



„TorfausHanf“

Stoffliche Nutzung verfügbarer organischer Produktionsreststoffe aus der Hanfproduktion - Bereitstellung von Torfersatz und Analyse weiterer Alternativen

Projekt-Nr.: 2016 LFE 0014



Kooperationsvertreter: **VOFA Vogtlandfaser GmbH & Co. KG**
Hainweg 11
07973 Zeulenroda Triebes

Projektpartner:

- LAWO Agrar GmbH
- Gemes Abfallentsorgung und Recycling GmbH
- ai-s Architekten und Ingenieure Seiffert
- Deutsches BiomasseForschungszentrum gGmbH
- Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft & Energie



Inhalt

1	Zusammenfassung.....	4
1.1	Hintergrund und Ziele im Vorhaben	4
1.2	Zusammenfassung der Projektergebnisse	4
2	Summary	5
2.1	Background and Goals of the Project.....	5
2.2	Summary of the Project Results.....	5
3	Analyse, Einordnung und Charakterisierung der Ausgangsstoffe	6
3.1	Zieldefinition und Methodik	6
3.2	Rohstoffquellen und Schwankungen	7
3.3	Verwertbarkeit - Verpackung und Biokunststoffe	7
3.4	Verwertbarkeit - Substrat- und Erdenherstellung	8
4	Analyse möglicher hochwertiger Nutzungswege	9
4.1	Recherche und Bewertung der bisher realisierten Verfahren zur Nutzung.....	9
4.2	Nutzung für die Energiebereitstellung	10
4.3	Nutzung in Substrat- und Erdenherstellung.....	11
4.4	Nutzung für Verpackungsmaterial, Biokunststoffe und Faserverbundwerkstoffe	12
5	Technische Machbarkeit der Herstellung von Torfersatzstoffen	12
5.1	Auswertung der HTC-Laboranalysen in Bezug auf die Feststoffeigenschaften.....	12
5.2	Machbarkeit der anaeroben Vergärung des HTC-Prozesswassers	14
6	Erarbeitung eines Verfahrenskonzeptes für die Herstellung von Torfersatzstoffen	17
6.1	Verfahrensvorschlag für die HTC-Anlage	17
6.2	Verfahrensvorschlag für die Nutzung der flüssigen Reststoffe.....	19
6.3	Ausarbeitung eines Betriebs- und Nutzungskonzeptes	19
7	Standortanalyse.....	19
7.1	Entwicklung von Szenarien zur lokalen Integration in den Standort Pahren.....	19
7.2	Entwicklung von Szenarien zur lokalen Integration in den Standort Saalfeld.....	20
7.3	Gegenüberstellung der Standorte	21
8	Investitionsvorbereitung für die Pilotanlage	22



8.1	Marktanalyse	22
8.2	Energieverbräuche HTC-Anlage	23
8.3	Risikoanalyse.....	24
9	Ökonomische und ökologische Bewertung der Machbarkeit	24
9.1	Ökonomische Bewertung der Machbarkeit	24
9.2	Sensitivitätsanalyse.....	27
9.3	Ökologische Bewertung der Machbarkeit	28
10	Schlussfolgerungen	30
	Anhänge	32



1 Zusammenfassung

1.1 Hintergrund und Ziele im Vorhaben

Die Pahren Agrar Kooperation beabsichtigt den Ausbau der Produktion und Verarbeitung von Hanf für die stoffliche Nutzung. Bei der Verarbeitung am Standort Läwitz werden Fasern und Schäben in hoher Qualität hergestellt. Bei der Produktion fallen – bezogen auf das Ausgangsprodukt – ca. 25 % Produktionsreststoffe an, die eine wirtschaftliche Nutzung erfordern, um einen Ausbau der Produktionskapazitäten zu realisieren. Vor diesem Hintergrund ist das Ziel, einen hochinteressanten und zukunftsfähigen Nutzungsweg für die Reststoffe der Hanffaserproduktion zu erschließen. Dazu sollen mögliche alternative Nutzungswege für die Reststoffe analysiert und die technische Machbarkeit der Produktion von Torfersatz aus den Produktionsresten im Vergleich mit anderen Alternativen sowie die potenziellen Absatzmöglichkeiten und die dafür erforderlichen Produkteigenschaften untersucht werden.

1.2 Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im Vorhaben wurden verschiedene Reststofffraktionen aus der Hanffaserproduktion im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit als in erster Linie Torfersatzstoff sowie als Zusatzstoff in der Verpackungs- und Biokunststoffherstellung bewertet. Zu den untersuchten Fraktionen gehörten ein Faser-Schäben-Gemisch, die reinen Schäben und das unbehandelte Hanfstroh. Eine Verwendung der Reststoffe zur Herstellung von Verpackungen und Biokunststoffen musste aufgrund der physischen Eigenschaften (insbesondere hoher Schäbenanteil) frühzeitig ausgeschlossen werden. In Bezug auf die Bereitstellung von Torfersatzstoffen aus den Reststoffen der Hanffaserproduktion konnte zwar die technische Machbarkeit grundsätzlich aufgezeigt werden, gleichzeitig wurden aber eine Reihe technischer und ökonomischer Herausforderungen identifiziert, welche einer praktischen Umsetzung zur Verwendung der Reststoffe als Torfersatzstoff im Wege stehen. Hierzu gehören insbesondere:

- Die Verletzungsgefahr durch scharfkantige Schäben und die Neigung zur Verpilzung bedingen eine weitere Behandlung der Reststoffe vor dessen Verwertbarkeit als Torfersatz.
- Die Neigung zur Verpilzung bedarf eines zusätzlich zur im Vorhaben durchgeführten hydrothermalen Carbonisierung weiteren Behandlungsschrittes (Kompostierung), welcher mit zusätzlichem Aufwand verbunden ist.
- Die Ergebnisse der wirtschaftlichen Betrachtung haben gezeigt, dass die Bereitstellungskosten die Zahlungsbereitschaft für Torfersatzstoffe übersteigen.

Diesen Herausforderungen entgegen steht das im Vorhaben aufgezeigte Potenzial zur Einsparung von Treibhausgasemissionen bei der Substitution herkömmlicher Torfersatzstoffe durch die Reststoffe aus der Hanffaserproduktion (für den untersuchten Standort mit 1.000 t Hanfstroh pro Jahr: ca. 100 t CO₂ pro Jahr, gegenüber TEFA als Torfersatz). Darüber hinaus konnten im Projekt die grundsätzliche technische Machbarkeit der hydrothermalen Carbonisierung der Reststoffe zur Verbesserung der stofflichen Eigenschaften im Hinblick auf dessen Verwendung als Torfersatzstoff sowie die anaerobe Behandlung des bei der Carbonisierung anfallenden Prozesswassers nachgewiesen werden. Letztendlich erlauben aber die aufgezeigten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen keine großtechnische Umsetzbarkeit des untersuchten Verwertungspfades zur Bereitstellung von Torfersatzstoffen aus der Hanffaserproduktion.



2 Summary

2.1 Background and Goals of the Project

The Pahren Agrar cooperation intends to expand the production and processing of hemp for material use. During processing, high quality fibres and hurds are produced at the the Lăwitz facility. During production, there are nearly 25% production residue – based on the base product – that require economic use, in order to realize an expansion of production capacity.

With this in mind, the goal is to develop a highly interesting and sustainable utilization pathway for the residues of hemp fiber production. For this purpose, possible alternative routes of use for the residual materials were to be analyzed and the technical feasibility of producing peat substitute from the production residues compared to other alternatives. In addition, the potential market and the required product properties were to be investigated.

2.2 Summary of the Project Results

In the project, various residual fractions from hemp fiber production were evaluated with regard to their usability primarily as peat substitute and as an additive in packaging and bioplastics production. The fractions tested included a fiber-hurd mixture, the pure hurds and the untreated hemp straw. The use of residual materials for the production of packaging and bioplastics had to be excluded at an early stage due to their physical properties (in particular the high percentage of hurds). Although the technical feasibility of providing peat substitute from the residues of hemp fiber production was demonstrated, a number of technical and economic challenges were identified, which stand in the way of practical implementation for the use of the residual material as peat substitute. In particular these include:

- The risk of injury from sharp-edged hurds and the tendency of developing fungal infections necessitate further treatment of the residues before they can be used as peat substitutes.
- Due to the tendency of developing fungal infections, a further processing step (composting) is required in addition to the hydrothermal carbonization carried out in the project, which is associated with additional effort.
- The results of the economic analysis have shown that the cost for providing peat substitute exceeds the amount that customers are willing to pay.

However, these challenges are counteracted by the potential shown in the project to reduce greenhouse gas emissions by replacing conventional peat substitutes with residual materials from hemp fiber production (for the investigated site with 1,000 t of hemp straw per year: approx. 100 t CO₂ per year, compared to TEFA as peat substitute). In addition, the project demonstrated the fundamental technical feasibility of the hydrothermal carbonization of the residuals to improve their material properties with regard to their use as a peat substitute as well as the anaerobic treatment of the process water produced during carbonation. Ultimately, however, the described economic framework conditions do not allow for large-scale feasibility of the examined recovery path for providing peat substitutes from hemp fiber production.

3 Analyse, Einordnung und Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Im Folgenden werden die verschiedenen Reststofffraktionen analysiert und insbesondere in Bezug auf dessen Verwertbarkeit in den im Vorhaben betrachteten Nutzungswegen eingeordnet.

3.1 Zieldefinition und Methodik

Ziel ist die Charakterisierung der Ausgangsstoffe, d.h. der Reststoffe aus der Hanffaserproduktion und des Hanfs an sich, im Hinblick auf ihre Verwertbarkeit entsprechend der als vielversprechend identifizierten Nutzungswege:

- a) Verpackung und Biokunststoffe
- b) Substrat und Erdenherstellung

In diesem Kapitel schließt dies noch nicht eine Behandlung der Ausgangsstoffe mittels HTC ein sondern adressiert dessen direkte Nutzung.

Um die Ausgangsstoffe diesbezüglich bewerten zu können müssen entsprechend des Verwertungsziels folgende Kriterien überprüft werden:

- a) Verpackung und Biokunststoffe:

Kriterien	Zielwerte
<ul style="list-style-type: none"> • Schäbengehalt • geringe Dichte 	< 1 bis 2 % < 2,45 g/cm ³
<ul style="list-style-type: none"> • hohe Dehnfähigkeit • geringe Splitterneigung • niedrige Herstellungskosten 	

- b) Substrat- und Erdenherstellung:

Tabelle 1: Kriterien und Zielwerte für Torfersatzstoffe zur Substrat- und Erdenherstellung, Quelle: Gramoflor

Kriterien	Zielwerte
Chemische Eigenschaften	
<ul style="list-style-type: none"> • pH Wert • N-Fixierung • Salzgehalt • Nährstoffgehalt • Schwermetallbelastung 	3,5 - 6,5 (stabiler pH Wert trotz schwankender Außenbedingungen) möglichst gering < 1 g/l möglichst gering: N:P:K (1:0,5:1) möglichst keine
Physikalische Eigenschaften	
<ul style="list-style-type: none"> • Luftkapazität • Wasserkapazität 	zw. 15-30% zwischen 450-650g/100g TM

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Restfeuchte• Homogenität• Wiederbenetzbarkeit• Volumengewicht | <p>möglichst gering (für optimale Lagerfähigkeit)
(wenn sich das Material auch bei höheren Wassergehalten nicht verändert sind auch bis 40% Restfeuchte i.O.);</p> <p>(möglichst einheitliche „Körnung“/Fraktionierung)</p> <p>möglichst gute</p> <p>< 400 kg / m³</p> |
|--|--|

Biologische Eigenschaften

- Neigt nicht zum Verpilzen
- geringe Abbaubarkeit von Mikroorganismen
- Wenig/keine Geruchsbildung
- Frei von Krankheitserregern (Pilze (Phytophthora,...); Bakterien (Feuerbrand,...); Viren, Mykoplasmen, tierische Schaderreger (Nemathoden,...); keinerlei Humanpathogene (Botulismuserreger, E coli,...)
- Keine Wuchs- und Keimhemmenden Stoffe (Gerbstoffe, flüchtige Aromaten, Phenole, quartäre Amoniumverbindungen...)

Weitere Anforderungen:

- Oberfläche nicht leicht Abbaubar, d.h. kein Nährboden für Schadpilze und Erreger
- Möglichst wenig Schrumpfungs-/ Zersetzungspotential (Wunschvorstellung: Langzeitstabilität)
- Lagerfähigkeit (keine Verpilzung, Selbsterwärmung, Mineralisierung, Eigenkompostierung)
- Möglichst geringe Veränderung des Materials während der Lagerung
- Rohstoffe idealerweise 100% „natürlich“ z.B.: Landschaftspflegematerial und keine Reststoffe

3.2 Rohstoffquellen und Schwankungen

Rohstoff für die Produktion ist das Hanfstroh. Es wird nach einer Feldröste vornehmlich im März geerntet. Die Qualität hängt insbesondere von der Dichtigkeit und Gleichmäßigkeit des Bestandes ab. Hin und wieder sind Unkrautbeimengungen nachteilig für die Qualität der Endprodukte. Zurückzuführen ist das auf Aussaatstärke, Düngung und Niederschlagsintensität sowie auf Bodenverdichtungen. Unterschiedliche Sorten führen zum Teil auch zu mehr schwachen oder stärkeren Stängel, deren Einfluss aber gering ist. Hauptproblem ist die Feuchtigkeit des Strohs. Bei unsachgemäßer Aufbereitung (Wenden, Schwaden) sowie unzureichender Lagerung (z.B. Feldmieten) entstehen Auswirkungen auf den Verarbeitungsprozess und die Produktqualität. Die optimale Strohfeuchte liegt bei 84 % bis 86 % Trockensubstanz. Die Ernte im Frühjahr bietet bessere Voraussetzungen für die Erzielung der optimalen Strohfeuchte und dem Röstegrad. Gut geröstetes Stroh lässt sich besser verarbeiten. Neben der Feuchte sind die Beimengungen von Steinen und Staub sowie die Strohlänge entscheidend für den Verarbeitungsprozess.

3.3 Verwertbarkeit - Verpackung und Biokunststoffe

Naturfasern als Rohstoffe für Naturfaserverbundwerkstoffe eingesetzt, besitzen eine Reihe von Eigenschaften, die sie als Werkstoff interessant machen:

- geringere Dichte als Glasfasern o. mineralische Füllstoffe → deutliche Gewichtsersparnis eines Bauteils (bei entsprechend hohem Faservolumenanteil)
- hohe Dehnfähigkeit → Verbesserung der oft geringen Schlagzähigkeit
- aus medizinischer Sicht weniger bedenklich → verbesserte Arbeitssicherheit
- geringere Neigung zum Splintern als glasfaserverstärkte Kunststoffe
- unabhängig vom stark schwankenden Erdölpreis → bessere Planung der Herstellkosten
- niedrigere Herstellungskosten → weniger Energie in der Herstellung als Glas- oder Kohlenstofffasern und damit deutlich verbesserte CO₂-Bilanz der Werkstoffe
- Naturfasern verbrennen fast CO₂-neutral und rückstandsfrei
- bessere Verarbeitung dieser Werkstoffe → geringerer abrasiver Verschleiß im Werkzeug
- Verkürzung der Zykluszeiten in der Produktion u. geringerer Energieverbrauch bei der Verarbeitung --> wegen der notwendigen Reduktion der Verarbeitungstemperaturen

Einige der genannten Eigenschaften, wie z.B. die geringe Dichte oder die bessere Verarbeitung, sind auch bei den Produktionsreststoffen aus der Hanffaserproduktion zu finden. Diese machen Sie für einen Einsatz als Zuschlagstoff für Verpackungsmaterialien oder für Biokunststoffe/Faserverbundwerkstoffe interessant.

Ein entscheidendes Kriterium für die Verarbeitung von Naturfasern ist aber ein geringer Schäbengehalt von weniger als ein bis zwei Prozent, da die Schäben die weitere Verarbeitung stören können - bis hin zu sichtbaren Oberflächenstörungen im fertigen Produkt. Die Reststofffraktion aus der Hanffaserproduktion mit den reinen Schäben kann aufgrund dieses Kriteriums nicht eingesetzt werden. Der Gehalt in den weiteren untersuchten Hanfproduktionsreststoffen ist jedoch auch beim Faser-Schäben-Gemisch mit 38 % Schäbengehalt noch viel zu hoch.



Abbildung 1: Geschirr aus Biokunststoff [www.biooekonomie.de, Bundesministerium für Bildung u. Forschung] und PkW mit naturfaserverstärkten Formpressteilen [www.hanfkultur.com]

3.4 Verwertbarkeit - Substrat- und Erdenherstellung

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die für die Substrat- und Erdenherstellung relevanten Parameter der Reststoffe aus der Hanffaserproduktion.

Anhand der aufgezeigten Werte ist zu erkennen, dass sich die untersuchten Reststoffe Faser-Schäben-Gemisch und Feinschäben aus der Hanffaserproduktion für die Substrat- und Erdenherstellung eignen.

Tabelle 2: Relevante Parameter für die Substrat- und Erdenherstellung aus den Reststoffen aus der Hanffaserproduktion, Quelle: GEMES

Parameter/ Stoff	pH- Wert	Wasser- gehalt [Ma.-%]	Salz- gehalt g/l OS	N (CaCl ₂) [mg/l OS]	P (P ₂ O ₅) [mg/l OS]	K (K ₂ O) [mg/l OS]	max. Wasser- kapazität [Vol-%]	Schwermetalle [mg/ kg TS] (Grenzwerte nach BioAbfV)						
								Pb 100	Cd 1,0	Cr 70	Cu 70	Ni 35	Hg 0,7	Zn 300
Zielwerte	3,5 - 6,5	< 40	< 1	möglichst gering N:P:K (1:0,5:1)				möglichst keine Schwermetallbelastung						
Torf	3,5 – 4,5	< 25	< 0,4	< 50	< 30	< 40	60 - 87							
Faser- Schäben- Gemisch	6,9	10,8	0,02	5	215	113	70,0	<2,0	<0,1	<1	2,9	1,1	0,017	9,3
Feinschäben	6,9	10,5	0,36	37	1160	611	42,5	3,7	<0,1	8,8	7,9	6,3	0,02	30

4 Analyse möglicher hochwertiger Nutzungswege

4.1 Recherche und Bewertung der bisher realisierten Verfahren zur Nutzung

Reststoffe der Hanffaserproduktion wurde bisher hauptsächlich als Tiereinstreu abgesetzt.

Es handelt sich um:

- Schäben
- Feinschäben (Hanfstrohmehl)
- Kurzfaser-Schäben-Gemisch

Gereinigte Hanfschäben finden als Tiereinstreu sowie in der Baustoffindustrie Absatz.

Die Nutzung als Tiereinstreu erfolgt:

- bei Pferden
- bei Kaninchen

- Nagern

Die Nutzung in der Bauindustrie erfolgt hauptsächlich im Lehmbau:

- Kalk-Lehm-Schäben-Gemisch für Putze
- Hauptbestandteil von Verbundplatten im Trockenbau
- Schütt- und Schalldämmungen

Die Feinschäben werden auch als Tiereinstreu in der Milchviehhaltung eingesetzt. Durch einen relativ hohen Staubgehalt ist die Nachfrage sehr gering.

Versuche zur Verarbeitung als Brennstoff (pelletiert) fanden bisher keine Zulassung.

Kurzfaser-Schäben-Gemische finden kaum einen Markt. Gelegentlich gibt es Nutzer

- im privaten Baubereich als Stopfhanf
- im Tiereinstreubereich für Tiefliegeboxen der Rinder

4.2 Nutzung für die Energiebereitstellung

Grundsätzlich ist eine Eignung der Reststoffe der Hanfproduktion für eine direkte energetische Nutzung denkbar. Die Reststoffe weisen mit ca. 10% einen sehr geringen Wassergehalt auf, der eine Nutzung in Verbrennungsprozessen nahelegt. Da es sich um keinen Regelbrennstoff handelt ist die Verwendung nur als Zuschlagstoff für Verbrennungsprozesse denkbar. Die Energiedichte ist allerdings sehr gering. Damit kann aus den Erfahrungen mit Betreibern von Verbrennungsanlagen geschlossen werden, dass sich mit der Nutzung der verschiedenen Stoffströme kein Gewinn erzielen lässt. Mit großer Wahrscheinlichkeit führt die Tatsache, dass es sich um Reststoffe aus einem Produktionsprozess handelt, dazu dass der aktuelle Besitzer für die Verwertung in einer Verbrennungsanlage einen Entsorgungserlös erwartet.

Gleichfalls ist die Verwendung der Reststoffe als Co-Substrat in einer Biogasanlage analog zu Stroh denkbar. Die Fasern weisen einen sehr hohen Ligninanteil analog zu Stroh auf und dürften unter anaeroben Bedingungen nur zu einem kleinen Teil biologisch zu Biogas umsetzbar sein. Darüber hinaus sind aber die sehr stabilen Fasern als kritisch für die Anlagentechnik anzusehen (Verzopfung an Rührwerken und Pumpen). Eine Vorbehandlung in Zerkleinerungsaggregaten wäre erforderlich, um dieses Risiko zu reduzieren. Allein die Staubfraktion könnte zu anderen Substraten untergemischt problemlos eingesetzt werden. Analog zur Verbrennung ist aber nicht zu erwarten, dass ein relevanter Erlös erzielt werden kann.

In den bestehenden Anlagen der Agrarkooperation Pahren ist der Einsatz jedoch nicht möglich, da der Reststoff nicht in der Positivliste des EEG aufgeführt wird. Damit ist ein Einsatz nur in Abfall-Biogasanlagen möglich, die aber die Annahme üblicherweise an die Zahlung einer Entsorgungsgebühr koppeln.

Der Heizwert für die Verbrennung und die zu erwartenden Biogausausbeute für die direkte Nutzung als Co-Substrat in Biogasanlagen wurden in diesem Vorhaben nicht weiter untersucht. Dies ist auf den Fokus des Vorhabens auf hochwertigere Nutzungswege zurückzuführen, die einen relevanten monetären Ertrag für die Reststoffe bzw. Behandlungsprodukte der Reststoffe erzielen sollen.



4.3 Nutzung in Substrat- und Erdenherstellung

Die Verwendungsmöglichkeiten für Torfersatzstoffe wie Reststoffe aus der Hanffaserproduktion in der Substrat- und Erdenherstellung sind breit gefächert. Abbildung 2 gibt einen Überblick.

Die Einkaufspreise für Torf liegen nach Angaben von Substrat- u. Erdenherstellern (z.B. Fa. Floragard, Fa. Ziegler, Fa. Gemes, Fa. Voigteier) bei durchschnittlich ca. 85 €/t¹ und Torfersatzstoffe werden von den in der Abbildung 2 genannten Firmen für die Produktion von verschiedenen Substraten für 10 €/t bis 42 €/t² eingekauft. Dabei spielen die Stoffparameter der Torfersatzstoffe und ihre Verwendungsfähigkeit eine Rolle. Bei sehr geeigneten Torfersatzstoffen, bei welchen die Stoffeigenschaften auch sehr hohe Anforderungen erfüllen, werden vereinzelt auch bis zu 40 € je m³³ gezahlt.

Die untersuchten Reststoffe der Hanfproduktion weisen jedoch mit einem zu hohen pH-Wert und bei den Feinschäben einer geringen max. Wasserkapazität Stoffeigenschaften auf, welche die sehr hohen Anforderungen nicht erfüllen können. Darüber hinaus wurden von Spezialerdenherstellern Probleme darin gesehen, dass die in den Reststoffen der Hanfproduktion enthaltenen Schäben zu Verletzungen im Bereich der Finger bei Greifkontakt führen können. Diese Stoffeigenschaft würde einen Einsatz bei der Herstellung von Kultursubstraten im Produktionsgartenbau sowie für Blumenerden im Hobbygartenbau nach jetzigem Kenntnisstand größtenteils ausschließen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass aufgrund der Stoffeigenschaften ein direkter Einsatz der Reststoffe als Torfersatzstoff für die Substrat- und Erdenherstellung nur sehr eingeschränkt möglich ist.

¹ Entspricht ca. 10 €/m³ im Falle des Faser-Schäben-Gemisches (120kg/m³)

² Entspricht ca. 1 bis 5 €/m³ im Falle des Faser-Schäben-Gemisches (120kg/m³)

³ Entspricht ca. 330 €/t im Falle des Faser-Schäben-Gemisches (120kg/m³)

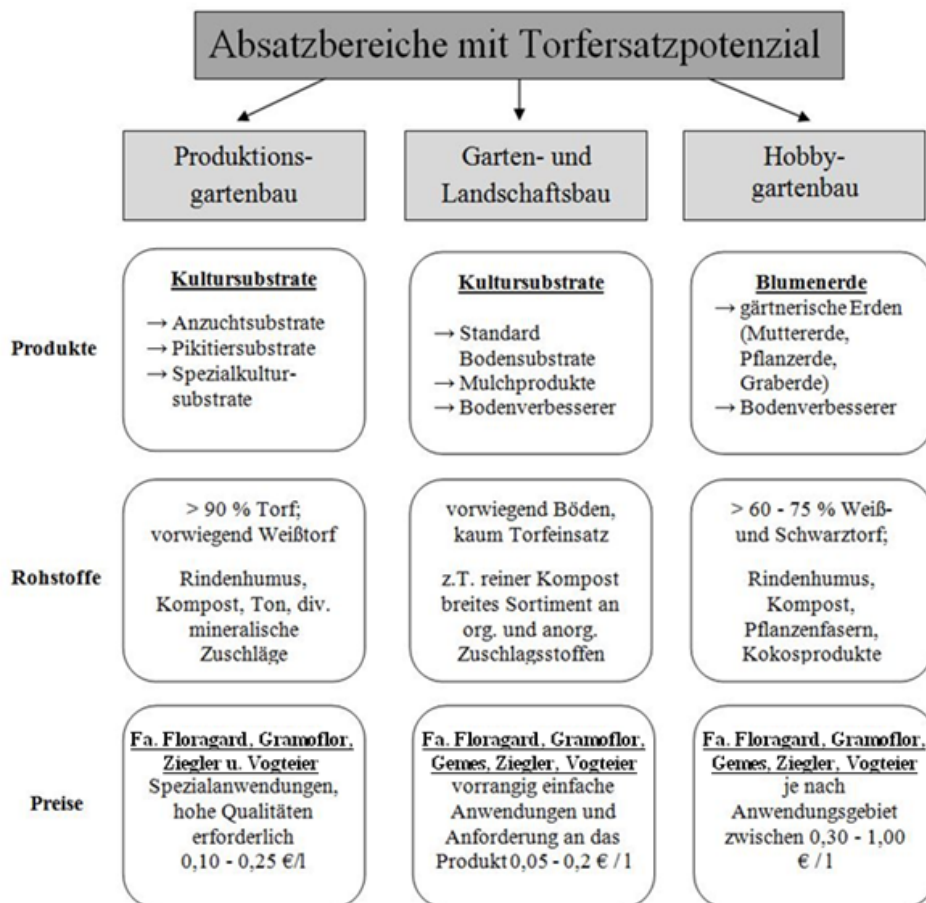


Abbildung 2: Absatzbereiche mit Torfersatzpotenzial, Quelle: GEMES

4.4 Nutzung für Verpackungsmaterial, Biokunststoffe und Faserverbundwerkstoffe

Aufgrund des hohen Schäbenanteils in den relevanten Reststoffen ist wie in Kapitel 3.2 ausgeführt die Nutzung der Reststoffe aus der Hanffaserproduktion für Verpackungsmaterial, Biokunststoffe und Faserverbundwerkstoffe ungeeignet.

5 Technische Machbarkeit der Herstellung von Torfersatzstoffen

5.1 Auswertung der HTC-Laboranalysen in Bezug auf die Feststoffeigenschaften

Die bereitgestellten Reststoffe aus der Hanfverarbeitung (Edukte) wurden in Labor- und Technikumsanlagen des Deutschen Biomasseforschungszentrums gemeinnützige GmbH (DBFZ) hydrothermal carbonisiert (Hydrothermale Carbonisierung – HTC). Dazu wurden die festen unvorbehandelten Edukte in unterschiedlichen Verhältnissen mit dem Reaktionsmedium Wasser angemischt. Die Mischungsverhältnisse der aussichtsreichsten HTC Proben lagen bei folgenden Zusammensetzungen (vergleiche hierzu Tabelle 3).

Darauf aufbauend wurden die Mischungen in HTC-Reaktoren gegeben und über vorab definierte Verweilzeiten und -temperaturen behandelt.

Die Verweilzeiten der einzelnen Versuche wurden zwischen 0,5 und 3 h variiert. Die Prozesstemperaturen wurden verhältnismäßig mild zwischen 160 bis 220°C variiert.

Tabelle 3: Zusammensetzungen der Eingangsstoffe Hanf-Wasser

Biomasse	Material-Nr.	Input			
		TS [% _{FM}]	BM [g]	Einwaagen Wasser [g]	TS _{Reaktor} [% _{FM}]
HRS	BR-01674	88,9	20,0	319,0	5,2
HRS	BR-01674	88,9	30,0	224,4	10,5
HRS	BR-01674	88,9	30,0	97,2	21,0
HRS	BR-01674	88,9	30,0	54,7	31,5
HRS	BR-01674	88,9	30,0	33,6	42,0

Nach einer ersten visuellen Einschätzung der Produkte sind Verweilzeiten von 30 min bei Prozesstemperaturen von 160 °C besonders aussichtsreich und ermöglichen eine vielversprechende Faserstruktur in dem carbonisierten Feststoff. Aus diesen Prozessbedingungen ergaben sich Slurrysuspensionen mit folgenden Bandbreiten und Zusammensetzungen (vergleiche hierzu Tabelle 4).

Tabelle 4: Zusammensetzungen der HTC-Slurry

Slurry [g]	HTC-Kohle			HTC-BW [g]	HTC-Gas [mL]
	[g]	TS [% _{FM}]	[g _{TS}]		
331,0	109,8	14,1	15,4	217,4	100,0
246,8	168,6	14,3	24,2	75,2	50,0
123,5	122,4	20,5	25,1	0,0	70,0
81,9	81,3	30,8	25,1	0,0	50,0
60,5	60,3	38,0	23,0	0,0	340,0

Die pH-Werte der untersuchten Slurrychargen lag zwischen 4,0 und 4,5.

Die carbonisierten Materialien wurden anschließend mittels Filtration entwässert und in einem Trockenschrank auf den Trockensubstanzgehalt von 90 % getrocknet.

Unter Berücksichtigung der Textureigenschaften ist das Material für die Nutzung als Torfersatzstoff geeignet. Ebenso positiv ordnet sich der pH-Wert ein, welcher sich im leicht sauren Milieu bewegt.

Nicht vielversprechend erscheint jedoch insbesondere bei den Schäben die gegebene Härte des Materials auch nach der Carbonisierung. Nach Rücksprache mit Spezialerdherstellern wurden Zweifel angemeldet, dass das Material zu Verletzungen im Bereich der Finger (bei Greifkontakt) führen kann. Vor diesem Hintergrund wurden am DBFZ Versuche in zweistufiger Fahrweise durchgeführt, wobei ähnlich der Flachsfaseraufbereitung eingangs das Edukt mit Wasser gekocht und anschließend bei höherer Temperatur carbonisiert wurde. Die Ergebnisse nach der zweistufigen HTC waren derart, dass das Material deutlich weicher war und damit die mögliche Verletzungsgefahr reduziert wurde.

Ebenfalls beeinträchtigend ist die Verpilzung des carbonisierten Materials in Mischungen mit Erde.

Sogenannte Topfversuche, bei denen das Substrat als Reinsubstrat und in Mischung mit Substraterde bei unterschiedlichen Feuchtegehalten in Töpfen gegeben und beobachtet wurde, zeigten bei nahezu allen Fraktionen (insbesondere: Hanfstroh (carbonisiert), Hanfschäben fein, Hanfschäben grob, Substratmischung Hanfschäben fein) eine Verpilzung des Materials (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3: Pilzwachstum im Topfversuch, Quelle: Frerichs

Laut einer Studie zur phytotoxischen Wirkung von HTC-Kohlen⁴ kann durch die Kompostierung die Neigung zur Verpilzung reduziert werden. Dieser Sachverhalt ist näher zu untersuchen jedoch im Projektumfang nicht vorgesehen und müsste separat untersucht werden.

Die Ergebnisse weisen nach dem gegenwärtigen Stand der Untersuchungen keine Besonderheiten auf. Außergewöhnlich war bei der zweistufigen Versuchsweise (Stufe 1 Kochen, Stufe 2 Carbonisierung), dass die Einwaage des Feststoffanteils signifikant geringer sein muss als bei einer reinen einstufigen Carbonisierung. Die Begründung dazu ist evtl. einem veränderten Quellverhalten bei Temperaturen von ca. 100 °C zu suchen. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass der Reaktorinhalt bei diesen Temperaturen in einer turbulenten Bewegung ist.

5.2 Machbarkeit der anaeroben Vergärung des HTC-Prozesswassers

Um die Machbarkeit des Einsatzes von HTC-Prozesswasser in einer Biogasanlage zu untersuchen wurden Laboruntersuchungen des Prozesswassers hinsichtlich seiner Zusammensetzung, der Vergärbarkeit und des Gehaltes an kritischen Inhaltsstoffen vor und nach den Vergärungstests durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengefasst.

⁴ Busch et al. (Busch D., Kammann C. I., Stark A., Glaser B. (2012): Environmental risk evaluation of hydrochars and biochars: Phytotoxic compounds of some HTC materials can be biologically degraded. US Biochar Konferenz Sonoma Valley, Kalifornien Hydrothermale Carbonisierung – Einsatzmöglichkeiten und Potentiale (PDF Download Available). Available from: https://www.researchgate.net/publication/277850182_Hydrothermale_Carbonisierung_-_Einsatzmöglichkeiten_und_Potentiale [accessed Aug 15, 2017].)

Tabelle 5: Analyseergebnisse Zusammensetzung HTC-Abwasser

Probe			
	TS [% _{FM}]	oTS [%TS]	CSB in mg/l
HTC-Abwasser vor der Vergärung	1,281	81,01	21759

Tabelle 6: Analyseergebnisse Inhaltstoffe HTC-Abwasser

Probe	Catechol mg/l	Guajacol mg/l	Phenol mg/l	Kresol mg/l	HMF mg/l	Furfural mg/l
HTC-Abwasser vor der Vergärung	169,27	n.n.	n.n.	n.n.	637,10	274,50
HTC-Abwasser nach der Vergärung	14,23	n.n.	n.n.	18,99	1,996	n.n.
HTC-Abwasser nach der Vergärung	9,571	n.n.	n.n.	9,417	2,021	n.n.

Aus Sicht der Einsetzbarkeit des HTC-Abwassers für einen Vergärungsprozess scheint die technische Vergärbarkeit des Abwassers grundsätzlich gegeben zu sein. Der hohe CSB-Wert und die aktive Biogasproduktion im Batchtest lassen auf einen aktiven Vergärungsprozess schließen. Der Vergärungsprozess startet mit einiger Verzögerung. Dies ist aber auf die nicht vorhandene Anpassung der Mikroorganismen im Impfmateriale des Vergärungstests an die Zusammensetzung des HTC-Abwassers zurückzuführen. Nach ca. 5-7 Tagen setzt ein aktiverer Prozess ein, der aber nach ca. 15 Tagen Verweilzeit deutlich abnimmt und bis zum Ende des Vergärungstests nach 41 Tagen relativ kontinuierlich zur Biogasbildung führt. Dies lässt auf einen hohen Anteil schwer vergärbare organischer Substanz schließen. Praktisch erfordert das Substrat eine relativ lange Aufenthaltszeit in der Vergärung. Dies schließt typische Vergärungsverfahren für Abwässer mit kurzen Verweilzeiten von < 2 Tagen aus, eine Mitvergärung in z.B. vollaufmischten Fermentern kann aber eine gute Lösung sein, die notwendige Aufenthaltszeit sicherzustellen.

Tabelle 7: Biogas-, Methanausbeuten, Methangehalt und pH-Wert nach 41 Tagen Vergärung

ANSATZ	VARIANTE	pH (-)	Methan- konz. (Vol.-%)	Biogas- ausbeute (L _N · kg _{FM} ⁻¹)	Methan- ausbeute (L _N · kg _{FM} ⁻¹)
1	Versuchsansatz (HTC)	7,42	61,4	6,15	3,77
2	Versuchsansatz (HTC)	7,33	64,2	5,40	3,47
MITTEL- WERT	HTC	7,38 ± 0,06	62,8 ± 2,0	5,78 ± 0,53	3,62 ± 0,22

Die absolute Methanausbeute liegt bei rund 3,6 l/kg Frischmasse. Bezogen auf den CSB im HTC-Abwasser resultieren daraus 165 Liter Methan pro kg CSB. In üblichen gut vergärbaren Abwässern werden

typischerweise 350 l/kg CSB erreicht. Dies lässt schlussfolgern, dass das Abwasser relativ schlecht vergärbare ist. Bei Realisierung einer Aufenthaltszeit von 40 Tagen wird praktisch nicht einmal die Hälfte des enthaltenen CSB anaerob umgesetzt. Bei längerer Verweilzeit ist sicher eine höhere Ausbeute erreichbar, dies wird aber nur in einem Teil der existierenden Biogasanlagen erreicht.

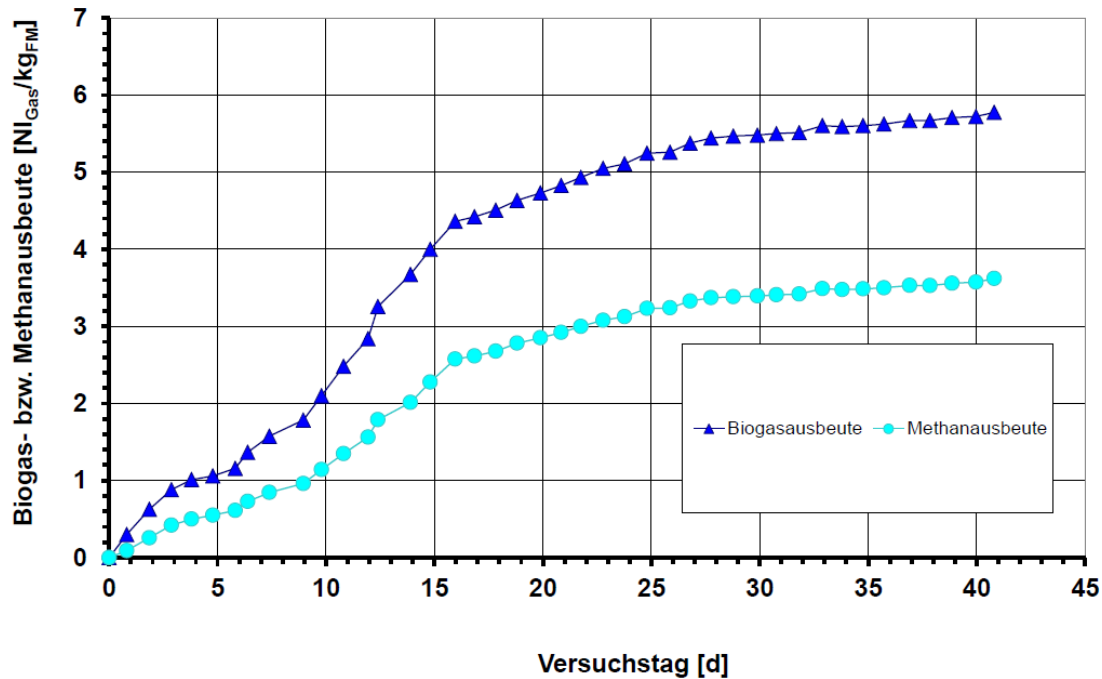


Abbildung 4: Biogas- und Methanausbeute des HTC Prozesswassers in Normliter je kg Frischmasse im Standardreferenzgärttest nach VDI 4630 bei 37°C (Mittelwerte aus zwei Wiederholungen)

Aus prozesstechnischer Sicht scheint ein Einsatz des HTC-Abwassers in typischen Biogasanlagen in Deutschland grundsätzlich machbar zu sein, es ist jedoch nur ein Abbau von weniger als der Hälfte des enthaltenen organischen Materials zu Biogas zu erwarten. Die Errichtung einer eigenen Anlage zur HTC-Abwasservergärung kann aus Sicht der notwendigen Aufenthaltszeit und vor dem Hintergrund der sehr begrenzten zu erwartenden Jahresmenge nicht wirtschaftlich machbar umgesetzt werden. Darüber hinaus ist es als ausgeschlossen anzusehen, dass mit dem Produkt der Vergärung Einleitgrenzwerte für gereinigtes Abwasser erreicht werden können (CSB von 120 mg/l), eine anderweitige Verwendung oder Entsorgung wäre erforderlich.

Da eine Einleitung des behandelten HTC-Abwassers in Vorfluter ausgeschlossen werden kann müssen alternative Nutzungswege gesucht werden. Dies kann die Beimischung in einer existierenden Biogasanlage sein, die zur Produktion von Gärrest führt, der in der Regel als organisches Düngemittel nach Düngemittelverordnung verwertet wird. Dieser Nutzungsweg ist aber für HTC-Abwasser bisher ungeklärt, da HTC-Abwasser weder als Einsatzstoff für Biogasanlagen noch als anerkannte Biomasse nach Biomasseverordnung ausdrücklich erlaubt ist. Eine Einzelfallentscheidung einer zuständigen Genehmigungsbehörde müsste herbeigeführt werden. Die Recherchen im Forschungsvorhaben zeigen, dass diesbezüglich heute noch keine klare Auffassung der Behörden zu dieser Fragestellung besteht. Auch Forschungsvorhaben, die diese Fragestellung adressieren fehlen vollständig, obwohl die anaerobe Verwertung von HTC-Abwässern bereits untersucht wurde.

Die besondere Herausforderung stellen die – auch typischerweise – festgestellten organischen Inhaltsstoffe im HTC-Abwasser dar. Tabelle 5 zeigt sehr hohe Konzentrationen an Catechol, Furfural und HMF (Hydroxymethylfurfural) im frischen HTC-Abwasser. Die anaerobe Behandlung des Abwassers (im Batchversuch unter Laborbedingungen) führt zu einer starken Reduzierung der Konzentrationen, allerdings auch zu einer Bildung von Kresol. Die Bildung von Kresol lässt sich wahrscheinlich mit einer geringen Methylierung von Phenol und anderen Derivaten erklären und ist ebenfalls aus anderen Untersuchungen bekannt.

Zu den festgestellten Inhaltsstoffen existieren weder Grenzwerte noch Richtwerte, die eingehalten werden müssten. Sie gehören auch nicht zu den 16 gesetzlich geregelten PAK. Trotzdem sind die Stoffe kritisch zu hinterfragen. Beispielsweise ist Kresol als fungizides und Desinfektionsmittel bekannt, das in Böden bereits in Konzentrationen ab 50 µg/kg wirksam sein kann. Für PAK, die hier als Orientierung herangezogen werden, gibt es in einigen Bundesländern Richtwerte, die 1, 5 oder 20 mg/kg Boden nicht überschreiten sollen. Sofern Gärrest, der vergorenes HTC-Abwasser enthält, als Dünger in typischen Konzentrationen auf Ackerböden aufgebracht werden würde, kann als sicher angenommen werden, dass niemals mehr als 1 l vergorenes HTC-Abwasser pro m² Bodenfläche ausgebracht werden würde. Damit würde man unter allen heute definierten Grenzwerten für relevante organische Schadstoffe bleiben.

Insofern wird die Verwendung von Gärresten aus Biogasanlagen, in denen HTC-Abwasser als Co-Substrat eingesetzt wird, als unkritisch in der Verwendung eingeschätzt. Die anaerobe Behandlung sollte aber in jedem Fall erfolgen, um die hohen Konzentrationen an HMF, Catechol und Furfural massiv zu senken. Für den praktischen Anwendungsfall sollte jedoch eine detaillierte Klärung dieser Fragen mit den zuständigen Behörden eingeplant werden. Auch ist zu berücksichtigen, dass die hier durchgeführten Batch-Versuche noch keinen Rückschluss auf das reale Verhalten der Inhaltsstoffe in einem kontinuierlichen Vergärungsprozess erlauben. Dabei ist insbesondere der Fakt zu berücksichtigen, dass HTC-Abwasser weder in der Düngemittelgesetzgebung noch in der Biomasseverordnung oder im EEG explizit als zulässiger Einsatzstoff aufgeführt wird. Ein direkter Einsatz der HTC-Abwässer in die bestehenden Biogasanlagen der Pahren Agrarkooperation und am Standort Saalfeld kann nicht empfohlen werden.

6 Erarbeitung eines Verfahrenskonzeptes für die Herstellung von Torfersatzstoffen

6.1 Verfahrensvorschlag für die HTC-Anlage

Grundsätzlich lassen sich hydrothermale Prozesse in Anlehnung an den Apparatebau der chemischen Industrie nach folgenden Kriterien klassifizieren:

- Fahrweise der Reaktoren
- Wärmeeintrag
- Durchmischung

Reaktoren welche einer kontinuierlichen Fahrweise unterliegen sowie Reaktoren welche diskontinuierlich betrieben werden. Kontinuierlich betriebene Reaktoren verfügen über eine

automatische Dosierung beziehungsweise Beschickung mit Substraten respektive Edukten. Vor dem Hintergrund der Materialeigenschaften der Hanfstoffe und der Option, dass eventuell verdichtetes Material wie Hanfstrohballen ebenso carbonisiert werden soll ist ein kontinuierlicher beziehungsweise quasikontinuierlicher Eintrag in einen Reaktor mit Fördertechnologien nach dem Stand der Technik in einen Druckbehälter nicht möglich. In diesem Zusammenhang wird die Betrachtung auf sogenannte Batchreaktoren gelegt.

HTC-Reaktoren werden unter Berücksichtigung der Wärmeübertragung grundsätzlich unterschieden in elektrisch beheizte Reaktoren und thermisch beheizte Reaktoren. Vor dem Hintergrund, dass sowohl am Standort Pahren als auch am Standort Saalfeld ausreichend Abwärme aus dem KWK-Prozess der Biogasanlagen verfügbar ist wird an dieser Stelle die thermische Beheizung weiter verfolgt. Dabei soll die Abwärme über einen Wärmetauscher aus dem Abgaswärmestrom des jeweiligen BHKW entnommen werden und anschließend an einen Thermoölkreislauf abgegeben werden. Mit dem Thermoöl wird dann über eine Begleitheizung (beispielsweise eine Rohrwendel) beheizt, welche den Reaktor auf die Zieltemperatur aufheizt.

HTC-Reaktoren werden grundsätzlich unterschieden in Bezug auf die Durchmischung, dabei gibt es Reaktoren mit Rührwerk und ohne. Da die Faserstruktur des Eduktes auch im Produkt erhalten bleiben soll und aus Vorversuchen am DBFZ sich das Rühren als nicht vorteilhaft ergeben hat wird an dieser Stelle ein Reaktor ohne Rührtechnik vorgesehen.

Zum Ausschleusen der HTC Suspension sowie möglicher großteiliger Feststoffe wird folgendes Austragssystem vorgeschlagen:

- Entnahme von Prozesswasser über eine Ventilöffnung am Klörperboden und eine Saugpumpe
- Entnahme von Feststoff aus dem Reaktor durch einen Schwenkmechanismus für eine rückstandsarme Entleerung
- Entnahme von Suspensionen (pumpfähig) über eine Aussaugleitung und eine anschließende Festflüssig-Trennung – eventuelle Filtration des Prozesswassers in Abhängigkeit der möglichen Feststoffgehalte für die fermentative Aufbereitung des Prozesswassers

Die Verfahrensdurchführung zur HTC von Reststoffen aus der Verarbeitung von Hanf erfolgt dabei wie folgt:

- Befüllung des Reaktors bei geöffnetem Reaktordeckel – der Feststoffanteil wird dabei beispielsweise mit einem Fördermittel wie einem Radlader in den Reaktor gefüllt - die Zugabe des erforderlichen Reaktionsmediums Wasser erfolgt über ein Rohrleitungssystem
- Verschluss des Reaktors und Aufheizung auf Zieltemperatur T und Halten der Prozessbedingungen über die Verweilzeit t
- Abkühlen des Reaktors auf eine Temperatur kleiner 95 °C und getaktetes Ausschleusen in eine thermisch stabile Abpresseinrichtung bei Entnahme der Suspension
- Trennung von Fest- und Flüssigphase (mechanisch und thermisch (Verdampfungsenergie))

Auf Basis einer Einordnung der HTC-Technologie nach apparatebautechnischen Kriterien entspricht diese Anlagentechnik dem Stand der Technik und findet sich beispielsweise in Anwendungsbereichen wie der Verflüssigung von fettreichen Schlachtabfällen.

Unter Berücksichtigung des Verfahrensablaufs und der avisierten Produkte (inklusive dem Prozesswasser) kann die hier vorgeschlagene HTC-Technologie einem Technologieentwicklungsstand (technology readiness level (TRL)) von 6 bis 7 zugeordnet werden.

6.2 Verfahrensvorschlag für die Nutzung der flüssigen Reststoffe

Eine Einleitung der flüssigen Reststoffe aus der HTC-Anlage in die an beiden Standorten betriebenen Biogasanlagen erscheint sowohl machbar, als auch sinnvoll, um einerseits einen Abbau vermeidlich schädlicher Stoffe umzusetzen, den CSB-Gehalt zu reduzieren als auch aus der Restorganik Biogas zu gewinnen und dieses energetisch zu nutzen (siehe Kapitel 5.2). Aufgrund des sehr wässrigen Substrates wird die Förderung des HTC-Prozesswassers durch Pumpentechnik empfohlen. Hierfür ist eine entsprechende Rohrleitung und Pumpe zu installieren, welche die Förderstrecke an den beiden Standorten überwinden lässt (Details hierzu in Kapitel 7.1).

6.3 Ausarbeitung eines Betriebs- und Nutzungskonzeptes

Betriebskonzept

- Betriebsweise: Batchbetrieb
- Wärmeeintrag: thermische Beheizung mittels Abwärme aus dem KWK-Prozess der Biogasanlage
- Beschickung: mit Hilfe eines Radladers
- Betriebspersonal: Anlagenfahrer der Biogasanlage bedient auch die HTC-Anlage

Nutzungskonzept für die flüssigen Reststoffe

- Klärung zum Einsatz des HTC-Abwassers als Co-Substrat in der Biogasanlage mit der zuständigen Behörde muss erfolgen
- HTC-Abwasser ist weder in der Düngemittelgesetzgebung noch in der Biomasseverordnung oder im EEG als zulässiger Einsatzstoff aufgeführt
- Einsatz des HTC-Abwassers durch Pumpentechnik aus der HTC-Anlage über den Perkolattank in die Biogasanlage ist grundsätzlich machbar

7 Standortanalyse

7.1 Entwicklung von Szenarien zur lokalen Integration in den Standort Pahren

Für Standortanalyse ist es von übergeordneter Bedeutung, dass die für die geplante HTC-Anlage geltenden Anforderungen sowohl in Bezug auf die Errichtung als auch den Betrieb erfüllt werden.

Vor dem Hintergrund der Einordnung einer entsprechenden Anlagentechnik nach dem Baurecht mit ergänzender Zulassung nach der Druckgeräterichtlinie wird dieses Kriterium für den Standort Pahren als erfüllt angesehen, da sich in unmittelbarer Nachbarschaft eine Biogasanlage in Betrieb befindet die genehmigungstechnisch gleichbedeutend bzw. höher einzuordnen sind.

Mit Bezug auf den Betrieb einer HTC-Anlage sind nachfolgende Kriterien von besonderer Bedeutung

- Ausreichende Versorgung mit Prozesswärme aus einem Restwärmepotential (bspw. Abwärme Biogasanlage)
- Ausreichende Versorgung mit Roh- und Hilfsstoffen (u. a. Hanfreststoffe und Wasser als Reaktionsmedium)
- Ausreichende Rückführbarkeit von Prozesswasser (bspw. in einen Biogasprozess)

In diesem Zusammenhang wird die Systemgrenze auf den Konversionsanlagenstandort bezogen und berücksichtigt ausschließlich die Verfügbarkeit von Medien (Bereitstellung von Strom, Wärme, Wasser und Abnahme von Prozesswasser) sowie die räumliche Anordnung von Infrastrukturen (Lage und Entfernungen von Bauteilen (bspw. Gärrestlager bzw. Perkolattank).

Der konkrete Standort ist der Abbildung 5 zu entnehmen.



Abbildung 5: Einbindung der HTC Anlage am Standort Pahren am BHKW-Gebäude

7.2 Entwicklung von Szenarien zur lokalen Integration in den Standort Saalfeld

Für Standortanalyse ist es von übergeordneter Bedeutung, dass die für die geplante HTC-Anlage geltenden Anforderungen sowohl in Bezug auf die Errichtung als auch den Betrieb erfüllt werden.

Vor dem Hintergrund der Einordnung einer entsprechenden Anlagentechnik nach dem Baurecht mit ergänzender Zulassung nach der Druckgeräterichtlinie wird dieses Kriterium für den Standort Saalfeld als erfüllt angesehen, da sich in unmittelbarer Nachbarschaft eine Biogasanlage in Betrieb befindet die genehmigungstechnisch gleichbedeutend bzw. höher einzuordnen sind.

Mit Bezug auf den Betrieb einer HTC-Anlage sind nachfolgende Kriterien von besonderer Bedeutung

- Ausreichende Versorgung mit Prozesswärme aus einem Restwärmepotential (bspw. Abwärme Biogasanlage)
- Ausreichende Versorgung mit Roh- und Hilfsstoffen (u. a. Hanfreststoffe und Wasser als Reaktionsmedium)
- Ausreichende Rückführbarkeit von Prozesswasser (bspw. in einen Biogasprozess)

In diesem Zusammenhang wird die Systemgrenze auf den Konversionsanlagenstandort bezogen und berücksichtigt ausschließlich die Verfügbarkeit von Medien (Bereitstellung von Strom, Wärme, Wasser und Abnahme von Prozesswasser) sowie die räumliche Anordnung von Infrastrukturen (Lage und Entfernungen von Bauteilen (bspw. Gärrestlager bzw. Perkolattank).

Der konkrete Standort ist der Abbildung 6 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu entnehmen.



Abbildung 6: Einbindung der HTC Anlage am Standort Saalfeld gegenüber dem BHKW-Gebäude

7.3 Gegenüberstellung der Standorte

Unter Berücksichtigung der genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen für die Errichtung und den Betrieb der HTC Anlage sind beide Standorte als gleichwertig einzuordnen. In Bezug auf die rechtliche Einordnung der HTC-Flüssigphase und deren Verwendung für fermentative Zwecke ist aus gegenwärtiger Sicht der Standort Saalfeld vorteilhaft anzusehen, da es sich bei dieser Biogasanlage um Bioabfallvergärung handelt, wobei der Gärrest nicht direkt auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht wird.

Aus technischer Sicht sind beide Standorte als gleichwertig einzuordnen. Einzig die kürzere Entfernung der HTC-Prozesswasserleitung ist am Standort Saalfeld hervorzuheben.

Jedoch stellt sich der o.g. Aspekt der kürzen Prozesswasserleitung durch geringere Investitionsaufwendungen (Baugrund und Trassenlänge) und letztendlich auch durch geringe Betriebskosten dar. Die niedrigeren Betriebskosten basieren auf dem geringeren Höhenunterschied, welcher am Standort Saalfeld sich zwischen dem HTC-Anlagenstandort und dem Perkolattank ergibt.

8 Investitionsvorbereitung für die Pilotanlage

8.1 Marktanalyse

Auf Basis der Angaben aus der Befragung von Herstellern von HTC-Anlagen und wissenschaftlichen Einrichtungen, welche HTC-Anlagen betreiben konnten folgende ökonomischen Kennzahlen für die Investitionsaufwendungen und die sich damit ergebenden Kosten erhoben werden. Die Ermittlung der Kosten erfolgte dabei auf Basis der methodischen Einordnung nach DIN 276. In Tabelle 8 ist eine Übersicht zu den zu erwartenden Kosten für einen HTC-Reaktor mit 4 m³ Netto-Füllvolumen an den potentiellen Standorten Pahren und Saalfeld gegeben.

Tabelle 8: Kostenermittlung nach DIN 276 – Angaben in €

	Pahren	Saalfeld
Grundstück	200	200
Herrichten u. Erschließen	380	380
Bauwerk-Baukonstruktion	1.250	0
Bauwerk-technische Anlagen	115.000	115.000
Außenanlagen	34.250	13.451
Begleitheizung	25.000	25.000
Ausstattung u. Kunstwerke	0	0
Baunebenkosten	15.000	15.000
Summe der Kostengruppen	191.080	169.031

Die einzelnen Kostengruppen werden nachfolgend kurz beschrieben.

Im Rahmen der Kostengruppe Grundstück wurden ausschließlich Kosten für das Freimachen von 200 € angesetzt.

In der Kostengruppe Herrichten und Erschließen sind Kosten für das Herrichten des Grundstücks in Form einer Baustelleneinrichtung von 380 € eingeplant.

Innerhalb der Kostengruppe Bauwerk-Baukonstruktion wurde die Gründung für das Erstellen von zwei Streifenfundamenten eingeplant (Pahren – Basis Grünfläche Arbeiten in Höhe von 1.250 €, Saalfeld Schwarzdecke 0 €).

Die Kostengruppe Bauwerk-technische Anlagen umfasst hier die Positionen Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen, Wärmeversorgungsanlagen, Lufttechnische Anlagen, Förderanlagen, Nutzungsspezifische Anlagen, Gebäudeautomation und sonstige Maßnahmen für technische Anlagen, welche insgesamt 115.000 € umfassen.

Im Rahmen der Kostengruppe Außenanlagen wurden eine Multigraben vorgesehen in welchen und technische Anlagen in Außenanlagen (Rohrleitungen für Medien) eingebracht werden. Für den Grünbereich entstehen dabei Kosten von 50 €/m, für den Bereich mit Schwarzdecke 98 €/m. Für die Verlegung der Rohrleitung wird ein PE Rohr (d140 x 8 mm) berücksichtigt mit einem Preis von 23 €/m (verlegt). Hierbei ergibt sich aufgrund der Anordnung der möglichen Einleitung des HTC Prozesswassers ein Unterschied zwischen den Kostenpositionen:

- Pahren Einleitung in den Nachgärer: Rohrleitungsbau von ca. 34.250 €
- Saalfeld Einleitung in den Perkolatbehälter: Rohrleitungsbau von ca. 13.451 €

Zur Aufheizung, aktiven Abkühlung und dem Wärmeaustausch im Falle der Kaskadenschaltung zweier Reaktoren wird eine Begleitheizung, welche auf Basis von Thermoöl betrieben wird vorgesehen. Die Kosten hierfür betragen 25.000 €.

In den Baunebenkosten wurden die Vorbereitung der Objektplanung und Leistungen für Architekten und Ingenieure in Höhe von 15.000 € eingeplant.

Nicht berücksichtigt sind mögliche Ausgaben für Ausstattung und Kunstwerke sowie die sonstigen Unterkostengruppen, welche hier nicht benannt wurden. So ergeben sich für den Standort Pahren Kosten für die Investition von 191.080 € und für den Standort Saalfeld von 169.031 €.

8.2 Energieverbräuche HTC-Anlage

Als Systemgrenze für die Betrachtung wird die Konversionsanlage respektive die hydrothermale Carbonisierungsanlage gesehen. Alle bereitgestellten Verbrauchsmaterialien werden mengenspezifisch berücksichtigt. Die Anschlusswerte der HTC Anlage bilden die Basis für die technische und ökonomische Bewertung. In Tabelle 9 sind die Leistungsparameter der Komponenten respektive der Verbraucher dargestellt.

Tabelle 9: Verbrauchsparameter der HTC-Anlage

Elektrische Verbraucher	Spannung (V)	Leistung (kW)	
Vorrichtung Behälteröffnung	400	2,5	
Pumpe	400	3,6	
Steuerung	230	2,0	
Beleuchtung außen / innen	230	2,0	
Steckdosen	230	3,0	
Containerbeheizung	230	2,5	
Ventilator Container	230	0,3	
Jalussieklappe	230	1,0	
Thermische Verbraucher	-	Leistung (kW)	
Begleitheizung	-	150,0	

Für die nachfolgenden Berechnungen wird zugrunde gelegt, dass mit Ausnahme der Steuerung und Heizung alle anderen Komponenten je Zyklus nur mit 20 % Laufzeit anzusetzen sind. Für einen Carbonisierungsvorgang wird exemplarisch 4 h angesetzt (70 min Aufheizung, 30 min Halten, 140 min Abkühlung).

8.3 Risikoanalyse

Nachfolgend werden die zu beurteilenden Eingangsgrößen zur Beurteilung des ökonomischen Risikos kurz beschrieben und eingeordnet.

Die kapitalgebundenen Zahlungen können auf Basis der Abschätzung der Investitionsaufwendungen, der Abschreibungsdauer und der gegenwärtig gültigen Zinsaufwendungen als relativ sichere Elemente eingeordnet werden.

Die verbrauchsgebundenen Zahlungen können in Bezug auf die Edukte ebenfalls als relativ sicher eingeordnet werden. Mit Bezug auf die notwendigen Energieträger besteht jedoch das Risiko, dass aufgrund unzureichender Kenntnis über die Carbonisierungsqualität in größeren Reaktoren eventuell ein signifikant höherer Wärmebedarf als auch eine längere Verweilzeit erforderlich ist. In diesen Zusammenhang sind die verbrauchsgebundenen Zahlungen als auch die betriebsgebundenen Zahlungen mit Bezug auf Personal als unsicher einzuordnen.

Sonstige Zahlungen sind aufgrund der Abhängigkeit von der Investition (bspw. Versicherung 1 % der Investition) als sicher einzuordnen.

In Bezug auf die Erlöse sowohl für das Hauptprodukt aus dem Verkauf des HTC-Feststoffgemisches als Torfersatz als auch für das Nebenprodukt aus dem Einsatz des Prozesswassers als Substrat sind die Voraussetzungen als unsicher einzuordnen.

In diesem Zusammenhang kann geschlussfolgert werden, dass aufgrund der eingeschränkten Erfahrungen zum Up-scale und damit verbundenen Betriebsverhalten als auch die nicht eindeutig definierten Bedingungen der Verwertung als Unsicherheit zu benennen sind. Somit besteht ein signifikantes ökonomisches Risiko.

9 Ökonomische und ökologische Bewertung der Machbarkeit

9.1 Ökonomische Bewertung der Machbarkeit

Für die ökonomische Bewertung der Machbarkeit für die Behandlung der Hanfreststoff mit dem Ziel dessen Verwertung als Torfersatzstoff wurden die spezifischen Kosten für die Carbonisierung der verschiedenen Biomassefraktionen über einen Betrachtungszeitraum von 15 Jahren berechnet. Dies bezieht folgende Stoffe ein:

- Hanfstroh: 1.000 t/Jahr, 400 kg/m³ (als Ballen)
- Faser-Schäben-Gemisch: 100 t/Jahr, 110 kg/m³
- Schäben: 500 t/Jahr, 94 kg/m³

Tabelle 10 zeigt die wirtschaftlichen Rahmenparameter, welche der ökonomischen Bewertung zugrunde gelegt wurden.

Tabelle 10: Wirtschaftliche Rahmenparameter

Abschreibungszeitraum	10 Jahre
Eigenkapitalanteil	10%
EK-Verzinsung	6%
FK-Verzinsung	4%
Mischzins	4,2%
Preissteigerungsrate	2%

Für die verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten wurden die in Tabelle 11 aufgeführten spezifischen Werte verwendet. Für alle verbrauchs-, betriebsgebundenen und sonstigen Zahlungen sowie Zahlungen für Instandhaltung und Einzahlungen wird eine Preissteigerungsrate von 2 % p.a. zugrunde gelegt.

Tabelle 11: Spezifische Kosten für Verbrauchsmittel, Personal und Sonstiges

Wärmepreis (durchschnittlich)	2,5	ct/kWh _{th}
Strompreis (durchschnittlich)		
Standort Pahren	20	ct/kWh _{el}
Standort Saalfeld	22,5	ct/kWh _{el}
Personalkosten		
Stundenlohn	15	€/h
Aufwand	4	h/Zyklus
Betriebsmittel		
spez. Preis für Wasser	5	€/m ³
Wartung und Instandhaltung	2%	vom Invest
Sonstiges (Versicherung, TÜV, etc.)	3.000	€/a

Die Menge und Dichte der zu behandelnden Biomassefraktionen bestimmt das erforderliche Reaktorvolumen, da die Zyklen (je 4 h), welche pro Arbeitstag gefahren werden können auf zwei begrenzt ist. Eine Kombination von mindestens zwei abwechselnd betriebenen Reaktoren ist stets sinnvoll, um das Wärmemanagement zu optimieren (Aufheizen des einen Reaktors bei Abkühlen des anderen). Dabei wurde eine Reaktorgröße von 4 m³ gewählt, da diese sowohl aus Gründen der Vorfertigung und Einhausung als auch aus Sicht der thermischen Anpassung (Aufheizen und Abkühlen) vorteilhaft ist.

Die Mischverhältnisse von Biomasse zu Wasser unterscheiden sich je nach Biomasse. Bei einem maximalen Füllvolumen je Reaktor ergeben sich daraus folgende Konzepte:

- Hanfstroh: 2 Reaktoren á 4 m³; Biomasse zu Wasser: 1 zu 1, durchschnittlich 1,8 Zyklen je Arbeitstag

- Faser-Schäben Gemisch: 2 Reaktoren á 4 m³; Biomasse zu Wasser: 1,5 zu 1 durchschnittlich 0,5 Zyklen je Arbeitstag
- Schäben: 3 Reaktoren á 4 m³; Biomasse zu Wasser: 1,25 zu 1 durchschnittlich 2,0 Zyklen je Arbeitstag

Die Wirtschaftlichkeitsrechnung für diese drei Konzepte führt zu folgenden durchschnittlichen Behandlungskosten über den Betrachtungszeitraum von 15 Jahren am Standort Pahren:

- Hanfstroh: 9,40 €/m³
- Faser-Schäben-Gemisch: 48,80 €/m³
- Schäben: 28,80 €/m³

Am Standort Saalfeld liegen die durchschnittlichen Behandlungskosten bei:

- Hanfstroh: 9,00 €/m³
- Faser-Schäben-Gemisch: 44,80 €/m³
- Schäben: 27,60 €/m³

Die ausführlichen Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung zeigen die Anhänge 1 bis 6. Die Ergebnisse zeigen sehr unterschiedliche spezifische Behandlungskosten, was insbesondere an der Dichte der Edukte liegt. So können durch die Verdichtung des Hanfstrohs in Form von Ballen deutlich größere Mengen je Behandlungs-Zyklus carbonisiert werden, was insbesondere den Personalaufwand und die damit einhergehenden Kosten reduziert. Die spezifischen Kosten für die Carbonisierung des Faser-Schäben-Gemisches steigen noch einmal zusätzlich aufgrund der Tatsache, dass die HTC-Reaktoren aufgrund der geringen Mengen nicht so stark ausgelastet werden können (durchschnittlich 0,5 Zyklen je Arbeitstag und damit praktisch ein Zyklus alle zwei Tage).

Beim Vergleich der Ergebnisse mit den üblichen Zahlungsbereitschaften für Torfersatzstoffe, welche je nach Qualität des Torfersatzstoffes zwischen 10 und 40 €/m³ liegen, lässt sich feststellen, dass allein die Kosten für die Carbonisierung im Falle der Behandlung des Faser-Schäben-Gemisches die Zahlungsbereitschaft deutlich übertreffen. Berücksichtigt man, dass die Preise im oberen Drittel nur für sehr hochwertige Torfersatzstoffe, welche dem eigentlichen Torf in seinen Eigenschaften sehr nahe kommen, gezahlt werden, übersteigen auch die Kosten der Carbonisierung der Schäben bereits die potenziellen Erlöse.

Noch unberücksichtigt sind die Kosten für eine an die Carbonisierung anschließende Kompostierung der HTC-Produkte zur Vermeidung von Schimmelbildung und Pilzwachstum (siehe Kapitel 5.1), die Kosten für den Transport und die Bereitstellungskosten der Biomasse. Für die Kompostierung können äquivalent zur Kompostierung von Gärresten aus der Bioabfallvergärung ca. 50 €/t bzw. 7,50 €/m³ angenommen werden. Für den Transport fallen ca. 2,25 €/m³ und 100 km an. Im Falle des Transportes der Torfersatzstoffe vom Standort Pahren bzw. Saalfeld zu einem im Laufe des Projektes identifizierten Abnehmers im nord-östlichen Niedersachsen, würden sich die Transportkosten auf ca. 11,25 €/m³ bzw. 9,70 €/m³ summieren. Daraus ergeben sich für den Torfersatzstoff aus Hanfstroh Bereitstellungskosten von insgesamt gut 28 €/m³ (Pahren) bzw. 26 €/m³, wobei die Kosten für die Bereitstellung des Hanfstrohs noch unberücksichtigt sind. Da auch diese Kosten im oberen Drittel der

Zahlungsbereitschaft für Torfersatzstoffe liegen, erscheint die Bereitstellung der Torfersatzstoffe aus Hanfstroh und den Reststoffen bei dessen Verarbeitung zu Hanffasern unwirtschaftlich.

9.2 Sensitivitätsanalyse

Abbildung 7 zeigt beispielhaft die Sensitivitäten der Einflussgrößen auf die Kosten der Carbonisierung von Hanfstroh. Diese lassen sich grundsätzlich auf die Kosten in Abhängigkeit der Einflussgrößen bei der Carbonisierung der anderen Stoffe übertragen.

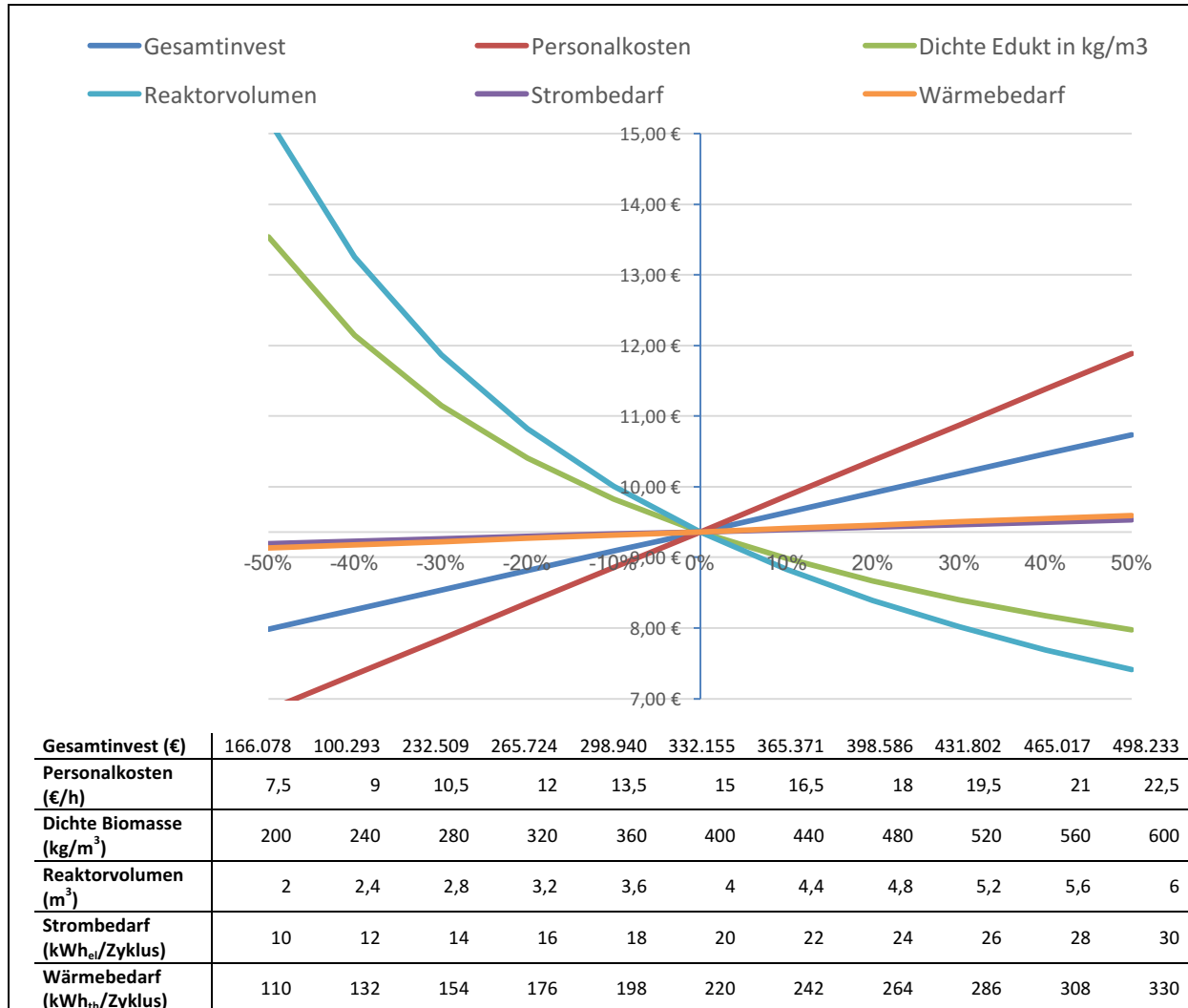


Abbildung 7: Sensitivität der Einflussgrößen auf die Kosten der Carbonisierung am Beispiel von Hanfstroh

Die Ergebnisse zeigen einen relativ starken Einfluss der effektiven Menge, welche bei einem Carbonisierungs-Zyklus verarbeitet werden können. Dies wird zum einen durch die Größe des Reaktorvolumens und zum anderen durch die Dichte des Eingangsmaterials beeinflusst. Zwischen diesen Größen besteht ein direkter Zusammenhang zu den Personalkosten, die absolut steigen, je mehr Zyklen gefahren werden müssen, um die gesamte Menge des Ausgangsstoffes zu carbonisieren.

Wesentlich sind auch die Gesamtinvestitionen in die Anlage. Bei einer Variation von 30 % bzw. +/- 100.000 € verändern sich die Kosten der Carbonisierung um 1 €/m³. Der Einfluss des

Energieverbrauchs auf die Kosten der Carbonisierung ist hingegen sehr gering. Dies liegt im Falle des elektrischen Energiebedarfs daran, dass dieser relativ gering ist und entsprechend nur einen kleinen Teil der verbrauchsgebundenen Kosten ausmacht. Im Falle des thermischen Energiebedarfs ist der Einfluss auf die Kosten deshalb relativ gering, weil mit der verfügbaren Abwärme aus den Biogasanlagen an den zwei Standorten Wärme zu relativ geringen Kosten zur Verfügung steht.

Aus der Sensitivitätsanalyse lässt sich ableiten, dass bei der Konzeptgestaltung ein Kompromiss zu erarbeiten ist, welcher den personellen Aufwand möglichst gering hält.

9.3 Ökologische Bewertung der Machbarkeit

Zur ökologischen Bewertung der Machbarkeit der Torfersatzbereitstellung aus Hanfreststoffen wurden die THG-Emissionen der untersuchten auf den Reststoffen basierenden Konzepte grob quantifiziert und mit denen von anderen Torfersatzstoffen und Torf verglichen. Wie üblich werden die THG-Emissionen dabei in CO₂-Äquivalenten ausgewiesen. Dabei wird die Klimawirkung unterschiedlicher Treibhausgase auf die von CO₂ bezogen (z.B. Methan = 23-fache Wirkung von CO₂).

Bei der Bereitstellung von Torfersatz aus den Reststoffen der Hanffaserproduktion entstehen THG-Emissionen entlang der gesamten Prozesskette, wobei diese aber teilweise nicht den Reststoffen zugeschrieben werden:

Prozessschritt	Wesentliche Ursachen für THG-Emissionen	Bemerkungen
Anbau und Ernte des Hanfs	<ul style="list-style-type: none"> - Fossile Kraftstoffe für die landwirtschaftlichen Fahrzeuge - Düngung 	THG-Emissionen werden grundsätzlich dem Hauptprodukt (Hanffaser) zugeschrieben, d.h. hier gleich Null, da hier nur die Reststoffe genutzt werden.
Verarbeitung der Reststoffe (Carbonisierung)	<ul style="list-style-type: none"> - Fertigung und Installation der Anlage - Energieverbrauch für den Betrieb (Strom und Wärme) - Direkte CO₂-Emissionen aus dem Prozess 	<ul style="list-style-type: none"> - THG-Emissionen aus Fertigung und Installation verhältnismäßig gering (vernachlässigbar) - Für Strom: THG-Emissionen des Strommixes in DE (527 g_{CO₂.äqu}/kWh_{el}⁵) - Für Wärme: Abwärme aus den Biogasanlagen vor Ort (89 g_{CO₂.äqu}/kWh_{th}⁶) - Direkte Emissionen = 0, da CO₂ erneuerbar aus Biomasse stammt (CO₂-Kreislauf)
Transport	<ul style="list-style-type: none"> - Anfallort (Läwitz) zur HTC-Anlage (Pahren o. Saalfeld) - Von der HTC-Anlage zum Kunden 	<ul style="list-style-type: none"> - Läwitz-Pahren: 2,5 km (vernachlässigbar); Läwitz-Saalfeld: 50 km - 101g_{CO₂.äqu}/t und km⁷

Unter den getroffenen Annahmen ergeben sich aus der groben Schätzung abgeleitete spezifische THG-Emissionen für die Bereitstellung von Torfersatzstoff

⁵ Quelle: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-05-22_climate-change_15-2017_strommix.pdf

⁶ Quelle: http://www.biogaspartner.de/fileadmin/biogas/Downloads/Studien/EEG_2012_Studie_Biogasrat.e.V._Download.pdf

⁷ Quelle: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/bilder/dateien/vergleich_der_durchschnittlichen_emissionen_einzeller_verkehrsmittel_im_gueterverkehr_bezugsjahr_2014_0.pdf

- i) aus dem Faser-Schäben-Gemisch: $11,1 \text{ kg}_{\text{CO}_2, \text{äqu}} \text{ je m}^3$
- ii) aus den Schäben: gut $17,6 \text{ kg}_{\text{CO}_2, \text{äqu}} \text{ je m}^3$

Dabei entsteht der Großteil der THG-Emissionen durch den Transport zum Kunden und ist damit stark von der Entfernung zwischen dem Ort der Herstellung und den Kunden (hier 300 km angenommen) abhängig (siehe Abbildung 8).

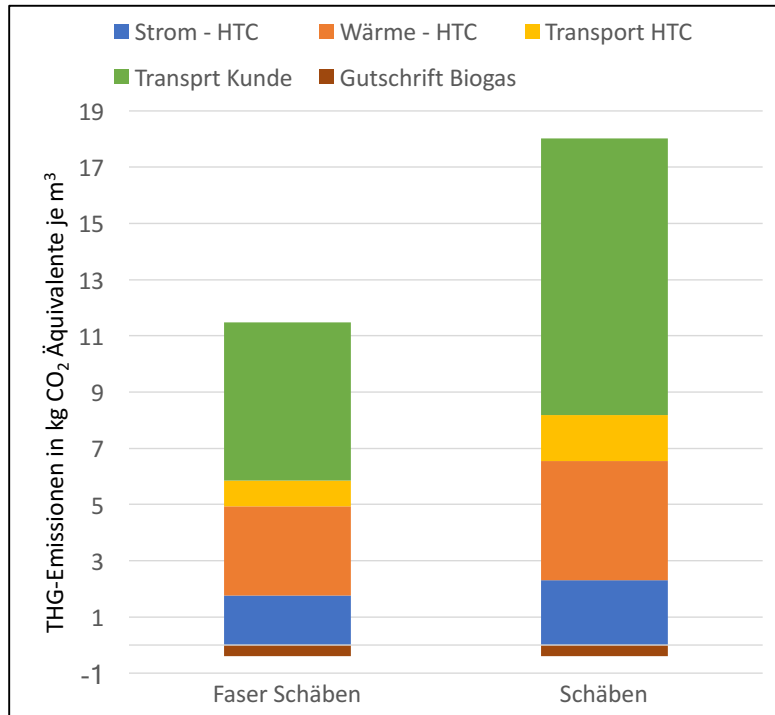


Abbildung 8: Grob abgeschätzte THG-Emissionen zur Bereitstellung von Torfersatzstoffen aus den Reststoffen der Hanffaserproduktion, eigene Darstellung

Der Vergleich zu anderen Torfersatzstoffen und Torf zeigt, dass die Torfersatzstoffe aus den Reststoffen der Hanffaserproduktion ein grundsätzliches Potenzial zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen bei der Substraterdenherstellung aufweisen (siehe Tabelle 12). Da auch bei den anderen Torfersatzstoffen die THG-Emissionen für die Transportaufwendungen die Gesamt-THG-Emissionen im Wesentlichen beeinflussen, sind die Werte mit Rücksicht auf die hierfür jeweils getroffenen Annahmen zu interpretieren. Grundsätzlich lässt sich außerdem feststellen, dass bei Torfen und Kompost als Material für Substraterden zusätzlich wesentliche THG-Emissionen in der Nutzungsphase auftreten, während diese bei den anderen Torfersatzstoffen eher gering sind.

Da die Reststoffe aus der Hanffaserproduktion dem Torfersatzstoff TEFA am ähnlichsten sind, lässt sich im Vergleich zu diesem eine CO₂-Einsparpotenzial für die insgesamt anfallenden Reststoffe (Schäben und Faser-Schäben-Gemisch) von knapp 100 t CO₂ pro Jahr feststellen.

Tabelle 12: THG-Emissionen aus verschiedenen Torfen und Torfersatzstoffen

Torf und Torfersatzstoff	Transportentfernungen ⁸	THG-Emissionen in kg _{CO₂,äqu} je m ³
Schwarz- und Weisstorf	2.200 km	250
Grünkompost	70 km	180
Kokosfasern	13.470 km	85
Cocopeat	13.470 km	41
Rindenkompost	75 km	33
Reisspelzen	350 km	29
TEFA aus Maisstroh	120 km	28
Schäben (Carbonisiert)	300 km	17,6
Faser-Schäben (Carbonisiert)	300 km	11,1
Holzfasern*	75 km	9,9
Holzhäcksel fein	75 km	9,5
Landerde	0 km	5,0

10 Schlussfolgerungen

Aus den Projektergebnissen lassen sich folgende Schlüsse ableiten:

- Der Verwendung der Reststoffe aus der Hanffaserproduktion als Verpackungsmaterial oder Biokunststoff ist aufgrund des hohen Schäbengehaltes nicht möglich.
- Im Hinblick auf die Stoffparameter eignen sich die Reststoffe aus der Hanffaserproduktion grundsätzlich zur Verwendung in der Substrat- und Erdenherstellung. Die Verletzungsgefahr durch scharfkantige Schäben und die Neigung zur Verpilzung bedingen allerdings eine weitere Behandlung der Reststoffe vor dessen Verwertbarkeit als Torfersatz.
- Die Behandlung der Reststoffe aus der Hanffaserproduktion mittels hydrothormaler Carbonisierung verändert die Eigenschaften im Hinblick auf die Anforderungen zum Einsatz als Torfersatzstoff grundsätzlich positiv. Im Vorhaben wurde gezeigt, dass die Carbonisierung der Materialien technisch machbar ist.
- Die Neigung zur Verpilzung bedarf allerdings eines weiteren Behandlungsschrittes (Kompostierung), welcher mit zusätzlichem Aufwand verbunden ist und in diesem Vorhaben nicht untersucht werden konnte.
- Positiv ist ebenfalls zu bewerten, dass eine Verwertung des Prozesswassers aus der hydrothermalen Carbonisierung der Reststoffe in Biogasanlagen machbar scheint und neben

⁸ Eymann, L. et al.: Torf und Torfersatzprodukte im Vergleich: Eigenschaften, Verfügbarkeit, ökologische Nachhaltigkeit und soziale Auswirkungen, Wädenswil, 22. Dezember 2015



der Bereitstellung des erneuerbaren Energieträgers Biogas die Schadstoffe im Prozesswasser reduziert. Ein direkter Einsatz der HTC-Abwässer in die bestehenden Biogasanlagen der Pahren Agrarkooperation und am Standort Saalfeld kann hingegen nicht empfohlen werden.

- Das CO₂-Einsparpotenzial bei Verwendung der gesamten Reststoffe aus der Hanffaserproduktion am Standort Pahren als Torfersatzstoff beträgt knapp 100 t CO₂ pro Jahr (gegenüber TEFA als Torfersatz).
- Aus ökologischer Sicht wäre daher der Verwertungsweg als Torfersatzstoff zu begrüßen, die Ergebnisse der wirtschaftlichen Betrachtung zeigen allerdings, dass die Bereitstellungskosten die Zahlungsbereitschaft für Torfersatzstoffe übersteigen.
- Aufgrund der nicht gegebenen Wirtschaftlichkeit wird von einer Fortsetzung der Untersuchungen durch den Betrieb einer Pilotanlage in einer zweiten Projektphase abgeraten.



Anhänge

Anhang 1 – Behandlungskosten für die Carbonisierung von Hanfstroh am Standort Pahren

Jahr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
kapital gebundene Kosten															
Abschr.	29.894 €	29.894 €	29.894 €	29.894 €	29.894 €	29.894 €	29.894 €	29.894 €	29.894 €	29.894 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Tilgung	11.958 €	10.962 €	9.926 €	8.849 €	7.728 €	6.563 €	5.351 €	4.091 €	2.781 €	1.418 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Zins EK	1.993 €	1.842 €	1.681 €	1.512 €	1.331 €	1.141 €	938 €	724 €	496 €	255 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
verbrauchsgebundene Kosten															
Strom	3.486 €	3.556 €	3.627 €	3.699 €	3.773 €	3.849 €	3.926 €	4.004 €	4.084 €	4.166 €	4.249 €	4.334 €	4.421 €	4.510 €	4.600 €
Wärme	4.813 €	4.909 €	5.007 €	5.107 €	5.209 €	5.313 €	5.420 €	5.528 €	5.639 €	5.751 €	5.866 €	5.984 €	6.103 €	6.225 €	6.350 €
Wasser	5.000 €	5.100 €	5.202 €	5.306 €	5.412 €	5.520 €	5.631 €	5.743 €	5.858 €	5.975 €	6.095 €	6.217 €	6.341 €	6.468 €	6.597 €
betriebsgebundene Kosten															
Personal	52.500 €	53.550 €	54.621 €	55.713 €	56.828 €	57.964 €	59.124 €	60.306 €	61.512 €	62.742 €	63.997 €	65.277 €	66.583 €	67.914 €	69.273 €
Wartung	6.643 €	6.776 €	6.911 €	7.050 €	7.191 €	7.335 €	7.481 €	7.631 €	7.783 €	7.939 €	8.098 €	8.260 €	8.425 €	8.594 €	8.765 €
Sonstige	3.000 €	3.060 €	3.121 €	3.184 €	3.247 €	3.312 €	3.378 €	3.446 €	3.515 €	3.585 €	3.657 €	3.730 €	3.805 €	3.881 €	3.958 €
Summe	119.286 €	119.648 €	119.991 €	120.313 €	120.614 €	120.891 €	121.143 €	121.368 €	121.563 €	121.727 €	91.963 €	93.802 €	95.678 €	97.592 €	99.544 €
Kosten je HTC-Feststoff in €/m3															
	9,94 €	9,97 €	10,00 €	10,03 €	10,05 €	10,07 €	10,10 €	10,11 €	10,13 €	10,14 €	7,66 €	7,82 €	7,97 €	8,13 €	8,30 €
Kosten je HTC-Feststoff in €/t															
	66,27 €	66,47 €	66,66 €	66,84 €	67,01 €	67,16 €	67,30 €	67,43 €	67,53 €	67,63 €	51,09 €	52,11 €	53,15 €	54,22 €	55,30 €

**Anhang 2 – Behandlungskosten für die Carbonisierung vom Faser-Schäben-Gemisch am Standort Pahren**

Jahr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
kapital gebundene Kosten															
Abschr.	29.894 €	29.894 €	29.894 €	29.894 €	29.894 €	29.894 €	29.894 €	29.894 €	29.894 €	29.894 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Tilgung	11.958 €	10.962 €	9.926 €	8.849 €	7.728 €	6.563 €	5.351 €	4.091 €	2.781 €	1.418 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Zins EK	1.993 €	1.842 €	1.681 €	1.512 €	1.331 €	1.141 €	938 €	724 €	496 €	255 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
verbrauchsgebundene Kosten															
Strom	1.055 €	1.076 €	1.097 €	1.119 €	1.142 €	1.165 €	1.188 €	1.212 €	1.236 €	1.261 €	1.286 €	1.312 €	1.338 €	1.365 €	1.392 €
Wärme	1.456 €	1.485 €	1.515 €	1.545 €	1.576 €	1.608 €	1.640 €	1.673 €	1.706 €	1.740 €	1.775 €	1.811 €	1.847 €	1.884 €	1.921 €
Wasser	750 €	765 €	780 €	796 €	812 €	828 €	845 €	862 €	879 €	896 €	914 €	933 €	951 €	970 €	990 €
betriebsgebundene Kosten															
Personal	16.528 €	16.859 €	17.196 €	17.540 €	17.891 €	18.248 €	18.613 €	18.986 €	19.365 €	19.753 €	20.148 €	20.551 €	20.962 €	16.528 €	16.859 €
Wartung	6.911 €	7.050 €	7.191 €	7.335 €	7.481 €	7.631 €	7.783 €	7.939 €	8.098 €	8.260 €	8.425 €	8.594 €	8.765 €	6.911 €	7.050 €
Sonstige	3.121 €	3.184 €	3.247 €	3.312 €	3.378 €	3.446 €	3.515 €	3.585 €	3.657 €	3.730 €	3.805 €	3.881 €	3.958 €	3.121 €	3.184 €
Summe	71.455 €	70.807 €	70.118 €	69.385 €	68.606 €	67.780 €	66.904 €	65.974 €	35.096 €	35.797 €	36.513 €	37.244 €	37.989 €	71.455 €	70.807 €
Kosten je HTC-Feststoff in €/m³															
	59,55 €	59,01 €	58,43 €	57,82 €	57,17 €	56,48 €	55,75 €	54,98 €	29,25 €	29,83 €	30,43 €	31,04 €	31,66 €	59,55 €	59,01 €
Kosten je HTC-Feststoff in €/t															
	396,97 €	393,37 €	389,54 €	385,47 €	381,15 €	376,56 €	371,69 €	366,52 €	194,98 €	198,87 €	202,85 €	206,91 €	211,05 €	396,97 €	393,37 €

**Anhang 3 – Behandlungskosten für die Carbonisierung von Schäben am Standort Pahren**

Jahr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
kapital gebundene Kosten															
Abschr.	42.591 €	42.591 €	42.591 €	42.591 €	42.591 €	42.591 €	42.591 €	42.591 €	42.591 €	42.591 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Tilgung	17.036 €	15.617 €	14.142 €	12.607 €	11.011 €	9.351 €	7.624 €	5.829 €	3.962 €	2.020 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Zins EK	2.839 €	2.624 €	2.396 €	2.154 €	1.897 €	1.625 €	1.337 €	1.031 €	707 €	364 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
verbrauchsgebundene Kosten															
Strom	5.895 €	6.013 €	6.134 €	6.256 €	6.381 €	6.509 €	6.639 €	6.772 €	6.907 €	7.046 €	7.187 €	7.330 €	7.477 €	7.626 €	7.779 €
Wärme	8.139 €	8.302 €	8.468 €	8.637 €	8.810 €	8.986 €	9.166 €	9.349 €	9.536 €	9.727 €	9.921 €	10.120 €	10.322 €	10.528 €	10.739 €
Wasser	3.125 €	3.188 €	3.251 €	3.316 €	3.383 €	3.450 €	3.519 €	3.590 €	3.661 €	3.735 €	3.809 €	3.886 €	3.963 €	4.043 €	4.123 €
betriebsgebundene Kosten															
Personal	88.787 €	90.563 €	92.374 €	94.221 €	96.106 €	98.028 €	99.988 €	101.988 €	104.028 €	106.108 €	108.231 €	110.395 €	112.603 €	114.855 €	117.152 €
Wartung	9.465 €	9.654 €	9.847 €	10.044 €	10.245 €	10.450 €	10.659 €	10.872 €	11.089 €	11.311 €	11.537 €	11.768 €	12.003 €	12.243 €	12.488 €
Sonstige	3.000 €	3.060 €	3.121 €	3.184 €	3.247 €	3.312 €	3.378 €	3.446 €	3.515 €	3.585 €	3.657 €	3.730 €	3.805 €	3.881 €	3.958 €
Summe	180.877 €	181.611 €	182.322 €	183.009 €	183.670 €	184.301 €	184.901 €	185.467 €	185.996 €	186.486 €	144.342 €	147.229 €	150.173 €	153.177 €	156.240 €
Kosten je HTC-Feststoff in €/m³															
	30,15 €	30,27 €	30,39 €	30,50 €	30,61 €	30,72 €	30,82 €	30,91 €	31,00 €	31,08 €	24,06 €	24,54 €	25,03 €	25,53 €	26,04 €
Kosten je HTC-Feststoff in €/t															
	200,97 €	201,79 €	202,58 €	203,34 €	204,08 €	204,78 €	205,45 €	206,07 €	206,66 €	207,21 €	160,38 €	163,59 €	166,86 €	170,20 €	173,60 €

**Anhang 4 – Behandlungskosten für die Carbonisierung von Hanfstroh am Standort Saalfeld**

Jahr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
kapital gebundene Kosten															
Abschr.	23.081 €	23.081 €	23.081 €	23.081 €	23.081 €	23.081 €	23.081 €	23.081 €	23.081 €	23.081 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Tilgung	9.232 €	10.962 €	9.926 €	8.849 €	7.728 €	6.563 €	5.351 €	4.091 €	2.781 €	1.418 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Zins EK	1.539 €	1.842 €	1.681 €	1.512 €	1.331 €	1.141 €	938 €	724 €	496 €	255 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
verbrauchsgebundene Kosten															
Strom	3.486 €	3.556 €	3.627 €	3.699 €	3.773 €	3.849 €	3.926 €	4.004 €	4.084 €	4.166 €	4.249 €	4.334 €	4.421 €	4.510 €	4.600 €
Wärme	4.813 €	4.909 €	5.007 €	5.107 €	5.209 €	5.313 €	5.420 €	5.528 €	5.639 €	5.751 €	5.866 €	5.984 €	6.103 €	6.225 €	6.350 €
Wasser	5.000 €	5.100 €	5.202 €	5.306 €	5.412 €	5.520 €	5.631 €	5.743 €	5.858 €	5.975 €	6.095 €	6.217 €	6.341 €	6.468 €	6.597 €
betriebsgebundene Kosten															
Personal	52.500 €	53.550 €	54.621 €	55.713 €	56.828 €	57.964 €	59.124 €	60.306 €	61.512 €	62.742 €	63.997 €	65.277 €	66.583 €	67.914 €	69.273 €
Wartung	6.643 €	6.776 €	6.911 €	7.050 €	7.191 €	7.335 €	7.481 €	7.631 €	7.783 €	7.939 €	8.098 €	8.260 €	8.425 €	8.594 €	8.765 €
Sonstige	3.000 €	3.060 €	3.121 €	3.184 €	3.247 €	3.312 €	3.378 €	3.446 €	3.515 €	3.585 €	3.657 €	3.730 €	3.805 €	3.881 €	3.958 €
Summe	109.294 €	112.835 €	113.178 €	113.500 €	113.801 €	114.078 €	114.330 €	114.555 €	114.750 €	114.914 €	91.963 €	93.802 €	95.678 €	97.592 €	99.544 €
Kosten je HTC-Feststoff in €/m³															
	9,11 €	9,40 €	9,43 €	9,46 €	9,48 €	9,51 €	9,53 €	9,55 €	9,56 €	9,58 €	7,66 €	7,82 €	7,97 €	8,13 €	8,30 €
Kosten je HTC-Feststoff in €/t															
	60,72 €	62,69 €	62,88 €	63,06 €	63,22 €	63,38 €	63,52 €	63,64 €	63,75 €	63,84 €	51,09 €	52,11 €	53,15 €	54,22 €	55,30 €

**Anhang 5 – Behandlungskosten für die Carbonisierung vom Faser-Schäben-Gemisch am Standort Saalfeld**

Jahr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
kapital gebundene Kosten															
Abschr.	23.081 €	23.081 €	23.081 €	23.081 €	23.081 €	23.081 €	23.081 €	23.081 €	23.081 €	23.081 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Tilgung	9.232 €	10.962 €	9.926 €	8.849 €	7.728 €	6.563 €	5.351 €	4.091 €	2.781 €	1.418 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Zins EK	1.539 €	1.842 €	1.681 €	1.512 €	1.331 €	1.141 €	938 €	724 €	496 €	255 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
verbrauchsgebundene Kosten															
Strom	1.055 €	1.076 €	1.097 €	1.119 €	1.142 €	1.165 €	1.188 €	1.212 €	1.236 €	1.261 €	1.286 €	1.312 €	1.338 €	1.365 €	1.392 €
Wärme	1.456 €	1.485 €	1.515 €	1.545 €	1.576 €	1.608 €	1.640 €	1.673 €	1.706 €	1.740 €	1.775 €	1.811 €	1.847 €	1.884 €	1.921 €
Wasser	750 €	765 €	780 €	796 €	812 €	828 €	845 €	862 €	879 €	896 €	914 €	933 €	951 €	970 €	990 €
betriebsgebundene Kosten															
Personal	15.886 €	16.204 €	16.528 €	16.859 €	17.196 €	17.540 €	17.891 €	18.248 €	18.613 €	18.986 €	19.365 €	19.753 €	20.148 €	20.551 €	20.962 €
Wartung	6.643 €	6.776 €	6.911 €	7.050 €	7.191 €	7.335 €	7.481 €	7.631 €	7.783 €	7.939 €	8.098 €	8.260 €	8.425 €	8.594 €	8.765 €
Sonstige	3.000 €	3.060 €	3.121 €	3.184 €	3.247 €	3.312 €	3.378 €	3.446 €	3.515 €	3.585 €	3.657 €	3.730 €	3.805 €	3.881 €	3.958 €
Summe	62.643 €	65.251 €	64.642 €	63.994 €	63.305 €	62.572 €	61.794 €	60.967 €	60.091 €	59.161 €	35.096 €	35.797 €	36.513 €	37.244 €	37.989 €
Kosten je HTC-Feststoff in €/m³															
	52,20 €	54,38 €	53,87 €	53,33 €	52,75 €	52,14 €	51,49 €	50,81 €	50,08 €	49,30 €	29,25 €	29,83 €	30,43 €	31,04 €	31,66 €
Kosten je HTC-Feststoff in €/t															
	348,02 €	362,50 €	359,12 €	355,52 €	351,69 €	347,62 €	343,30 €	338,71 €	333,84 €	328,67 €	194,98 €	198,87 €	202,85 €	206,91 €	211,05 €

**Anhang 6 – Behandlungskosten für die Carbonisierung von Schäben am Standort Saalfeld**

Jahr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
kapital gebundene Kosten															
Abschr.	32.839 €	32.839 €	32.839 €	32.839 €	32.839 €	32.839 €	32.839 €	32.839 €	32.839 €	32.839 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Tilgung	13.136 €	15.617 €	14.142 €	12.607 €	11.011 €	9.351 €	7.624 €	5.829 €	3.962 €	2.020 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Zins EK	2.189 €	2.624 €	2.396 €	2.154 €	1.897 €	1.625 €	1.337 €	1.031 €	707 €	364 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
verbrauchsgebundene Kosten															
Strom	5.895 €	6.013 €	6.134 €	6.256 €	6.381 €	6.509 €	6.639 €	6.772 €	6.907 €	7.046 €	7.187 €	7.330 €	7.477 €	7.626 €	7.779 €
Wärme	8.139 €	8.302 €	8.468 €	8.637 €	8.810 €	8.986 €	9.166 €	9.349 €	9.536 €	9.727 €	9.921 €	10.120 €	10.322 €	10.528 €	10.739 €
Wasser	3.125 €	3.188 €	3.251 €	3.316 €	3.383 €	3.450 €	3.519 €	3.590 €	3.661 €	3.735 €	3.809 €	3.886 €	3.963 €	4.043 €	4.123 €
betriebsgebundene Kosten															
Personal	88.787 €	90.563 €	92.374 €	94.221 €	96.106 €	98.028 €	99.988 €	101.988 €	104.028 €	106.108 €	108.231 €	110.395 €	112.603 €	114.855 €	117.152 €
Wartung	9.465 €	9.654 €	9.847 €	10.044 €	10.245 €	10.450 €	10.659 €	10.872 €	11.089 €	11.311 €	11.537 €	11.768 €	12.003 €	12.243 €	12.488 €
Sonstige	3.000 €	3.060 €	3.121 €	3.184 €	3.247 €	3.312 €	3.378 €	3.446 €	3.515 €	3.585 €	3.657 €	3.730 €	3.805 €	3.881 €	3.958 €
Summe	166.575 €	171.859 €	172.571 €	173.258 €	173.919 €	174.550 €	175.150 €	175.716 €	176.245 €	176.735 €	144.342 €	147.229 €	150.173 €	153.177 €	156.240 €
Kosten je HTC-Feststoff in €/m³															
	27,76 €	28,64 €	28,76 €	28,88 €	28,99 €	29,09 €	29,19 €	29,29 €	29,37 €	29,46 €	24,06 €	24,54 €	25,03 €	25,53 €	26,04 €
Kosten je HTC-Feststoff in €/t															
	192,51 €	193,24 €	193,94 €	194,61 €	195,24 €	195,83 €	196,37 €	160,38 €	163,59 €	166,86 €	170,20 €	173,60 €	192,51 €	193,24 €	193,94 €