qualitätseigenschaften besitzen. Im Vergleich zu einem HHS-Kessel (W 3) mit gleicher Leistung sind 20 % höhere WGK zu erwarten. Die fossile Wärmebereitstellung mittels Heizöl (W 4) bzw. Erdgas (W 5) verursacht 25 % bzw. 40 % geringere WGK, was besonders am vergleichsweise geringen Investitionsbedarf und an den zugleich geringen jährlichen Vollbenutzungsstunden in dem kleinen Leistungsbereich von 1.500 h/a (Tabelle II-11) liegt. In dem Leistungsbereich von 500 kW mit jährlichen Vollbenutzungsstunden von 2.750 h/a und durch den Verzicht der Pelletierung der HTC-Kohle fallen die Mehrkosten beim Einsatz von HTC-Kohle⁴ (W 7) gegenüber fossiler Ener-

³ HTC-Kohlekosten basierend auf Konzept A3 zuzüglich einer Pelletierung.

⁴ HTC-Kohlekosten basierend auf Konzept A3 ohne Abwasserentsorgungskosten (0,6 €/kWh Einsparpotenzial).

gieträger weitaus geringer aus. Hier ist die fossile Wärmebereitstellung mittels Heizöl (W 6) bzw. Erdgas (W 8) nur 7 % bzw. 23 % günstiger.

Tabelle II-11: Ökonomische Annahmen der Wärmenutzungskonzepte und resultierende Wärmegestehungskosten (WGK) bezogen auf das Jahr 2013. Zeymer et al. 2015. S. 215.

Parameter	Einheit	W 1	W 2	W 3	W 4	W 5	W 6	W 7	W 8
Investition (I ₀)	T€	22,1	22,1	27,1	11,7	7,4	63,0	219,0	51,0
Betrachtungsdauer	a	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Instandsetzungs- kosten	% von I ₀	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	2,5	3,0	2,0
Wartungskosten	% von I ₀	2,5	2,5	2,5	2,0	1,0	3,0	3,5	2,5
Rohstoffkosten	€ct/kWh	6,9	3,0	2,6	7,0	6,3	6,8	4,8	5,8
Ascheaufkommen	t/a	0,4	0,3	0,4	0,0	0,0	0,0	9,0	0,0
Ascheentsorgung	€/t	80,0	80,0	80,0	0,0	0,0	0,0	80,0	0,0
Strompreis	€ct/kWh	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5
Versicherung	% von I ₀ p.a.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0
Verwaltung	% von I ₀ p.a.	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
sonstige Kosten	% von I ₀ p.a.	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
WGK	€ct/kWh	16,6	11,8	13,5	12,3	9,8	9,3	10,1	7,8

In Abbildung II-16 sind die Wärmegestehungskosten bezogen auf das Jahr 2013 in ihrer Kostenstruktur dargestellt. Besonders die hohen Investitionssummen beim Einsatz biogener Energieträger (W 1 bis W 3), im Vergleich zu einem Erdgas- bzw. Heizölkessel, aufgrund des Brennstofflagers und der notwendigen Fördertechnik, führen bei geringen Jahresvolllaststunden zu erheblich höheren kapitalgebundenen Kosten, was einen wesentlichen Teil der Mehrkosten verursacht. Mit steigender Auslastung bei den 500-kW-Anlagen reduzieren sich die kapitalgebundenen Kosten und damit die Mehrkosten gegenüber den fossilen Referenzsystemen.

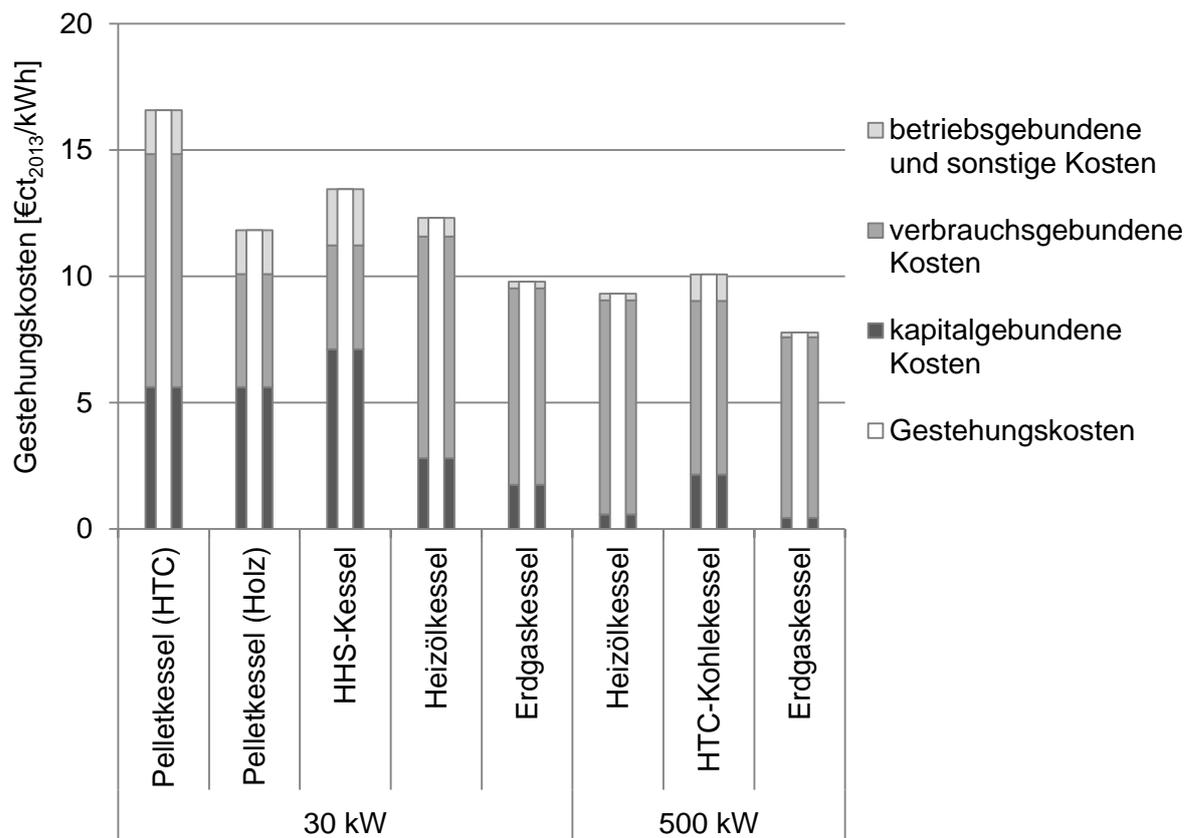


Abbildung II-16: Wärmegestehungskosten im Jahr 2013. Zeymer et al. 2015, S. 216.

Treibhausgasvermeidungskosten

Da für die Berechnung der THG-Vermeidungskosten eine Vielzahl von Annahmen notwendig und die Ergebnisse erheblich von der Wahl des Referenzsystems abgänglich sind, werden zwei Leistungsklassen und zwei unterschiedliche fossile Referenzsysteme betrachtet. Dazu werden die Wärmegestehungskosten und THG-Emissionen einer Wärmeversorgung mit dem Einsatz von HTC-Pellets in einem 30-kW-Kessel und von HTC-Kohlenstaub in einem 500-kW-Kessel der fossilen Referenzwärmebereitstellung mittels Erdgas- und Heizölkessel gegenübergestellt. Für die Berechnung der Wärmegestehungskosten sind die in Tabelle II-12 angegebenen Kosten und THG-Emissionen unterstellt. Die HTC-Kohle-gestehungskosten für die 30-kW-Anlage basieren auf dem Konzept A 1 mit einer Pelletierung und einer Förderquote von 20 % (siehe

Tabelle II-9), wobei von einer Prozesswärmebereitstellung durch Erdgas bzw. über kostenlose Abwärmenutzung eines Deponiegas-BHKW ausgegangen wird. Für die 500-kW-Anlage zur Wärmebereitstellung basieren die HTC-Kohlegestehungskosten auf dem Konzept A 3 ohne eine Pelletierung und einer Förderquote von 20 %, wobei hier auch von einer Prozesswärmebereitstellung durch Erdgas bzw. über kostenlose Abwärmenutzung ausgegangen wird.

Tabelle II-12: Datengrundlage zur Berechnung der THG-Vermeidungskosten. Zeymer et al. 2015, S. 217.

Nutzungs- pfad	Prozessenergie- bereitstellung	Gestehungskosten HTC-Kohle [€ct/kWh]	Wärmege- stehungs- kosten [€/MWh]			THG-Emissionen der Wärme- bereitstellung [Mg CO ₂ -Äq./MWh]		
			Fossile Referenz		HTC- Kohle	Fossile Referenz		HTC- Kohle
			Heizöl	Erdgas		Heizöl	Erdgas	
30 kW	Erdgas	7,5	123,2	97,9	173,4	0,374	0,285	0,153
	Abwärme	6,9	123,2	97,9	165,7	0,374	0,285	0,122
500 kW	Erdgas	5,4	93,2	77,8	147,4	0,374	0,285	0,118
	Abwärme	4,8	93,2	77,8	140,6	0,374	0,285	0,088

In Abbildung II-17 sind die spezifischen THG-Vermeidungskosten (THGV) der Wärmeerzeugung beim Einsatz von HTC-Kohlepellets in einem 30-kW-Kessel bzw. von HTC-Kohlenstaub in einem 500-kW-Kessel gegenüber einer fossilen Wärmebereitstellung dargestellt, wobei hinsichtlich der Prozessenergiebereitstellung für den HTC-Prozess zwischen dem Einsatz von Erdgas und einer Abwärmenutzung unterschieden wird. Besonders hohe THGV liegen vor, wenn fossile Energieträger zur Prozessenergiebereitstellung für den HTC-Prozess notwendig sind, weil keine geeignete Abwärmequelle zur Verfügung steht. Hierdurch entstehen zusätzliche Kosten und THG-Emissionen. Findet zudem nur eine Verdrängung einer relativ günstigen sowie CO₂-armen fossilen Wärmebereitstellung (Erdgaskessel) statt, liegen zum einen hohe Mehrkosten und geringe THG-Einsparungen vor, was zu THGV von über 500 €/Mg CO₂-Äq. führen kann. Dagegen verspricht die Substitution von fossiler Wärme aus Heizöl durch HTC-Kohlenstaub in größeren Anlagen deutlich geringere THGV von unter 170 €/Mg CO₂-Äq. aufgrund der geringen Mehrkosten und hoher THG-Einsparung.

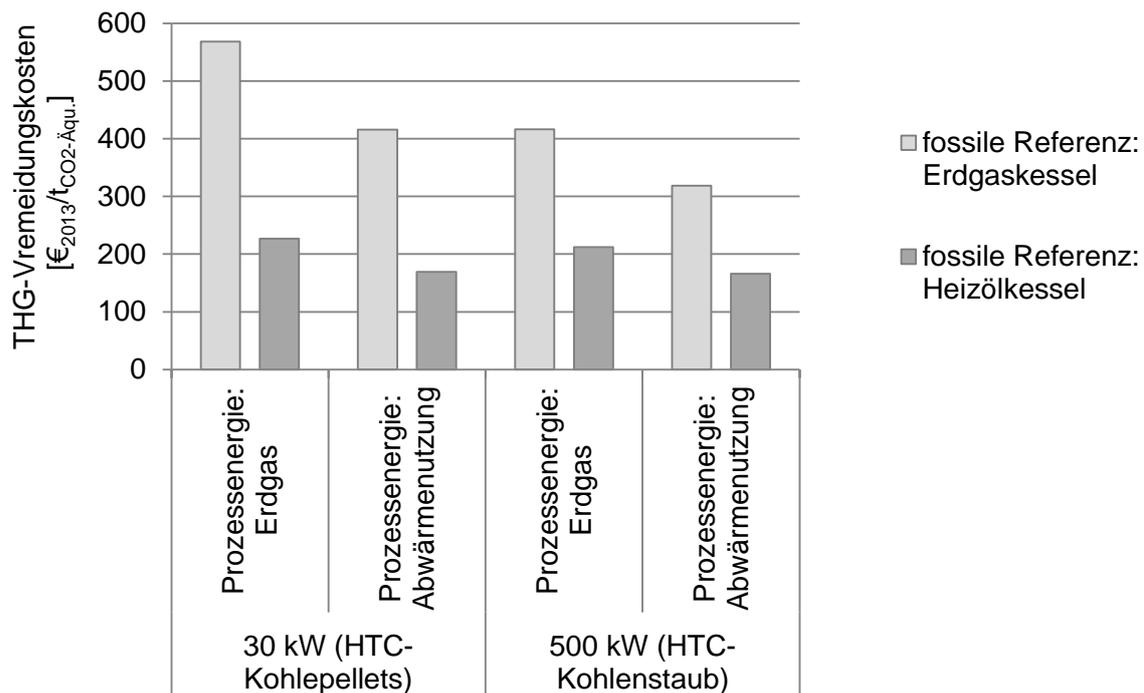


Abbildung II-17: Spezifische THG-Vermeidungskosten der Wärmeerzeugung. Zeymer et al. 2015, S. 218.

AP 7c Ökologische Bewertung

a. Zielstellung

Für die im Kapitel „Technische Bewertung“ beschriebene Produktion biogener Kohle mittels hydrothermaler Carbonisierung und deren Einsatz zur Wärmeerzeugung wurden Treibhausgasbilanzen erstellt und mit Referenzwerten konventioneller Vergleichssystemen verglichen.

b. Vorgehen und Methodik

Für die ökologische Bewertung der HTC-Kohlenproduktion und deren Einsatz zur Wärmeerzeugung kommt das Instrument der Ökobilanzierung (auch Life Cycle Assessment, LCA) zum Einsatz. Für die Erstellung einer solchen Bilanz existieren die international gültigen Normen ISO 14040 (Deutsches Institut für Normung 2006) und ISO 14044 (Deutsches Institut für Normung 2006). Zur Erstellung einer Ökobilanz wird der Lebenszyklus des untersuchten Produktes von der Rohstofferschließung und -gewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung analysiert, um alle mit diesem Produkt verbundenen Umwelteffekte zu erfassen. Dabei werden auch alle entlang des Lebensweges verwendeten Hilfs- und Betriebsstoffe betrachtet. Die mit der Produktion und Nutzung dieser Hilfs- und Betriebsstoffe sowie der sonstigen Produkte und Dienstleistungen verbundenen Aufwendungen und Emissionen werden in der THG-Bilanz der aus der Verbrennung der HTC-Kohle erzeugten Wärme berücksichtigt.

Die Methodik der Ökobilanz kann in vier Abschnitte (Abbildung II-18) unterteilt werden. Diese werden im Folgenden am Beispiel der durchgeführten ökologischen Bewertung erläutert.

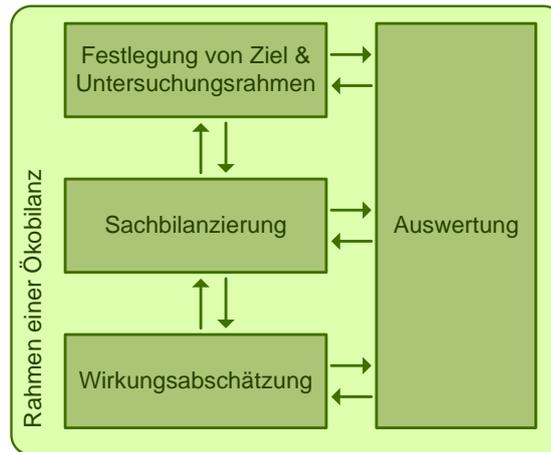


Abbildung II-18: Methodischer Ansatz nach DIN ISO 14040/14044.

Ziel und Untersuchungsrahmen

Wie bereits erwähnt, ist das Ziel dieser Bewertung, die betrachteten HTC-Produktions- und Nutzungskonzepte bezüglich der Umweltwirkung Treibhauspotential zu bilanzieren und die Ergebnisse ausgewählten Referenzsystemen gegenüberzustellen.

Die funktionelle Einheit, d.h. die spezifische Einheit auf die sich die gesamten Aufwendungen und Emissionen beziehen, wird in dieser Betrachtung als 1 MJ erzeugte, nutzbare Wärme definiert.

Der Bilanzierungsrahmen der betrachteten HTC-Produktions- und Nutzungskonzepte umfasst die gesamte Prozesskette von der Bereitstellung des Grünschnittes über die Konversion des Grünschnittes in HTC-Kohle mittels HTC bis zur Verbrennung und Bereitstellung der Wärme wie in Abbildung II-19 dargestellt.

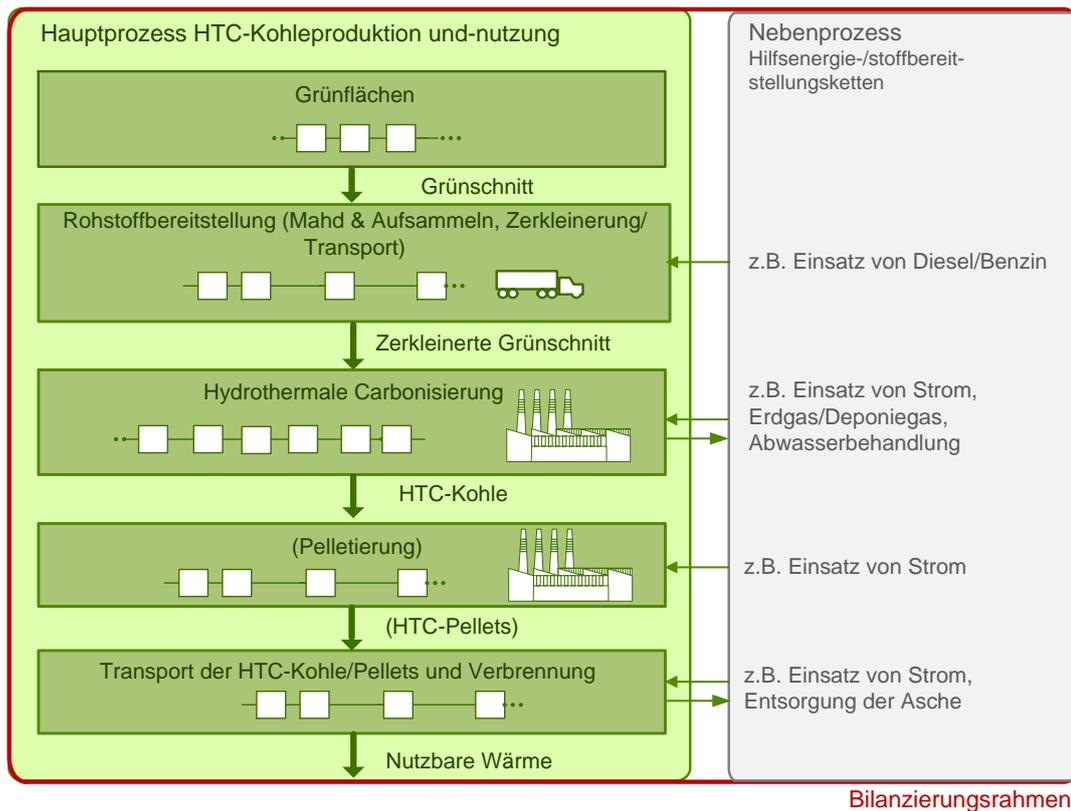


Abbildung II-19: Bilanzierungsrahmen.

Innerhalb der Bereitstellung des Grünschnittes wurden die Aufwendungen der Mahd, der Aufnahme und Aufladen des Grünschnittes, des Transports zur Zerkleinerungsanlage, der Zerkleinerungsanlage und des Transports zur HTC-Anlage berücksichtigt. Die Prozesskette ist für die betrachteten Nutzungskonzepte bis zur Produktion der HTC-Kohlen gleich. Für den Fall des Einsatzes der HTC-Kohle in 30-kW-Pelletöfen ist der Verbrennung noch ein Pelletierungsschritt vorgeschaltet. Wird die HTC-Kohle in einen 500-kW-Heizkessel eingesetzt, ist keine Pelletierung notwendig (vgl. Tabelle II-13).

Tabelle II-13: Betrachtete Nutzungskonzepte der HTC-Kohlen und deren vorgelagerten Prozessketten.

Betrachtete Nutzungskonzepte mit vorgelagerte Prozesskette	HTC-Pellets in 30-kW-Pelletofen	HTC-Pellets in 30-kW-Pelletofen (Abwärmenutzung)	HTC-Kohle in 500-kW-Heizkessel	HTC-Kohle in 500-kW-Heizkessel (Abwärmenutzung)
Grünschnittbereitstellung	Mahd/Aufnahme und Aufladen, Zerkleinerung, Transportvorgänge			
Konversion (HTC-Anlage)	Hydrothermale Carbonisierung, Prozesswärme über Erdgasfeuerung	Hydrothermale Carbonisierung, Prozesswärme aus Deponiegas-BHKW	Hydrothermale Carbonisierung, Prozesswärme über Erdgasfeuerung	Hydrothermale Carbonisierung, Prozesswärme aus Deponiegas-BHKW
Pelletierung	Pelletierung	Pelletierung	—	—
Verbrennung (inkl. Transport zur Verbrennung)	HTC-Pellets in 30-kW-Pelletöfen	HTC-Pellets in 30-kW-Pelletöfen	HTC-Kohle in 500-kW-Heizkessel	HTC-Kohle in 500-kW-Heizkessel

Sachbilanz

Die Sachbilanz dient dazu, alle relevanten Input- und Outputströme der mit der Bereitstellung von Wärme verbundenen Prozesse zu erfassen. Diese umfassen Energie- und Rohstoffinputs, den Einsatz von Hilfs- und Betriebsstoffen, Produkte und Koppelprodukte, Abfall sowie Emissionen in die Luft, Wasser und in den Boden (Deutsches Institut für Normung 2006). Die Bilanz basiert im Wesentlichen auf den im Projekt erstellten Stoff- und Energiebilanzen und der international anerkannten Ecoinvent Datenbank für Ökoinventare, Version 2.2 und 3.1 (SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES 2011); (SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES 2014).

Wirkungsabschätzung

In der Phase der Wirkungsabschätzung werden die Sachbilanzdaten hinsichtlich der potentiellen Umweltwirkungen ausgewertet. Dazu werden die Sachbilanzdaten spezifischen Wirkungskategorien zugeordnet, mit Hilfe von so genannten Charakterisierungsfaktoren aggregiert und bezüglich einer Referenzsubstanz beschrieben (Deutsches Institut für Normung 2006). Für die Bewertung der HTC-Kohlenproduktion und deren Einsatz zur Erzeugung von Wärme wurden die Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung von 1 MJ Wärme bilanziert. Die Berechnung erfolgt nach der IPCC-Methode (IPCC 2007) und wird mit Hilfe von Charakterisierungsfaktoren als Kohlenstoffdioxid-Äquivalent (CO₂-Äquivalent) dargestellt.

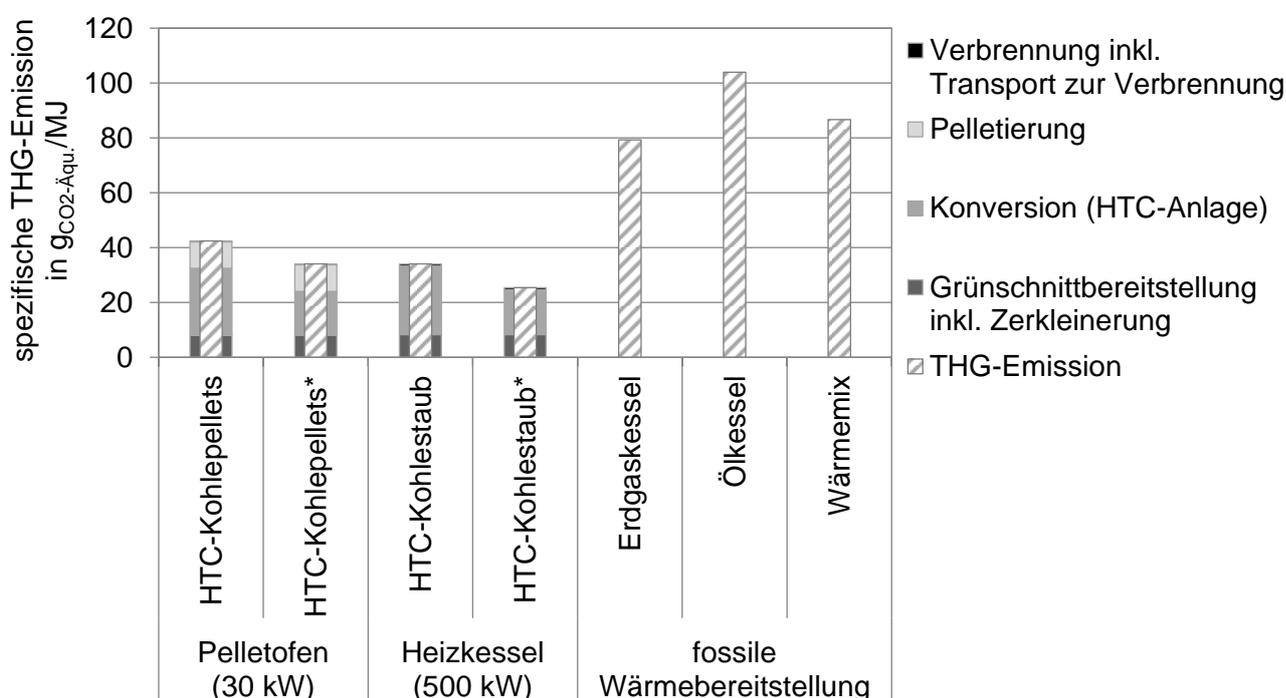
Interpretation

In der Auswertungsphase werden signifikante Parameter auf Grundlage der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung identifiziert. Zudem erfolgt eine Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfung. Letztendlich werden Empfehlungen gegeben und Schlussfolgerungen gezogen.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Treibhausgasbilanzierung dargestellt.

c. Ergebnisse

Die Abbildung II-20 gibt einen Überblick über die spezifischen THG-Emissionen der betrachteten Konzepte, wobei alle innerhalb der festgelegten Bilanzgrenze freigesetzten THG-Emissionen bilanziert wurden. Die THG-Emissionen, die bei dem Verbrennungsprozess selbst entstehen, werden aufgrund des biogenen Ursprungs des Ausgangsmaterials entsprechend der IPCC-Methode (IPCC 2007)⁵ und der nahezu vollständiger Verbrennung nicht mit berücksichtigt. Für die HTC-Anlage ist jeweils eine Prozesswärmebereitstellung über einen Erdgaskessel und über die Abwärmenutzung eines benachbarten Deponiegas-BHKW unterstellt. Zudem wird zwischen Feuerung in einem 30-kW-Pelletofen und einem 500-kW-Heizkessel (vgl. Tabelle II-13) unterschieden.



*) Nutzung von Abwärme zur Prozessenergiebereitstellung für die HTC-Kohleproduktion

Abbildung II-20: Spezifische THG-Minderung gegenüber konventionellen Referenzsystemen (eigene Berechnungen).

Der Hauptverursacher der THG-Emissionen in den vier HTC-Kohlenutzungskonzepten (vgl. Tabelle II-13) ist der hohe Stromverbrauch in der HTC-Anlage. Die Anwendung von HTC-Kohlepellets in Pelletöfen verursacht aufgrund des relativ hohen Stromverbrauches in der zusätzlichen Pelletierung höhere THG-Emissionen verglichen mit der Feuerung in einem 500-kW-Heizkessel. Im Vergleich zu den Nutzungskonzepten, in denen Deponiegas zur Prozesswärmebereitstellung der HTC-Anlage eingesetzt wird, verursachen die Konzepte, in denen über Erdgas die notwendige Wärme bereitgestellt wird, höhere THG-

⁵ Nach IPCC 2007 wird die Aufnahme von CO₂ für den Aufbau der Biomasse als negativer Klimaeffekt berechnet. Da davon ausgegangen wird, dass genau jene Menge an CO₂ bei der Verbrennung wieder freigesetzt wird, ergibt sich in Summe eine CO₂-neutrale Bilanz, wenn nur der Lebenszyklus der Biomasse betrachtet wird.

Emissionen. Das ist der Tatsache geschuldet, dass für die Deponiegasnutzung keine verursachende Treibhauswirkung angenommen wird. So kann die Abwärmenutzung eines Deponiegas-BHKW die THG-Emissionen im Vergleich zur Erdgasvariante um etwa 8 g CO₂-Äq./MJ erzeugter Wärme senken. Bei dem Nutzungskonzept mit den geringsten THG-Emissionen (25,4 g CO₂-Äq./MJ) wird die erzeugte HTC-Kohle direkt in einem 500-kW-Heizkessel verfeuert. In diesem „besten Fall“ wird die notwendige Prozesswärme aus dem benachbarten Deponiegas-BHKW bezogen.

Den THG-Emissionen aus der Erzeugung und Nutzung der HTC-Kohle sind THG-Emissionen fossiler Referenzen (Erdgas- und Heizölkessel, 70 %/30 % - Wärmemix aus beiden⁶) gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass alle HTC-Kohlenutzungspfade wesentlich geringere THG-Emissionen verursachen als deren fossile Wärmeerzeugungsoptionen.

⁶ Die Emissionsdaten stammen aus (Thrän u. a. 2013).

Zusammenfassung und Ausblick

Die stoffliche und energetische Nutzung von Holz stieg in Deutschland in den letzten Jahren kontinuierlich an, so dass, ungeachtet der vorhandenen Vorräte, die Preise für Holz ebenfalls stiegen. Als ein mögliches Vorbehandlungsverfahren für kommunale, biogene Reststoffe wurde die Hydrothermale Carbonisierung (HTC) untersucht, die eine Konversion dieser Biomassefraktionen zu hochwertigen Energieträgern ermöglichen kann.

Die bei der Halleschen Wasser und Stadtwirtschaft GmbH (HWS) angelieferten bzw. durch sie erfassten biogenen Abfälle beschränken sich in erster Linie auf Grünschnitt (Baum-, Strauch- und Rasenschnitt, Laub) sowie Bioabfall, welcher flächendeckend haushaltsnah über die braune Tonne erfasst wird. Der Grünschnitt wird auf dem Betriebshof der HWS gesammelt, geschreddert und über Kompostwerke verwertet. Der Bioabfall wird direkt oder über Umladestationen zu einer Vergärungsanlage verbracht und dort zu Biogas und Gärrest umgewandelt. Um die Qualität der biogenen Reststoffströme – kommunaler Grünschnitt, Bioabfall und Gärrest – zu ermitteln, wurden diese über einen Zeitraum von einem Jahr beprobt und deren chemische und brennstofftechnische Eigenschaften analysiert. Alle drei Biomassefraktionen besitzen einen sehr hohen Aschegehalt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der hohe Aschegehalt maßgeblich durch anhaftende Erde und Sand verursacht wird. Neben den negativen Auswirkungen auf die Brennstoffqualität der HTC-Kohle erwies sich der hohe Anteil an Sand als eine wesentliche Störquelle für die Funktionalität und den Betrieb der HTC-Anlage. Insgesamt unterscheiden sich die drei Stofffraktionen in ihren chemischen und brennstofftechnischen Eigenschaften, mit Ausnahme des Asche- und Schwefelgehaltes, kaum.

Ergänzend wurden am Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ) Laboruntersuchungen durchgeführt, um die Eignung der genannten Stoffströme für die HTC zu beurteilen und den Einfluss der Prozessparameter auf den Carbonisierungsprozess zu untersuchen. Hierzu wurden die biogenen Reststoffe in einem 500-ml-Laborautoklaven carbonisiert. Die Experimente haben gezeigt, dass alle drei biogenen Reststoffströme – kommunaler Grünschnitt, Bioabfall und Gärrest – geeignet sind, in HTC-Kohle umgewandelt zu werden. Der Kohlenstoffgehalt der drei Ausgangsmaterialien wird durch die HTC erhöht und der Sauerstoffgehalt verringert. Die Zunahme des Kohlenstoffgehaltes bzw. die Abnahme des Sauerstoffgehaltes in der HTC-Kohle ist umso stärker, je höher die Versuchsparameter Temperatur und Verweilzeit sind. Nach der HTC besitzen die HTC-Kohlen eine mit Braunkohle vergleichbare Zusammensetzung. Die HTC-Kohlen der drei verschiedenen Biomassen weisen bei der Verbrennung ein gleiches thermochemisches Zeretzungsverhalten auf.

Im Rahmen der Anlagenvorplanung konnten neun in Deutschland angesiedelte Anbieter von HTC-Anlagen recherchiert werden (Stand 2011). Drei Anbieter haben ein verbindliches Angebot für die Lieferung einer Demonstrationsanlage zur HTC biogener Reststoffe mit einer Jahreskapazität von 2.500 Mg (Input) abgegeben. Die HWS hat sich nach gründlicher Prüfung und Auswertung der abgegebenen Angebote für das Angebot der HTC-Anlage „Art coal 3000k“ der Artec Biotechnologie GmbH (Artec) aus Bad Königshofen entschieden und auf der Grundlage entsprechender Gremienbeschlüsse den Auftrag zur Errichtung der HTC-Demonstrationsanlage am 11.07.2012 an die Artec vergeben. Damit wurde der Meilenstein 1 des Projektes erreicht.

Die HTC-Anlage wurde auf dem Deponiegelände der Abfallwirtschaft GmbH Halle-Lochau (AWH) errichtet. Die HTC-Anlage befindet sich in unmittelbarer Nähe eines Deponiegas-BHKWs, welches die HTC-

Anlage mit der notwendigen Prozesswärme versorgt. Während der Inbetriebnahme kam es wiederholt zu technischen Störungen, u.a. musste die Inbetriebnahme durch den Defekt und Austausch der beiden Abgaswärmetauscher fünf Monate unterbrochen werden. Weiterhin erwiesen sich der Befüllzylinder sowie das Fördersystem störanfällig gegenüber dem Sand, welcher mit der Biomasse in die Anlage eingetragen wird, und mussten ausgetauscht bzw. überarbeitet werden. Trotz immenser Anstrengungen aller Beteiligten konnte die HTC-Anlage innerhalb der Projektlaufzeit nicht in den stabilen Dauerbetrieb überführt werden. Dennoch wurde wiederholt in kürzeren Kampagnen die prinzipielle, technische Funktionalität der Anlage unter Beweis gestellt, indem HTC-Kohle in kleineren Mengen produziert wurde.

Durch den Einsatz von HTC-Kohle zur Bereitstellung von Wärme können, im Vergleich zum Einsatz von Erdgas und Heizöl, Treibhausgasemissionen vermieden werden. Bei der Substitution von Wärme aus Heizöl durch den Einsatz von unpelletierter HTC-Kohle in Kesseln mit einem Leistungsbereich von größer 100 kW ist die Vermeidung von THG-Emissionen am höchsten. Hauptverursacher der THG-Emissionen bei der Bereitstellung der HTC-Kohle ist der hohe Stromverbrauch der HTC-Anlage.

Die ökonomische Analyse der Konversion von biogenen Reststoffen zu hochwertigen Energieträgern zeigt, dass die daraus erzielte Erweiterung des Nutzungsspektrums auch mit einer deutlichen Steigerung der Brennstoffkosten einhergeht, besonders bei Aufbereitungsverfahren mit hohem Neuigkeitscharakter und dementsprechend hohen Investitionsbedarf und geringerer Verfügbarkeit. Zudem erhöht eine Kompaktierung der HTC-Kohle für einen besseren Transport und den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen die Brennstoffkosten signifikant. Bei der Nutzung von HTC-Kohle zur Wärmeerzeugung bieten sich daher aus ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten Anlagen mit einem Leistungsbereich von größer 100 kW bis 10 MW an, die für den Einsatz von HTC-Kohlenstaub geeignet sind und möglichst hohe Jahresvolllaststunden aufweisen, um den erhöhten Investitionsbedarf gegenüber Heizöl- und Erdgaskesseln auf eine große Wärmemenge zu verteilen.

Derzeit ist HTC-Kohle als biogener Energieträger nur bedingt konkurrenzfähig im Vergleich zu fossilen Energieträgern. Auch unter Einbeziehung von Kosten für Emissionszertifikate beim Einsatz von fossilen Energieträgern, die bei Anlagen mit einer elektrischen Leistung größer 20 MW anfallen, ergibt sich kein ökonomischer Vorteil gegenüber Braunkohle. Gleichzeitig besteht jedoch erhebliches Entwicklungs- und Kostenreduktionspotential auf Seiten der HTC-Anlagen. Weitere wesentliche Faktoren zur Kostenreduktion sind Erhöhung des Durchsatzes und der Jahresvolllaststunden der HTC-Anlagen. Die ökonomische Analyse wurde unter der Annahme durchgeführt, dass die Rohstoffkosten 0 €/t Biomasse betragen. Können Entsorgungserlöse für die verwendeten, biogenen Reststoffe erzielt werden, wird die Wirtschaftlichkeit weiterhin entscheidend verbessert. Insgesamt ist eine wirtschaftliche Bereitstellung und Nutzung von HTC-Kohlen aus kommunalen, biogenen Reststoffen in Zukunft nicht auszuschließen.

Handlungsempfehlungen

Ziel der Projektpartner über das Projektende hinaus ist weiterhin die Beseitigung der technischen Probleme der HTC-Demonstrationsanlage und die Überführung dieser in den stabilen Betrieb. Hierfür wird es notwendig sein, die Einsatzmaterialien, beispielweise durch die Installation einer vorgeschalteten Wäsche, weiter aufzubereiten, um Störungen durch anhaftende Erde und Sand zu vermeiden. Gleichzeitig könnte damit der Aschegehalt der HTC-Kohle deutlich abgesenkt und deren Qualität erhöht werden.

Generell fehlen in der Forschung systematische Untersuchungen zur energetischen Nutzung von HTC-Kohlen, insbesondere Messungen an realen Verbrennungsanlagen. Auch das vorliegende Forschungsprojekt konnte aus den genannten Gründen entgegen der ursprünglichen Planung nur einen unbefriedigenden Beitrag zu diesem Themenfeld leisten. Entsprechend sollte die energetische Nutzung der HTC-Kohlen intensiver in zukünftigen Forschungsprojekten untersucht werden. Aufbauend darauf müssen Verbrennungsanlagen für die Monoverbrennung von HTC-Kohlen angepasst bzw. weiterentwickelt werden.

Wesentliches Hemmnis für die Vermarktung und den praktischen Einsatz der HTC-Kohlen in Feuerungsanlagen ist eine fehlende Spezifikation bzw. Norm für HTC-Kohlen. Ziel sollte die Entwicklung einer technischen Spezifikation bzw. Norm für HTC-Kohlen für die energetische Nutzung sein.

Weiterhin bestehen offene, rechtliche Fragen, die einer Klärung bedürfen. Insbesondere ist hier der Status der HTC-Kohle als ein marktfähiges Produkt und das damit verbundene Ende der Abfalleigenschaft zu nennen. Die Klärung dieser übergeordneten Fragestellung betrifft nicht nur die Technologie der Hydrothermalen Carbonisierung, sondern allgemein die derzeit in der Politik und Forschungsförderungen geforderte, energetische Erschließung kostengünstiger Biomasserest- und Abfallstoffe.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung I-1:	Bestehende und geplante Verwertungspfade für biogene Reststoffe der HWS.	6
Abbildung I-2:	Überblick über die Projektstruktur.	8
Abbildung II-1:	Jahreskurve des kommunalen Grünschnittaufkommens der HWS.	12
Abbildung II-2:	Produktverteilung der HTC von Bioabfall; wasser- und aschefrei (Clemens u.a. 2013, S. 243).	17
Abbildung II-3:	Elementarzusammensetzung der HTC-Kohle von Bioabfall; wasser- und aschefrei (Clemens u.a. 2013, S. 243).	18
Abbildung II-4:	Übersicht über die mittlere Elementarzusammensetzung der HTC-Kohle von Grünschnitt, Bioabfall und Gärrest; wasser- und aschefrei (Clemens u.a. 2013, S. 244).	19
Abbildung II-5:	Prozesskette der HTC-Anlage Halle.	21
Abbildung II-6:	Deponiegas-BHKW Nord auf dem Deponiegelände der Abfallwirtschaft GmbH Halle-Lochau.	24
Abbildung II-7:	Montage Abgaswärmetauscher.	27
Abbildung II-8:	HTC-Anlage Halle.	29
Abbildung II-9:	Vergleich der Thermogramme von Grünschnitt (links) und dessen HTC-Kohle (rechts).	37
Abbildung II-10:	Vergleich der Thermogramme von Grünschnitt (aufbereitet) (links) und dessen HTC-Kohle 2 (rechts).	37
Abbildung II-11:	Vergleich der Thermogramme von Bioabfall (links) und dessen HTC-Kohle (rechts).	37
Abbildung II-12:	Vergleich der Thermogramme von Gärrest (links) und dessen HTC-Kohle (rechts).	38
Abbildung II-13:	Vorgehen zur Berechnung der Gesteungskosten der HTC-Kohleproduktion. Darstellung basierend auf Zeymer 2013, S. 77.	43
Abbildung II-14:	Gesteungskosten der HTC-Kohle aus Zeymer et al. 2015, S. 211.	46
Abbildung II-15:	Gegenüberstellung von Vollkosten bzw. Preisen biogener und fossiler Energieträger (heizwertbezogen, Originalsubstanz). Zeymer et al. 2015, S. 212.	46
Abbildung II-16:	Wärmegesteungskosten im Jahr 2013. Zeymer et al. 2015, S. 216.	49
Abbildung II-17:	Spezifische THG-Vermeidungskosten der Wärmeerzeugung. Zeymer et al. 2015, S. 218.	51
Abbildung II-18:	Methodischer Ansatz nach DIN ISO 14040/14044.	52
Abbildung II-19:	Bilanzierungsrahmen.	53
Abbildung II-20:	Spezifische THG-Minderung gegenüber konventionellen Referenzsystemen (eigene Berechnungen).	55
Abbildung II-21:	Thermogramm von Holz.	63
Abbildung II-22:	Thermogramm von HTC-Kohle HWS.	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle II-1:	Jahresmengen der bei der HWS anfallenden biogenen Stofffraktionen kommunaler Grünschnitt und Bioabfall.	12
Tabelle II-2:	Übersicht der ermittelten chemischen und brennstofftechnischen Parameter des kommunalen Grünschnittes.	13
Tabelle II-3:	Mittelwerte der ermittelten chemischen und brennstofftechnischen Parameter der Einsatzmaterialien kommunaler Grünschnitt, Bioabfall und Gärrest.	14
Tabelle II-4:	Versuchsmatrix der HTC-Laborversuche.	17
Tabelle II-5:	Kohlenstoffgehalt und Brennwert der HTC-Kohlen von Bioabfall; wasser- und aschefrei (Clemens u.a. 2013, S. 244).	19
Tabelle II-6:	Stoff- und Energiebilanz der HTC-Anlage mit einer Jahreskapazität von 2.500 Mg _{OS} /a.	23
Tabelle II-7:	Ergebnisse der brennstofftechnische Analysen der Inputmaterialien, HTC-Kohlen und Holz sowie geforderte Werte entsprechend der DIN EN ISO 17225-6, Klasse B (DIN EN ISO 17225-6 2014).	34
Tabelle II-8:	Stoff- und Energiebilanz einer HTC-Anlage mit anschließender Pelletierung.	41
Tabelle II-9:	HTC-Anlagenkonzepte und ökonomische Kennzahlen. Zeymer et al. 2015, S. 210.	45
Tabelle II-10:	Technische Kennzahlen der Wärmenutzungskonzepte. Zeymer et al. 2015. S. 213. ..	47
Tabelle II-11:	Ökonomische Annahmen der Wärmenutzungskonzepte und resultierende Wärmegestehungskosten (WGK) bezogen auf das Jahr 2013. Zeymer et al. 2015. S. 215.	48
Tabelle II-12:	Datengrundlage zur Berechnung der THG-Vermeidungskosten. Zeymer et al. 2015, S. 217.	50
Tabelle II-13:	Betrachtete Nutzungskonzepte der HTC-Kohlen und deren vorgelagerten Prozessketten.	54
Tabelle II-14:	Übersicht der verwendeten Analysemethoden.	62
Tabelle II-15:	Vergleich der Charakteristika der verschiedenen Biomassen bezüglich der ermittelten Peaks (P) aus der Differenzthermogravimetrie (DTG) und der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) sowie der Onset-Temperatur (Tonset), der Restmasse und des Masseverlusts im Bereich 120 bis 900 °C aus der Thermogravimetrie (TG) bei einer Heizrate von 5 K/min und einer Endtemperatur von 900 °C unter oxidierenden Bedingungen.	64

Anhang

Tabelle II-14: Übersicht der verwendeten Analysemethoden.

Methode	Norm
Wassergehalt	DIN EN 14774-1
Aschegehalt 550 °C	DIN EN 14775
Aschegehalt 815 °C	DIN 51719
Flüchtige Bestandteile	DIN EN 15148
Brennwert, Heizwert	DIN EN 14918
Elementaranalyse	DIN EN 15104
Gesamtgehalt	DIN EN 15289, DIN EN ISO 10304-1
Totalaufschluss nach CEN Bestimmung der Haupt- und Nebenbestandteile	DIN EN 15290, DIN EN 15297

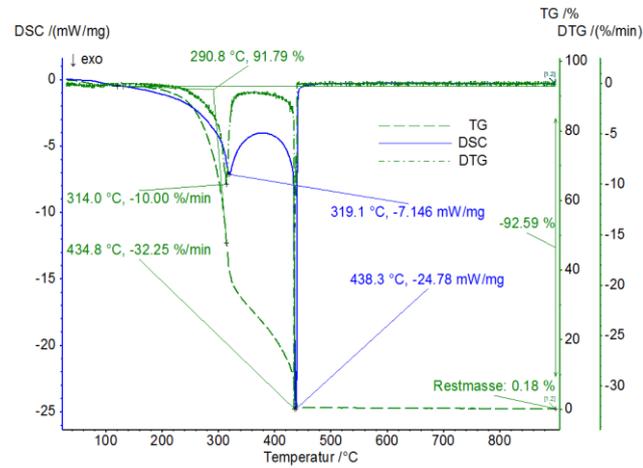


Abbildung II-21: Thermogramm von Holz.

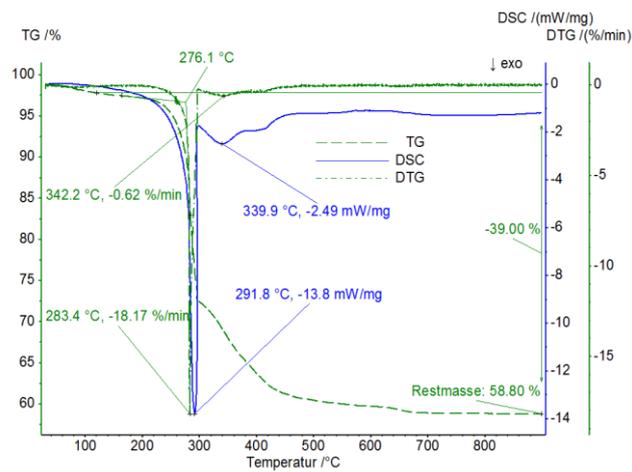


Abbildung II-22: Thermogramm von HTC-Kohle HWS.

Tabelle II-15: Vergleich der Charakteristika der verschiedenen Biomassen bezüglich der ermittelten Peaks (P) aus der Differenzthermogravimetrie (DTG) und der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) sowie der Onset-Temperatur (T_{onset}), der Restmasse und des Masseverlusts im Bereich 120 bis 900 °C aus der Thermogravimetrie (TG) bei einer Heizrate von 5 K/min und einer Endtemperatur von 900 °C unter oxidierenden Bedingungen.

		DTG			DSC			T _{onset} in °C			Restmasse bei 900 °C in %	Masseabnahme im Bereich 120 bis 900 °C					
		Peaktemp. in °C			Peaktemp. in °C			Rmax in mW/mg									
		P1	P2	P3	R1	R2	R3	P1	P2	P3			R1	R2	R3		
Inputmaterial	Bioabfall	Mittelwert	281,2	423,1		-4,3	-27,7		290,4	428,0		-6,3	-25,6		254,6	22,3	72,0
		s	5,2	3,6		0,3	1,9		2,1	2,5		0,1	0,3		0,4	2,8	1,8
	Gärrest	Mittelwert	275,7	420,2		-16,4	-19,4		278,0	426,1		-11,5	-18,3		261,7	29,9	65,9
		s	2,5	2,3		11,8	1,6		1,5	2,0		2,9	0,7		6,2	2,9	2,7
	Grünschnitt	Mittelwert	291,2		448,2	-3,2		-0,7	295,6	396,0	450,0	-5,5	-3,2	-3,1	260,4	41,1	53,5
	s	1,2		0,4	0,5		0,0	1,3	2,7	1,3	0,7	0,1	0,0	1,8	1,1	0,9	
HTC-Material	Grünschnitt (aufbereitet)	Mittelwert	275,2		-30,9			280,3	443,7		-13,8	-4,0		270,0	37,5	56,6	
		s	2,0		5,2			1,3	1,1		2,5	0,2		2,3	1,5	1,4	
	HTC-Bioabfall	Mittelwert	267,4		-48,3			280,0	359,6	440,9	-26,9	-4,5	-3,0	265,1	31,3	67,3	
		s	2,9		4,5			2,6	1,3	5,0	2,4	0,2	0,0	2,8	2,5	2,5	
	HTC-Gärrest	Mittelwert	253,7		-32,5			266,4	344,4	452,8	-19,9	-3,8	-2,7	251,5	42,2	56,7	
	s	2,0			1,5		1,5	1,6	0,8	0,4	0,3	0,0	1,8	0,0	0,0		
Vergleich	HTC-Grünschnitt	Mittelwert	270,4	340,7		-34,0	-1,2		282,3	342,7	455,2	-24,5	-4,2	268,2	44,9	53,7	
		s	4,4	2,7		3,3	0,0		3,6	0,2	1,5	3,8	0,3	4,0	3,3	3,3	
	HTC-Grünschnitt (aufbereitet)	Mittelwert	265,0		-40,5			279,0	352,4		-24,0	-4,8		263,0	40,8	58,3	
		s	2,0		2,6			0,1	1,3		1,0	0,6		2,1	0,7	0,5	
	HTC Kohle Inbetriebnahme	Mittelwert	284,7	342,2		-20,1	-0,6		293,4	340,7		-14,5	-2,5	278,1	57,1	40,6	
	s	1,8		2,7			2,2	1,1		1,0	0,1		2,8	2,4	2,3		
	Holzpellets (Kiefer)	Mittelwert	313,7	433,4		-10,1	-32,1		284,7	437,0		-7,3	-24,9	290,3	0,2	92,6	
	s	0,3	2,2		0,3	1,0		0,6	1,6		0,2	1,0		0,5	0,1	0,1	

2. Voraussichtlicher Nutzen

Das Projekt erfüllt mehrere Nutzen. Zum einen wurde ein Verwertungskonzept zur Bereitstellung von Biomassefestbrennstoffen durch die Erschließung kommunaler, biogener Rest- und Abfallstoffen mit Hilfe der HTC entwickelt, das auf Grund der gleichen Problemstellung auf eine Vielzahl anderer Kommunen übertragbar ist. Die Erfahrungen bei der Errichtung und dem zukünftigen Betrieb der HTC-Anlage stehen für zukünftige HTC-Anlagenbetreiber zur Verfügung. Zum anderen wurden wissenschaftliche Ergebnisse generiert, die für die Weiterentwicklung und Anwendung der HTC zur Verfügung stehen. Dies umfasst sowohl die Analyse des jahreszeitlichen Anfalls sowie der Zusammensetzung für die HTC relevanter, biogener Reststoffe am Beispiel der Stoffströme der HWS als auch die Ergebnisse der durchgeführten HTC-Versuche. Die ermittelten Stoff- und Energiebilanzen der HTC-Anlage bilden die Grundlage für die Bewertung und Optimierung der HTC-Anlage und ermöglichen den Vergleich mit anderen technischen (HTC-)Konzepten zur Bereitstellung von Biomassefestbrennstoffen aus biogenen Rest- und Abfallstoffen. Die durchgeführten brennstofftechnischen Analysen und Untersuchungen sind Grundlagen für eine zukünftige, energetische Nutzung der HTC-Kohlen. Die ökonomische und ökologische Bewertung konnten Kriterien identifizieren, die den wirtschaftlichen Betrieb einer HTC-Anlage und die Emission von Treibhausgasen entlang der Bereitstellungs- und Nutzungskette maßgeblich beeinflussen. Sowohl die HWS als auch das DBFZ sind vielfältig in Netzwerke eingebunden, über die sie die Ergebnisse verbreitet haben und werden (siehe Kapitel *1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen* und *II.4 Veröffentlichungen*).

Das Projekt und vor allem die HTC-Demonstrationsanlage sind auf großes Interesse in der kommunalen Entsorgungswirtschaft gestoßen. Die HWS und mit ihr die Stadtwerke Halle GmbH wurden bundesweit als innovative, kommunale Unternehmen wahrgenommen. Die HTC-Demonstrationsanlage ist in den Kreislauf- und Ressourcenwirtschaftspark am Standort Halle-Lochau eingebettet und steht für Besichtigungen zur Verfügung. Zukünftig wird die Ergänzung der Verwertungslinien und die Vermarktung der HTC-Kohle die Wettbewerbssituation der HWS stärken.

Für das DBFZ stellt das Projekt den Kristallisierungskeim für den Aufbau des Forschungsschwerpunktes Hydrothermale Prozesse dar. Das Projekt hat die nationale und internationale Sichtbarkeit des DBFZ auf dem Gebiet der hydrothermalen Prozesse deutlich erhöht. Infolgedessen konnten während der Projektlaufzeit neben sieben Marktprojekten zur hydrothermalen Umwandlung von Biomassen folgende Forschungsprojekte eingeworben werden:

- *FeBio@H2O Flüssige Energieträger aus einer integrierten hydrothermalen Umwandlung von Biomasse* (BMBF, 01/2013 – 12/2015),
- *CARBOWERT – Einsatz der Hydrothermalen Carbonisierung (HTC) für die nachhaltige Behandlung und Verwertung von Fraktionen des Sanitärsektors im Sinne eines Biochar/Sewchar-Konzepts* (BMEL, 10/2013 – 09/2016),
- *HTChem – Spitzencluster BioEconomy: TG4, Bioraffinerie zur integrierten hydrothermalen Produktion von Brennstoff sowie der Grundchemikalien Phenol und Furan aus Biomasse* (BMBF, 11/2014 – 09/2017).

Vor dem Hintergrund, keinen Abnahmevertrag gesichert zu haben, und des Projektzieles, einen Verwertungsweg für die HTC-Kohle abseits der Mitverbrennung in Großkraftwerken zu etablieren, planen die Stadtwerke Halle eine eigene Feuerungsanlage (>100 kW) für HTC-Kohle zu errichten. Die Feuerungs-

anlage soll einen alten Heizölkessel ersetzen und ein Betriebsgebäude am Standort der Deponie Halle-Lochau mit Wärme versorgen. Damit wäre es den Stadtwerken Halle möglich, sowohl die Bereitstellung als auch die energetische Nutzung der HTC-Kohle an einem Standort zu demonstrieren. Hierfür konnte bereits ein Feuerungsanlagenhersteller gebunden werden, der beabsichtigt, seine Feuerungsanlage für die Verbrennung der HTC-Kohle zu optimieren. Die Optimierung und Errichtung einer Feuerungsanlage für HTC-Kohle ist ein Bestandteil des obengenannten Forschungsprojektes *HTChem*, welches sich an das vorliegende Projekt anschließt.

Weiterhin hat das DBFZ im Zeitraum 01/2015 – 06/2015 mit finanzieller Förderung des BMBF im Rahmen der BMBF-Innovationsinitiative *Unternehmen Region* das *Innovationsforum Hydrothermale Prozesse* organisiert und durchgeführt. Mit dem Innovationsforum hat das DBFZ angefangen, ein Netzwerk von Unternehmen, angewandter Forschung und zielgerichteter Investoren aufzubauen, um die Technologie der Hydrothermalen Prozesse in den Märkten zu etablieren. Am Innovationsforum waren Biomasseverarbeiter, Vertreter der Ent- und Versorgungsbranche, der (biogenen) Kohlenstoff veredelnden Industrie, der Energiewirtschaft, der Chemiebranche und aller mit ihr verbundenen Bereiche vertreten.

Daran anschließend bereitet derzeit das DBFZ federführend den Aufbau eines *Innovativen regionalen Wachstumskern Hydrothermale Prozesse* vor.

3. Fortschritt Dritter

Während der Projektlaufzeit wurde auf dem Gebiet der HTC eine Vielzahl von Ergebnissen veröffentlicht. Vielfach wurde die HTC unterschiedlicher Substrate untersucht (Ramke u.a. 2010; Heilmann u.a. 2011, Mumme u.a. 2011; Poerschmann u.a. 2014). Ein Schwerpunkt bildet dabei die Anwendung der HTC zur effizienten Entwässerung von Klärschlamm (Buttmann 2011; Escala u.a. 2013). Weiterhin erfolgten Arbeiten zur Aufklärung der Reaktionsmechanismen sowie zur Bestimmung von Reaktionskinetik der hydrothermalen Umwandlung von Biomassen (Kruse u.a. 2012; Kruse und Grandl 2013; Jatzwauck und Schumpe 2015). (Erlach u.a. 2011), (Vogt u.a. 2012), (Remy u.a. 2013) und (Krebs u.a. 2013) führten ökonomische und teilweise ökologische Analysen für Anwendungsfälle der HTC durch. Auf der Seite der HTC-Kohlenutzung wird die (Mit-)Verbrennung der HTC-Kohle als eine Nutzungsoption immer wieder angeführt. Generell fehlen aber systematische Untersuchungen zur energetischen Nutzung von HTC-Kohlen als Brennstoff in Feuerungsanlagen, insbesondere Messungen an realen Verbrennungsanlagen. Im Projekt FLUHKE wird der Einsatz der HTC-Kohle als Brennstoff in einem Flugstromvergaser untersucht (Wittmann 2015).

Im Bereich der technischen Umsetzung der HTC wurden weitere HTC-Anlagen errichtet. Die Firma CS carbonSolutions GmbH hat 2010 eine HTC-Anlage mit einer Jahreskapazität 10.000 Mg in Betrieb genommen (CS carbonSolutions 2015). Das spanische Unternehmen Ingelia S.L. hat ebenfalls 2010 eine HTC-Anlage in Betrieb genommen (Ingelia 2015). Beide Versuchsanlagen werden zu Forschungsaufgaben kampagnenweise betrieben. Die für Klärschlamm ausgelegte HTC-Anlage der Firma Terra Nova wurde an verschiedenen Standorten kampagnenweise weiterbetrieben. Die neben der im vorliegenden Projekt errichtete, einzige HTC-Anlage, die für den kommerziellen Betrieb bestimmt ist, wurde 2012 von der Firma AVA-CO2 Schweiz AG in Relzow errichtet (AVA-CO2 2015). In der umgesetzten, ersten Ausbaustufe soll die Anlage über eine Kapazität von 13.000 Mg/a verfügen. Die Inbetriebnahme der Anlage ist aber offen.

4. Veröffentlichungen und Ergebnistransfer

Im Rahmen des Vorhabens sind die Projektergebnisse wie folgt veröffentlicht worden.

Publikationen:

Clemens, A.; Kietzmann, F.; Blümel, R.; Klemm, M.; Nelles, M. (2012): Wohin mit den biogenen Rest- und Abfallstoffen? In: Senat der Bundesforschungsinstitute (Hrsg.): ForschungsReport Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz. Heft 46. S. 24-27

Clemens, A.; Blümel, R.; Kietzmann, F.; Klemm, M.; Nehl, D. (2013): Hydrothermale Carbonisierung biogener Reststoffe am Beispiel der Halleschen Wasser und Stadtwirtschaft GmbH. In: Thrän, D.; Pfeiffer, D. (Hrsg.): Neue Technologien und Konzepte für die Bioenergie der Zukunft – Konferenzband Energetische Biomassenutzung. Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ). Leipzig. S. 239 – 246

Kietzmann, F.; Klemm, M.; Blümel, R.; Clemens, A. (2013): Demonstrationsanlage für HTC-Kohle in Halle – abfallwirtschaftliche Ziele und technische Umsetzung. In: Wiemer, K.; Kern, M.; Raussen, T.: Bio- und Sekundärrohstoffverwertung VIII stofflich – energetisch. Neues aus Forschung und Praxis. Witzenhausen-Institut. Witzenhausen. S. 337-347

Pfeiffer, D.; Blümel, R.; Clemens, A.; u.a. (2013): Hydrothermal Carbonisation of biomass residues from municipalities. Conference proceeding 21st European Biomass Conference and Exhibition. Copenhagen

Clemens, A.; Blümel, R.; Kietzmann, F.; Klemm, M. (2014): Integrierte Verwertungsanlage und Strategie für kommunale Biomasse – HTC Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft. In: Tagungsreader. HTP-Fachforum Biobasierte hydrothermale Prozesse. Leipzig. ISSN: 2199-9856

Kietzmann, F.; Blümel, R.; Clemens, A.; Klemm, M. (2014): Best Practise Beispiel: Hydrothermale Carbonisierung bei den Stadtwerken Halle. In: Tagungsreader. HTP-Fachforum Biobasierte hydrothermale Prozesse. Leipzig. ISSN: 2199-9856. S. 32 – 42

Zeymer, M., Clemens, A., Meisel, K. (2015): Technisch-ökonomisch-ökologische Analyse der hydrothermalen Carbonisierung (HTC) von Grünschnitt und sich anschließender Nutzungsoptionen. In: Nelles, M. (Hrsg.): Tagungsband – 9. Rostocker Bioenergieforum. Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät. Rostock. S. 205 – 220

Clemens, A.; Döhling, F. (2015): Brennstofftechnische Charakterisierung von HTC-Kohlen. In: Thrän, D.; Pfeiffer, D. (Hrsg.): Effizient, umweltverträglich, dezentral. Neue Konzepte für die Nutzung von biogenen Festbrennstoffen Teil 3. (Schriftenreihe des Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“) Band 20. Leipzig. ISSN 2199-2762. S. 78-85

Vorträge:

Clemens, A.; Klemm, M.; Backes, M. (2012): Hydrothermal Carbonisation of organic waste. Vortrag 4th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation. Porto (Portugal). 11.09.2012

Clemens, A.; Blümel, R.; Kietzmann, F.; Klemm, M.; Nehl, D. (2012): Hydrothermale Carbonisierung – Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft. Vortrag 4. Statuskonferenz des Förderprogrammes Energetische Biomassenutzung. Berlin. 05.11.2012

Clemens, A.; Klemm, M. (2012): Die Hydrothermale Carbonisierung als sein Schlüsselprozess für die energetische Nutzung biogener Reststoffe. Vortrag KIT Kolloquium Sustainable BioEconomy. Karlsruhe. 29.11.2012

Blümel, R. (2013): Die Hydrothermale Carbonisierung als sein Schlüsselprozess für die energetische Nutzung von biogenen Rest- und Abfallstoffen. Vortrag Fachtagung Cluster Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt. Halle. 22.01.2013

Klemm, M.; Clemens, A.; Blümel, R.; Kietzmann, F. (2013): Mit hydrothormaler Carbonisierung zu innovativen Bioenergieträgern – Stand der Technik und Entwicklungsperspektiven. Vortrag Messe enertec. Leipzig. 29.01.2013

Kietzmann, F.; Klemm, M.; Blümel, R.; Clemens, A. (2013): Demonstrationsanlage für HTC-Kohle in Halle – abfallwirtschaftliche Ziele und technische Umsetzung. Vortrag 25. Kasseler Abfall- und Bioenergieforum. Kassel. 18.04.2013

Blümel, R. (2013): Vortrag 20. TIM-CONSULT Wertstoff- Seminar. Frankfurt/Main. 25.04.2013

Pfeiffer, D.; Blümel, R.; Clemens, A.; u.a. (2013): Hydrothermal Carbonisation of biomass residues from municipalities. Vortrag 21st European Biomass Conference and Exhibition. Kopenhagen. 06.06.2013

Clemens, A.; Klemm, M.; Kröger, M. (2013): Wissenschaftliche Ergebnisse des Projektes zur Hydrothermalen Carbonisierung. Vortrag Fachkonferenz zur feierlichen Inbetriebnahme der HTC-Anlage. Halle-Lochau. 01.07.2013

Clemens, A.; Klemm, M. (2013): Hydrothermal carbonisation of organic waste. Vortrag International VDI Conference - Biomass to Energy. München. 03.09.2013

Blümel, R. (2013): Vortrag VKU-Fachtagung der Kommunalen Abfallwirtschaft und Stadtreinigung VKS. Boltenhagen. 05.09.2013

Klemm, M.; Clemens, A.; Blümel, R.; Kietzmann, F. (2013): Hydrothermale Carbonisierung (HTC) biogener Reststoffe. Vortrag 10. Jahrestagung Kraftwerke. Düsseldorf. 12.11.2013

Klemm, M.; Clemens, A.; Blümel, R.; Kietzmann, F. (2014): Hydrothermale Carbonisierung (HTC) biogener Reststoffe. Vortrag LIAN Kolloquium Neue Verfahren und Materialien für die Energie- und Umwelttechnik. Zwickau.05.11.2014

Clemens, A.; Klemm, M.; Blümel, R.; Kietzmann, F. (2014): Hydrothermale Carbonisierung (HTC) – Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft. Vortrag 8. Biomasseforum. Bad Hersfeld. 05.11.2014

Kietzmann, F.; Blümel, R.; Clemens, A.; Klemm, M. (2014): Best Practise Beispiel: Hydrothermale Carbonisierung bei den Stadtwerken Halle. Vortrag HTP-Fachforum Biobasierte hydrothermale Prozesse. Leipzig. 11.11.2014

Zeymer, M., Clemens, A., Meisel, K. (2015): Technisch-ökonomisch-ökologische Analyse der hydrothermalen Carbonisierung (HTC) von Grünschnitt und Nutzungsoptionen. Vortrag 9. Rostocker Bioenergieforum. Rostock. 19.06.2015

Betreuung von studentischen Abschlussarbeiten:

Am DBFZ wurden im Rahmen des Projektes folgende Abschlussarbeiten betreut:

- Backes, M. (2012): Hydrothermale Carbonisierung von Bioabfall, Gärrest und Landschaftspflegematerial. Bachelorarbeit. Hochschule Bremen.
- Peters, M. (2013): Hydrothermale Umwandlung von Biomasse – Reaktorcharakterisierung. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden.
- Ebert, P. (2014): Untersuchungen und Optimierungen der Betriebsparameter und Produktspektren hydrothermaler Aufschlüsse im Batchreaktor. Bachelorarbeit. Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden.

Die HWS betreute im Rahmen des Projektes eine Bachelorarbeit an der Martin-Luther-Universität, Bereich Geographie, zum Thema: „Hydrothermale Carbonisierung – anlagenbezogenen Standortuntersuchung“. Die Arbeit wurde im August 2012 abgeschlossen.

Weiterer Ergebnistransfer

Der Projektleiter von Seiten des DBFZ, Herr Dr.-Ing. Marco Klemm, hat in den Wintersemestern 2012/13, 2013/14 und 2014/15 an der Universität Leipzig eine Vorlesung im Masterstudiengang Chemie „Technische Chemie der thermischen Biomassenutzung“ gehalten. Ein Themenschwerpunkt war die HTC. In diesem Zusammenhang wurden Studentenpraktika zur HTC im Technikum des DBFZ durchgeführt.

Weiterhin wurde in den Wintersemestern 2013/14 und 2014/15 an der Technischen Universität Chemnitz die Vorlesung „Thermochemische Biomasseumwandlung“ gehalten.

Weiterhin wurde im Rahmen einer Einführungsveranstaltung an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus die Grundlagen der HTC und das Projekt vorgestellt.

Am 19.07.2012 erfolgte eine gemeinsame Pressemitteilung der HWS und des DBFZ zur Vertragsunterzeichnung mit der Artec Biotechnologie GmbH über die Lieferung und den Bau der HTC-Anlage. Ein am

27.08.2012 erstellter Pressespiegel ergab 30 Presse- und Onlineartikel, die auf die Pressemitteilung aufbauen.

Infolgedessen gab es eine Anfrage des Mitteldeutschen Rundfunks einen Fernsehbeitrag über das Projekt und die Errichtung der HTC-Anlage für die Nachrichtensendung „Sachsen-Anhalt Heute“ zu drehen. Der Beitrag wurde am 11.09.2012 ausgestrahlt.

Am 01.07.2013 fand die feierliche Inbetriebnahme der HTC-Anlage mit der anschließenden Fachkonferenz „Von der Abfallgrube zur HTC-Anlage – Ergebnisse des Zusammenwirkens von Wissenschaft und Praxis“ statt. An der feierlichen Inbetriebnahme nahmen 70 Gäste, unter anderem der Minister für Landwirtschaft und Umwelt Sachsen-Anhalt, Herr Dr. Aeikens, teil. Die anschließende Fachkonferenz war mit 40 Teilnehmern besucht.

Im Rahmen der Inbetriebnahme erfolgten sowohl im Vorfeld als auch im Nachgang Pressemitteilungen der HWS und des DBFZ. Die Pressemitteilungen stießen auf ein breites Medieninteresse. Bei der Inbetriebnahme waren Vertreter von Fernsehen, Rundfunk und Presse anwesend. Anlässlich der Inbetriebnahme der HTC-Anlage hat die HWS eine Broschüre über die HTC-Demonstrationsanlage herausgegeben.

Das DBFZ ist in der VDI-Arbeitsgruppe *Biokarbonisate der Kommission der Reinhaltung der Luft im VDI* seit Dezember 2013 vertreten, womit Ergebnisse des Projektes in die Normungsarbeit des Ausschusses einfließen.

Das DBFZ und die Stadtwerke Halle waren Organisatoren und Veranstalter des HTP-Fachforums „Bio-basierte hydrothermale Prozesse – Technologien zur stofflichen und energetischen Nutzung“ am 11./12. November 2014 in Leipzig. Bei der Veranstaltung haben sich über 80 Teilnehmer zum Thema hydrothermale Prozesse ausgetauscht sowie im Rahmen einer Exkursion die HTC-Demonstrationsanlage besichtigt. Die Projektpartner haben das Projekt und dessen Ergebnisse präsentiert.

Auf Grund der gleichen Problemstellung und Suche nach Lösungen für eine optimale Verwertung kommunaler Biomassen und der Übertragbarkeit des Verwertungskonzeptes auf andere Kommunen stoßen das Projekt und die HTC-Demonstrationsanlage auf großes Interesse. Sowohl die HWS als auch das DBFZ erhalten regelmäßig Anfragen von kommunalen Entsorgern und Akteuren sowie von wissenschaftlichen Einrichtungen. Durch die HWS ist die HTC-Anlage in das Cluster Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft Halle-Lochau eingebunden. Im Rahmen der Ergebnisverbreitung wurden folgende Besichtigungen der HTC-Anlage durchgeführt:

- Minister für Wissenschaft und Wirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt, Herr Hartmut Möllring, im Rahmen des Besuchs des Standortes des Clusters Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft Halle-Lochau, 15.01.2014
- Staatssekretär im Ministerium für Wissenschaft und Wirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt, Herr Marco Tullner, 09.04.2014
- Studenten des Institutes für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 26.05.2014
- Vertreter der Fraunhofer Chile Research Foundation, 29.07.2014
- Bürgerforum Agenda 21 Schwarzenbruck, 17.10.2014

5. Literatur- und Referenzverzeichnis

- Amutio, M.; Lopez, G.; Aguado, R.; Artetxe, M.; Bilbao, J.; Olazar, M. (2012): Kinetic study of lignocellulosic biomass oxidative pyrolysis. *Fuel*. Bd. 95. S. 305–311.
- AVA-CO2 (2015): Internetpräsenz der AVA-CO2 Schweiz AG. Zug.
<http://www.ava-co2.com/web/pages/de/home.php> [zugegriffen am 21.07.2015].
- Buttmann, M. (2011): Klimafreundliche Kohle durch Hydrothermale Karbonisierung von Biomasse. *Chem. Ing. Tech.* Bd. 83 (Nr. 11). S. 1890 – 1896.
- carbonSolutions (2015): Internetpräsenz der CS carbonSolutions Deutschland GmbH. Teltow.
<http://www.cs-carbonsolutions.de/Impressum.html> [zugegriffen am 21.07.2015].
- Clemens, A.; Blümel, R.; Kietzmann, F.; Klemm, M.; Nehl, D. (2013): Hydrothermale Carbonisierung biogener Reststoffe am Beispiel der Halleschen Wasser und Stadtwirtschaft GmbH. In: Thrän, D.; Pfeiffer, D. (Hrsg.): *Neue Technologien und Konzepte für die Bioenergie der Zukunft – Konferenzband Energetische Biomassenutzung*. Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ). Leipzig. S. 239 – 246.
- DIN EN ISO 14040 (2006a): Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006), Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006.
- DIN EN ISO 14040 (2006b): Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006), Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006.
- DIN EN ISO 17225-1 (2014): Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 1: General requirements (ISO 17225-1:2014), English version EN ISO 17225-1:2014.
- DIN EN ISO 17225-6 (2014): Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 6: Graded non-woody pellets (ISO 17225-6:2014), English version EN ISO 17225-6:2014.
- Erlach, B.; Wirth, B.; Tsatsaronis, G. (2011): Co-production of electricity, heat and biocoal pellets from biomass: a techno-economic comparison with wood pelletizing. *Conference proceeding World Renewable Energy Congress*. Linköping.
- Escala, M; Zumbühl, T.; Koller, C. u.a. (2013): Hydrothermal Carbonization as an Energy-Efficient Alternative to Established Drying Technologies for Sewage Sludge: A Feasibility Study on a Laboratory Scale. *Energy Fuels*. Bd. 27. S. 454 – 460.
- Funke, A.; Ziegler, F. (2010): Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. Bd. 4 (Nr. 2). S. 160–177.
- Heilmann, S.; Jader, L.; Sadowsky, M. u.a. (2011): Hydrothermal carbonization of distillers grains. *Biomass and Bioenergy*. Bd. 35. S. 2526 – 2533.

Ingelia (2015): Internetpräsenz der Ingelia S.L. Valencia.
<http://www.ingeliahtc.com/English/plantaHTC.html> [zugegriffen am 21.07.2015].

IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jatzwauck, M; Schumpe, A. (2015): Kinetics of hydrothermal carbonization (HTC) of soft rush. Biomass and Bioenergy. Bd. 75. S. 94 – 100.

Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.) (2009): Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2., neu bearb. und erw. Aufl.. Springer. Dordrecht u.a..

Krebs, R; Baier, U.; Deller, A. u.a. (2013): Weiterentwicklung der hydrothermalen Karbonisierung zur CO₂-sparenden und kosteneffizienten Trocknung von Klärschlamm im industriellen Massstab sowie der Rückgewinnung von Phosphor. Abschlussbericht UTF 387.21.11./IDM 2006.2423.222 im Auftrag der BAFU-Technologieförderung.

Kruse, A. (2010): Hydrothermale Umwandlungsverfahren von Biomasse. Vortrag Kolloquium Sustainable BioEconomy. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Eggenstein-Leopoldshafen. 07.12.2010.

Kruse, A.; Badoux, F.; Grandl, R. Wüst, D. (2012): Hydrothermale Karbonisierung: 2. Kinetik der Biertreiber-Umwandlung. Chem. Ing. Tech. Bd. 84 (Nr. 4). S. 509 – 512.

Kruse, A.; Grandl, R. (2015): Hydrothermale Karbonisierung: 3. Kinetisches Modell. Chem. Ing. Tech. Bd. 87 (Nr. 4). S. 449 – 456.

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (2015): Statistiken zu ADAK-Wetterstationen. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften und Geographie. Halle/Saale.
<http://klima.geo.uni-halle.de/statistik/> [zugegriffen am 29.06.2015].

Mumme, J.; Eckervogt, L.; Pielert, J. u.a. (2011): Hydrothermal carbonization of anaerobically digested maize silage. Bioresource Technology. Bd. 102. S. 9255 – 9260.

Munir, S.; Daood, S.S.; Nimmo, W.; Cunliffe, A.M.; Gibbs, B.M. (2009): Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres. Bioresource Technology. Bd. 100 (Nr. 3). S. 1413–1418.

Peterson, A. A.; Vogel, F.; Lachance, R. P. u.a. (2008): Thermochemical biofuel production in hydrothermal media: A review of sub- and supercritical water technologies. Energy and Environmental Science. Bd. 1 (Nr. 1). S. 32–65.

Poerschmann, J.; Weiner, B.; Wedwitschka, H. u.a. (2014): Characterization of biocoals and dissolved organic matter phases obtained upon hydrothermal carbonization of brewer's spent grain. Bioresource Technology. Bd. 164. S. 162 – 169.

- Ramke, H.-G. (2009): Wässrige Phase aus der HTC: Zusammensetzung und Abbaubarkeit. Vortrag Fachveranstaltung: Energie und Rohstoffe aus landwirtschaftlichen Reststoffen – Hydrothermale Carbonisierung ein geeignetes Verfahren? Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI). Berlin. 05.03.2009.
- Ramke, H.-G.; Blöhse, D.; Lehmann, H.-J. u.a. (2010): Machbarkeitsstudie zur Energiegewinnung aus organischen Siedlungsabfällen durch Hydrothermale Carbonisierung. Abschlussbericht. Forschungsprojekt im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.
- Remy, C.; Warneke, J.; Lesjean, B. u.a. (2013): HTC-Check: Energiebilanz und Carbon footprint von Referenztechnologien und HTC-Prozess bei der Klärschlamm Entsorgung. Vortrag HTC-Workshop. Kompetenzzentrum Wasser Berlin (KWB). Berlin. 26.09.2013.
- Schlitt, W. (2010): Modellhaftes Zeigen der energetischen Verwertung von organischen Rest- und Abfallstoffen mit dem Verfahren der hydrothermalen Carbonisierung. Abschlussbericht. Forschungsprojekt DBU-AZ 25656 im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.
- Schuchardt, F.; Vorlop, K.-D. (2010): Abschätzung des Aufkommens an Kohlenstoff in Biomasse-Reststoffen in Deutschland für eine Verwertung über Hydrothermale Carbonisierung (HTC) und Einbringung von HTC-Kohle in den Boden. vTI Agriculture and Forestry Research. Bd. 4 (Nr. 60). S. 205–212.
- Sevilla, M.; Fuertes, A. B. (2009): The production of carbon materials by hydrothermal carbonization of cellulose. Carbon. Bd. 47 (Nr. 9). S. 2281–2289.
- SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES (2011): Ecoinvent v2.2 for umberto 5.6.
- SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES (2014): Ecoinvent v3.1 for Umberto NXT LCA.
- TerraNova (2015): Internetpräsenz der TerraNova Energy GmbH. Düsseldorf. <http://terranova-energy.com/> [zugegriffen am 21.07.2015].
- Thrän, D.; Pfeiffer, D.; Adler, P. u.a.; Thrän, D.; Pfeiffer, D. (Hrsg.) (2013): Methodenhandbuch Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte, Schriftenreihe des BMU-Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“. Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ). Leipzig.
- Vamvuka, D.; Sfakiotakis, S. (2011): Combustion behaviour of biomass fuels and their blends with lignite. In: Thermochimica Acta. Bd. 526 (Nr. 1-2). S. 192–199.
- Vogt, R.; Fehrenbach, H.; Wiegel, U. u.a. (2012): Maßnahmenplan zur Umsetzung einer vorbildhaften klimafreundlichen Abfallentsorgung im Land Berlin. Endbericht. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu). Heidelberg.
- Wittmann, T. (2015): FLUHKE – Flugstromvergasung mit Biokohlen aus der hydrothermalen Karbonisierung zur dezentralen Energiebereitstellung von Strom- und Wärme mit einem Motor-BHKW. In: Thrän, D.; Pfeiffer, D. (Hrsg.): Wärme aus Biomasse: Effiziente dezentrale und emissionsarme

Konzepte für Kraft-Wärme-Kopplung und Kleinfeuerungsanlagen. Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ). Leipzig. S. 30 - 31.

Zeymer, M. (2015): Gestehungskosten und THG-Vermeidungskosten. In: DBFZ (Hrsg.): Kleintechnische Biomassevergasung – Option für eine nachhaltige und dezentrale Energieversorgung. Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ). Leipzig. S. 74 - 98.

Zeymer, M., Clemens, A., Meisel, K. (2015): Technisch-ökonomisch-ökologische Analyse der hydrothermalen Carbonisierung (HTC) von Grünschnitt und sich anschließender Nutzungsoptionen. In: Nelles, M. (Hrsg.): Tagungsband – 9. Rostocker Bioenergieforum, Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät. Rostock. S. 205 - 220.

III. Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Integrierte Verwertungsanlage und Strategie für kommunale Biomasse – HTC Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Blümel, Regina Clemens, Andreas Döhling, Frank Kietzmann, Falko Klemm, Marco Meisel, Kathleen Zeymer, Martin	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2014
	6. Veröffentlichungsdatum 30.11.2015 (geplant)
	7. Form der Publikation Elektronische Übermittlung des Schlussberichts
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ), Torgauer Str. 116, D - 04347 Leipzig Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft GmbH Bornknechtstraße 5 06108 Halle (Saale)	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen FKZ 03KB049A und FKZ 03KB049B
	11. Seitenzahl 75
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin	13. Literaturangaben 41
	14. Tabellen 15
	15. Abbildungen 22
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich GmbH Postfach 10923 Berlin	
18. Kurzfassung Ziel des durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projektes „Integrierte Verwertungsanlage und Strategie für kommunale Biomasse – HTC Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft“ ist die Bereitstellung alternativer Biomasse-Festbrennstoffe durch die Erschließung und effiziente Nutzung biogener Reststoffe mit Hilfe der Hydrothermalen Carbonisierung (HTC). Die Projektpartner, die Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft GmbH (HWS) und die Deutsche Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ), haben ein integriertes Verwertungskonzept entwickelt, dass auf Grund der ähnlichen Problemstellungen auf eine Vielzahl anderer Kommunen übertragbar ist. Um die Verfügbarkeit der bei der HWS anfallenden, biogenen Reststoffströme (Kommunaler Grünschnitt, Bioabfall und Gärrest) und deren Qualität zu ermitteln, wurden diese Stoffströme über einen Zeitraum von einem Jahr beprobt und deren chemische und brennstofftechnische Eigenschaften analysiert. Ergänzend wurden am DBFZ umfangreiche Laboruntersuchungen durchgeführt, um die Eignung der genannten Stoffströme für die HTC zu beurteilen und den Einfluss der Prozessparameter auf den Carbonisierungsprozess zu untersuchen. Die HTC-Kohlen wurden brennstofftechnisch analysiert und mittels STA untersucht. Die HTC-Demonstrationsanlage mit einer Jahreskapazität von 2.500 Mg/a wurde auf dem Gelände der Deponie Halle-Lochau errichtet. Das integrierte Verwertungskonzept wurde abschließend ökologisch und ökonomisch bewertet.	

19. Schlagwörter Hydrothermale Carbonisierung, Biogene Reststoffe und Abfallstoffe, Festbrennstoffe, Demonstrationsanlage, Bewertung, Ökonomie, Ökologie, THG-Vermeidungskosten	
20. Verlag -	21. Preis -

BMBF-Vordr. 3831/03.07_2