



# Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

**BAND 99 | Ausgabe 3**

**Agrarwissenschaft**  
**Forschung**  

---

**Praxis**

## Bioenergiedörfer im Wandel

### Betrachtungen des Einsatzes von Reststoffen sowie des Zubaus einer Pyrolyseanlage an Biogasbestandsanlagen unter den Gesichtspunkten der Nahwärmeversorgung und der Wirtschaftlichkeit

Von Roland Bauböck und Marianne Karpenstein-Machan

#### 1 Einleitung

Bioenergiedörfer (BED) sind Dörfer, die sich dadurch auszeichnen, dass sie die Abwärme der Biogasanlage (BGA) für eine gemeinschaftlich betriebene Nahwärmeversorgung für mindestens die Hälfte der Haushalte eines Dorfes oder einer Kommune nutzen (Definition nach Universität Göttingen (1)). Derzeit gibt es bereits 160 dieser Dörfer in Deutschland und weitere 45 sind in der Entstehung. Biogasanlagen von Bioenergiedörfern haben aufgrund ihres meist sehr guten Wärmenutzungskonzeptes eine Sonderstellung innerhalb der derzeit fast 9000 Biogasanlagen in Deutschland. An diesen Anlagen steht die Versorgung der Nahwärmekunden an erster Stelle.

Das BED-Konzept ist etabliert und hat sich bewährt. Von den Universitäten Kassel und Göttingen im Rahmen des Projektes „Innovative Konzepte und Geschäftsmodelle für zukunftsfähige Bioenergiedörfer“ in 2019/2020 durchgeführte Vor-Ort-Interviews und zusätzliche Fragebogenstudien haben ergeben, dass die meisten der BED gut funktionieren und die Akteure und Wärmekunden zufrieden sind. Dennoch besteht Anlass zur Sorge, dass Bioenergiedörfer nach dem Auslaufen der 20-jährigen EEG-Förderperiode durch Mindereinnahmen aus der Einspeisevergütung des Stromes in die Unwirtschaftlichkeit laufen (2).

Teure Anbaubiomasse und sinkende oder ganz wegfallende EEG-Förderungen erfordern neue Konzepte und Geschäftsmodelle, damit BED auch weiterhin wirtschaftlich betrieben werden können. Auf der Inputseite steht die Kostenreduktion durch ein erweitertes Substratspektrum. Inwieweit das durch alternative Energiepflanzen oder nur durch die vermehrte Nutzung von Abfall- oder Reststoffen möglich ist, kann nicht pauschal beantwortet werden. Aber auch auf der Outputseite von Biogasanlagen existieren Optionen. So kann beispielsweise der Gärrest durch eine Weiterverarbeitung in eine höhere Wertigkeit überführt und vermarktet werden. Auch eine Aufbereitung des Biogases zu Methan und dessen Einspeisung in das Gasnetz oder der Verkauf an Tankstellen kommt, standortabhängig, für Biogasanlagen in BED in Frage. Um die Versorgung des Nahwärmenetzes weiter

zu gewährleisten, müssen eventuell zusätzliche Wärmequellen an das Netz angeschlossen werden. Für so einen Fall soll im Folgenden der Einsatz einer Pyrolyseanlage zur Wärme- und Pflanzenkohleerzeugung bei Verwendung verschiedener Substrate wie Gärrest, verschiedene Stroharten und Hackschnitzel aus Landschaftspflegeholz, auf die Wirtschaftlichkeit hin untersucht werden. Die KfW-Förderung, der Handel mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten und die Produktpreise für Pflanzenkohlen haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Pyrolyseanlage. Diese Parameter fließen in die betriebswirtschaftliche Bewertung ein.

Ziel der Analyse ist es, Kosten- und Verkaufspreisschwellen für Biomassen und Pflanzenkohlen zu ermitteln, unter denen eine kostendeckende Wärmeproduktion, unter Annahme von gängigen Wärmepreisen möglich sein kann.

Im Anschluss werden die Umsetzungschancen des Geschäftsmodells anhand einer SWOT-Analyse für Bioenergiedörfer diskutiert.

## 2 Integration der Pyrolysetechnik an BED-Biogasanlagen zur Sicherung der Wirtschaftlichkeit und Wärmeversorgung

### 2.1 Ergänzende Biomasse-Wärmeerzeuger

Als neue Vermarktungsoptionen für Biogasanlagen nach dem Auslaufen der EEG-Vergütung sind u.a. die Einspeisung von Methan ins Erdgasnetz oder das Betreiben einer Hoftankstelle im Gespräch. Bei beiden Geschäftsmodellen wird ein Teilstrom oder die vollständige Biogasproduktion ausgekoppelt und einer Methanisierungsanlage zugeführt. Das aufbereitete Biomethan wird in den allermeisten Fällen in das Erdgasnetz eingespeist und trägt so zu einer Reduktion des Verbrauches von fossilem Erdgas bei.

Es stellt sich die Frage, ob diese Geschäftsmodelle auch sinnvoll sind für BED dessen verantwortliche Akteure in den Dörfern Wärmenetze für ihre ca. 25.000 Haushalte zu versorgen haben?

Werden solche Modelle in BED umgesetzt, bedeutet das, dass gegebenenfalls weniger Biogas verstromt wird und somit an den Blockheizkraftwerken (BHKWs) weniger Wärme anfällt. Auch durch den Wegfall einzelner BHKWs, die aus der EEG-Förderung auslaufen, könnten Wärmelücken in Nahwärmenetzen entstehen. Um solche Wärmelücken zu schließen, bräuchte das angeschlossene Wärmenetz dann eine weitere Wärmequelle. Im Wärmekonzept vieler Bioenergiedörfer mit Biogasanlage sind Öl- aber auch Hackgutkessel zur Spitzenlastherzeugung ein fester Bestandteil. Um zusätzliche Wärme zu erzeugen, könnte z.B. die Kesselleistung erweitert werden. Alternativ kommen Pyrolyseanlagen als zusätzliche Wärmequelle in Frage. Denn bei der Karbonisierung von Biomassen im Pyrolyseprozess entsteht neben der nutzbaren Abwärme, die aus der Verbrennung des Pyrolysegases gewonnen wird, zusätzlich vermarktbare Pflanzenkohle.

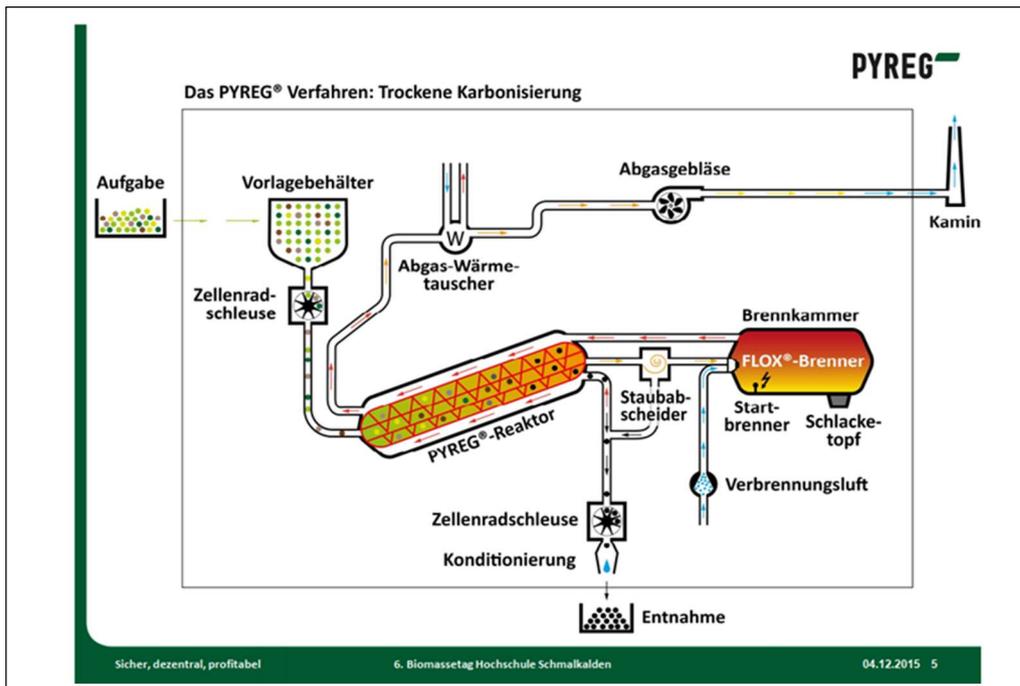
Beim Vergleich eines Hackgutkessels mit einem Pyrolyseofen für den Einsatz als Wärmeerzeugers in einem Nahwärmenetz kommen mehrere Unterschiede zum Tragen. Ein Hackgutkessel ist darauf ausgelegt mit einem möglichst hohen Wirkungsgrad in einer exothermen Reaktion Biomasse in Wärmeenergie umzuwandeln. Bei der Pyrolyse hingegen stellt die Wärme neben der Erzeugung von Pflanzenkohle nur ein Teilprodukt dar, denn ein Teil der Verbrennungswärme aus dem Pyrolysegas wird für die Aufrechterhaltung des Verkohlungsprozesses benötigt, es handelt sich also um eine endotherme Reaktion.

Durch die Erzeugung eines zweiten marktfähigen Produktes, der Pflanzenkohle, lassen sich die Mindererträge bei der Wärmeerzeugung aber kompensieren. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass es sich bei den erzeugten Kohlen um nach European Biochar Certificate (EBC) zertifizierte hochwertige Pflanzenkohlen und Pflanzenkohleprodukte handelt. Hier kommt es in erster Linie auf die Ausgangsbiomassen an. Denn obwohl - anders als beim Hackgutkessel - für die Pyrolyse vielfältige Biomassen als Substrate in Frage kommen, ist die Auswahl im Hinblick auf die Qualität des Endproduktes, der Pflanzenkohle, dennoch eingeschränkt (s. Kap 2.3). Im Folgenden steht die Anlagenerweiterung durch die Pyrolysetechnik im Fokus unserer Betrachtungen.

## 2.2 Technik der Pyrolyse

In Deutschland, anderen europäischen Ländern, aber auch weltweit, existieren bereits zahlreiche Pyrolyseanlagen. Die Technik ist bereits in den Markt eingeführt und es kann auf Herstellerdaten zu Kosten der Investition und des Betriebes solcher Anlagen zurückgegriffen werden. Ob und in welcher Ausgestaltung (Größe, Inputmaterial) der Zubau einer Pyrolyseanlage als zusätzlicher Wärmeerzeuger an einem bestehenden Biogasanlagenwärmenetz aus ökonomischer Sicht Sinn macht, soll im sich anschließenden Untersuchungs- und Ergebnisteil dargelegt und kritisch erörtert werden.

Bei dem Pyrolyseverfahren handelt es sich um eine thermo-chemische Konversion. Durch das Erhitzen von Biomassen in einem Reaktionsbehälter wird die Biomasse unter Ausschluss von Sauerstoff auf ein Temperaturniveau von mehreren 100 Grad gebracht. Je nach gewünschtem Ausgangsprodukt wird das Temperaturniveau eingestellt. Anders als bei herkömmlichen Biomassekesseln verbrennt das Substrat nicht, sondern trennt sich in eine Gas-, Öl- und Kohlephase. Insbesondere das brennbare Gas und die Pyrolyse- bzw. Pflanzenkohle sind angestrebte Endprodukte für weitere Verwertungspfade. Das Gas kann in einem emissionsarmen sogenannten FLOX-Verfahren (Flammlose Oxidation des Brennstoffs), zur Aufrechterhaltung des Temperaturniveaus im Reaktor und über einen Wärmetauscher zu Heizzwecken verwendet werden. Die Pflanzenkohle wird aus dem Prozess ausgeschleust und für eine breite Palette an Anwendungen als Produkt vermarktet. In Abbildung 1 ist das Pyrolyseverfahren des Herstellers Pyreg® schematisch dargestellt.



**Abbildung 1: Pyrolyseverfahren nach Pyreg®**

## 2.3 Anwendungsbereiche für Pflanzenkohlen

Das Verfahren der Verkohlung von Biomassen an sich ist vermutlich so alt wie die Holzkohleherstellung in frühen Kohlemeilern. Im industriellen Maßstab wurde diese Technik aber bisher hauptsächlich dafür eingesetzt, problematische Biomassen und Abfälle thermo-chemisch für eine sichere Deponierung aufzubereiten bzw. am Ende möglichst wenig problematischen Feststoff übrig zu behalten.

Haupteinsatzbereich in Deutschland war somit die Abfallwirtschaft. Mit dem Bekanntwerden von Terra-Preta Erden in den 1960er Jahren und deren wichtigem Bestandteil, der Pflanzenkohle, ist auch das Interesse am Pyrolyseverfahren zur Verkohlung von Biomasse stetig angestiegen. Insbesondere im Bereich der Anwendung von Pflanzenkohle als Bodenverbesserer und ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften lässt sich ein stark angestiegenes wissenschaftliches Interesse verzeichnen, was sich an der Anzahl der Publikationen in Fachzeitschriften ablesen lässt (3) (4).

Obwohl in zahlreichen Feld- und Laborversuchen der positive Effekt von Pflanzenkohlen auf Ertragshöhe und Pflanzengesundheit nachgewiesen werden konnte und im Querschnitt aller Studien eine Ertragssteigerung von +10% berechnet wurde, lässt sich keine allgemeingültige Empfehlung für das Ausbringen von Pflanzenkohle als Verstärker für Pflanzenwachstum aussprechen (5) (6).

Allerdings sind die Anwendungsbereiche für Pflanzenkohlen nicht nur auf das Ausbringen im Boden beschränkt. Die „Non-Soil Applications“ für Pflanzenkohle reichen von der Nutztierhaltung (Futterzugabe, Stalleinstreu) über die Anwendung im Biogasfermenter zur Steigerung der Biogasproduktion bis hin zum Einsatz in Baustoffen (Zementprodukte, Asphalt, Bioverbundwerkstoffe, Energiespeicher) (7) (8) (9) (10) (11).

Durch Wasserdampfaktivierung lässt sich aus geeigneten Pflanzenkohlen die zu besonders hohen Preisen gehandelte Aktivkohle für Filteranwendungen herstellen.

Es gilt mittlerweile als anerkannt, dass im Pyrolyseverfahren hergestellte Pflanzenkohlen einen Kohlenstoffspeicher darstellen, der den zuvor in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoff stabil fixiert. Studien hierzu gehen davon aus, dass von einer stabilen Einlagerung von mehreren 100 bis mehreren 1000 Jahren ausgegangen werden kann (12) (13). Je nach Pyrolyseverfahren (Temperatur, Verweildauer) bindet Pflanzenkohle das 3-fache ihres Eigengewichtes an CO<sub>2</sub>. Durch die Verkohlung von 3 t Biomasse (TM) lässt sich 1 t Pflanzenkohle gewinnen und 3 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente an Kohlenstoff einlagern.

### 2.3 Erzielbare Marktpreise für Pflanzenkohle in Abhängigkeit von der Qualität

Kohlenstoff- und Aschegehalte der Substrate haben einen großen Einfluss auf die Qualität der Pflanzenkohlen und bestimmen den Marktwert maßgeblich.

Pflanzenkohlen aus naturbelassenen holzigen Biomassen, mit C-Gehalten ab 80%, können nach „European Biochar Certificate“ (EBC) als Futterkohlen verkauft werden und erzielen nach einer aktuellen Internetrecherche (Stand 05/2021) Marktpreise von über 1000 €/Tonne. Jirka und Tomlinson (14) geben die mittleren Preise für Pflanzenkohlen für den internationalen Markt mit 2 \$/kg im Großhandel und 3 \$/kg im Einzelhandel an.

Auch mit weiterverarbeiteten Pflanzenkohlprodukten, wie Terra-Preta Erden, lassen sich hohe Marktpreise erzielen. Untersuchungen verschiedener Autoren haben gezeigt, dass Pflanzenkohlen aus Maisstroh (15) (16) Wirtschaftsdünger (17) (18) sowie Gräsern u. Pflanzenresten (17) (18) zwar geringere C-Gehalte und höhere Aschegehalte haben als Kohlen aus holzigen Ausgangsstoffen, deren Kationen-Austauschkapazität aber durchaus höher liegen kann als bei Pflanzenkohlen aus holziger Biomasse (17) (15).

Auch aus diesem Grund wird z.B. Pflanzenkohle mit Kohlenstoffgehalten unter 50% seit der Version 9.1 der EBC-Richtlinie vom Sept. 2020 (19) nicht mehr als „Pyrogenes Kohlenstoffhaltiges Material“ bezeichnet, sondern ist Kohlen mit höheren C-Gehalten gleichgestellt und kann eine EBC-Zertifizierung erlangen.

### 2.4 CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel mit Pflanzenkohlen

Die Produktion von Pflanzenkohlen aus Biomasse im Pyrolyseverfahren ist eine anerkannte Negativemissionstechnologie. Pro Tonne produzierter Pflanzenkohle werden etwa 3 Tonnen CO<sub>2</sub> langfristig in der Kohle gebunden (siehe oben). Somit eröffnet sich die Möglichkeit, mit Pflanzenkohlen in den Handel von CO<sub>2</sub>-Sequestrierungshandel einzusteigen. Um für diesen Geschäftsbereich einheitliche Regelungen für Marktakteure zu schaffen, wurde seitens der EBC, unter dem Namen C-

Sink ein Zertifizierungssystem ins Leben gerufen (20). Für die Berechnungen im Ergebnisteil werden sowohl die erzielbaren Gewinne mit und ohne Berücksichtigung von Erlösen aus dem CO<sub>2</sub>-Zertifikatshandel dargestellt. Hierfür wird der aktuelle CO<sub>2</sub>-Börsenpreis von 30 €/t angesetzt (Stand 05/2021).

### 3 Reststoffe als Substrate, deren Potenziale und geeignete Technik zur Energiegewinnung

Für die Pyrolysetechnik im Besonderen, aber auch Bioenergieanlagen grundsätzlich, ist es zielführend sog. Restbiomassen einzusetzen. Dadurch können durch Anbaubiomassen verursachte Substratkosten evtl. herabgesetzt und der Betrieb von Bioenergieanlagen wirtschaftlicher gestaltet werden. Da Restbiomassen oftmals räumlich verteilt anfallen und dadurch höhere Erntekosten entstehen können sowie im Hinblick auf die Verwertung in der Biogasanlage eine niedrigere Gasausbeute als z.B. Silomais erwarten lassen, ist ein Kostenvorteil nicht automatisch gegeben und muss für jedes in Frage kommende Substrat immer einzeln betrachtet werden. Im Falle von holzigen Biomassen wie dem Hackgut aus Landschaftspflegematerial kommt zudem keine Nutzung in einer BGA in Frage. Für diese Art von holziger Biomasse eignet sich eher eine Verbrennung in entsprechenden Biomassekesseln, Holzvergäsern oder die thermo-chemische Konversion in einer Pyrolyseanlage.

Im folgenden Teil werden drei, in der Kultur- und Agrarlandschaft vorkommende ausgewählte Restbiomassen (Stroh, Gärrest und Landschaftspflegeholz) mit ihren Eignungen und Nutzungspotenzialen für die Bioenergiegewinnung in Biogas- oder Pyrolyseanlagen kurz vorgestellt.

#### 3.1 Stroh von Getreide, Raps und Körnermais

Das jährlich in Deutschland anfallende Körnermais-, Raps- und Getreidestroh stellt ein erhebliches, bisher weitestgehend ungenutztes Biomassepotenzial dar.

Die nachhaltig nutzbare Menge Getreidestroh (nach Humusbilanzierung), gibt das Deutsche Biomasse Forschungszentrum (DBFZ) je nach Berechnungsweise, mit 8-13 Mio. t FM pro Jahr an (21) an.

Für das Strohaufkommen von Maisstroh wird sie von den Autoren auf 4 bzw. 7,5 Mio. t FM beziffert, das technische Potenzial von Rapsstroh ist deutlich geringer (1,5 Mio. t Trockenmasse), da aufgrund des brüchigen Strohs bei der Bergung viel auf dem Feld liegen bleibt (22).

Die räumliche Verfügbarkeit stellt sich sehr heterogen dar und ist abhängig von der Konzentration der Tierhaltung und dem Anbau von Kulturen wie Rüben und Kartoffeln, die kein Stroh liefern. Je größer der Maßstab bei räumlichen Betrachtungen ist, desto deutlicher wird das differenzierte Strohpotenzial einer Region. Gegenden mit viel Grünland- oder Waldanteil haben erwartungsgemäß auch geringere Strohaufkommen und umgekehrt. Da Stroh ein Substrat mit einem hohen Ligninanteil ist, kann es nicht ohne weitere Aufbereitung in einer Biogasanlage (BGA) vergoren werden. Als Substrat für eine

Pyrolyseanlage ist Stroh aufgrund seines niedrigen Wassergehaltes und hohen C-Gehaltes gut geeignet.

Da insbesondere Getreidestroh an sich schon einen Marktwert hat (als Stalleinstreu und Tierfutter und zunehmend auch als Dämmmaterial im Hausbau), hängt sicherlich auch dessen Verwertung als Substrat in BGA bzw. Pyrolyseanlagen von den jeweiligen Preisen, also dem jeweiligen Angebot und der Nachfrage ab. Weniger konkurrenzbehaftet, d.h. bisher wenig genutzt, sind andererseits das Stroh vom Mais- und Raps. Insbesondere für Körnermaisstroh liegen erste Forschungsversuche hinsichtlich der Silierung, Vergärung und der Methanausbeute vor (23) (24). Durch einen weiteren Ausbau der Bioökonomie (Nationale Forschungsstrategie Bioökonomie 2030) könnte es in der Zukunft aufgrund der guten Eigenschaften von Rapsstroh für Biowerkstoffe auch hier zu Nutzungskonkurrenzen kommen. Hier würde dann eine stoffliche Nutzung des Strohs in jedem Fall vor der energetischen Verwertung im Sinne einer Kaskadennutzung erfolgen müssen.

Wenn die für die Bodenökologie von Ackerflächen notwendige Humusbilanz durch die Entnahme von Stroh nicht negativ beeinträchtigt wird, dann spricht aus ökologischer Sicht nichts gegen den Einsatz von Stroh in Pyrolyse oder BGA. Wenn zusätzlich noch durch den Stroheinsatz der Anteil von Energiemais in sehr maishaltigen Fruchtfolgen reduziert werden kann, dann wäre diese Verschiebung sicherlich auch als positiv einzustufen.

Generell kann daher gesagt werden, dass eine nachhaltige Nutzung von Stroh zur Biogasgewinnung oder als Substrat für die Pyrolyse aus Sicht der Agrarökologie sinnvoll sein kann.

### 3.2 Holzhackschnitzel aus der Landschaftspflege

Aus Sicht der Ökologie wäre es sicherlich sinnvoll, wenn Hackschnitzel aus Landschaftspflegeholz im regionalen Umkreis thermisch genutzt würden. Gehölze in der Agrarlandschaft und als Straßenbegleitgrün müssen aus landschafts- und wegepflegerischer Sicht regelmäßig geschnitten werden. Aus diesem Grund fällt Landschaftspflegeholz nahezu überall und kostengünstig an. Einerseits wird durch Pflegeschnitt und Nutzung von Hecken und Gehölzen ein Beitrag zum Erhalt der Kulturlandschaft geleistet und andererseits der Nutzungsdruck durch die Entnahme von Energieholz aus dem Wald verringert.

Brosowski (22) beziffert das ungenutzte technische Potenzial an Landschaftspflegeholz auf etwa 1,8 Mio. t TM pro Jahr.

Die zuständigen Kommunen und Gemeinden müssen das Material entweder zu entsprechenden Sammelplätzen abfahren oder vor Ort häckseln, beides ist mit Kosten verbunden. Auch Dienstleister aus der Privatwirtschaft sammeln Landschaftspflegeholz im Auftrag von Gemeinden ein, um es dann an Privat- und Gewerbekunden zu verkaufen oder einem Biomasseheizwerken zuzuführen.

Hackschnitzel aus Landschaftspflegeholz können für Hackschnitzelkesselbetreiber eine kostengünstige oder ggf. auch kostenlose Alternative zu Hackschnitzeln aus Waldrest- und Waldschwachholz darstellen, wenn der Hackschnitzelkessel für Landschaftspflegeholz geeignet ist und über eine robuste Technik mit Störstoffauslese und „Brecherfunktion“ für überlange Holzstücke verfügt. Wichtig ist hierbei die Qualität des Brenngutes. Es sollte möglichst homogen sein und keine zu großen Stücke enthalten. Zu hohe Feuchtegehalte, hohe Fremdstoffanteile (Steine, Sand) und ein hoher Rindenanteil können Störungen im Anlagenbetrieb hervorrufen. Bei nicht besonders für Materialmix ausgelegten Kesseln sollte der Anteil des Landschaftspflegeholzes nicht über 30 Prozent betragen. Sofern die Hackschnitzel die Anforderungen eines Regelbrennstoffes nach 1. BImSchV, § 3 Absatz 1 erfüllen, können diese aus rechtlicher Sicht eingesetzt werden. Für den Einsatz als Substrat in einer Pyrolyseanlage gelten für Hackschnitzel prinzipiell die gleichen Regeln wie für Hackschnitzelkessel außer, dass hier die BImSchV nicht für die Verbrennungsemissionen der Biomasse sondern für das produzierte Gas greift. Weiterhin müssen für eine Zertifizierung der Pflanzenkohlen die Richtlinien des EBC (European Biochar Certificate) eingehalten werden.

### 3.3 Gärreste

In Deutschland fallen (Stand 2018) jährlich ca. 82 Mio. Tonnen an Gärresten aus Biogasanlagen an. Ausgangsstoffe sind:

- Wirtschaftsdünger (40 Mio. t),
- Nachwachsende Rohstoffe (NawaRo 36 Mio. t) und
- Reststoffe (6 Mio. t) (25).

An einer durchschnittlichen Biogasanlage mit 500 kW elektrischer Leistung fallen etwa 10.000 t Gärrest pro Jahr an. Da Gärreste einen wertvollen organischen Dünger für landwirtschaftliche Betriebe darstellen, der in den allermeisten Fällen auf Acker- oder Grünlandflächen ausgebracht wird, gelten auch für Gärreste die Düngemittelverordnung (DüMV) und die Düngeverordnung (DüV). Die DüMV regelt Kennzeichnung und Zulassung von Düngemitteln und über die DüV wird die Ausbringung von Gärresten im Hinblick auf Ausbringungsmengen, Zeiträume, Abstände zu Gewässern sowie Ausbringungstechniken festgelegt. Insbesondere durch die letzte Novellierung der DüV (2020) sind Mengen und Ausbringungszeiten für organische Düngemittel weiter eingeschränkt worden und Betriebe, die nicht über genügend eigene Flächen zur Ausbringung von Gülle/Gärresten verfügen, müssen künftig Lagerkapazitäten von 9 Monaten (bisher 6) nachweisen (26). Auch die stoffliche Zusammensetzung von Gärresten mit deren Ausgangs- und Inhaltsstoffen sind relevant und werden rechtlich über die DüMV geregelt (27). Für Gärreste, die aus Bioabfällen pflanzlicher- oder tierischer Herkunft stammen, gilt nicht die DüMV sondern die Bioabfallverordnung (BioAbfV) (28). Je nachdem

welche Substrate vergoren werden, weisen auch die Gärreste unterschiedliche stoffliche Zusammensetzungen auf. Gärreste aus NawaRo enthalten z.B. höhere Trockenmasse- und Nährstoffgehalte als Gärreste aus Rinder- oder Schweinegülle (25) (29). Der Düngewert von Gärrest (NawaRo) wird mit 7 EUR/t FM (flüssig) bzw. 11 EUR/t FM (fest) angegeben (29). Für den überbetrieblichen Handel mit Gärresten existieren Gütesiegel (VDLUFA, QLA, BGK), die gleichbleibende Qualitätsstandards sichern helfen (29). Trotz der ackerbaulichen Vorteile von Gärresten, kann es in Gebieten mit Nährstoffüberhängen (Milchviehregionen, Tiermastregionen) notwendig sein, Gärrest zu „exportieren“, also in Regionen zu verbringen, in denen das Grundwasser nicht durch zu hohe Nitrateinträge aus der Landwirtschaft gefährdet ist. Da unbehandelte Gärreste zu einem großen Teil aus Wasser bestehen und daher nicht besonders transportwürdig sind, werden im anschließenden Teil verschiedene Aufbereitungsverfahren für Gärreste vorgestellt, um den Einsatz in Pyrolyseanlagen zu ermöglichen.

### 3.3.1 Pyrolysesubstratgewinnung aus Gärrest

Mit der Pyrolysetechnik können verschiedenste Biomassen verarbeitet werden. Der Hersteller Pyreg empfiehlt jedoch für einen optimalen Betrieb, dass die Trockenmassegehalte (TM) über 65% liegen sollten und die Biomassen einen Mindestbrennwert von 10 MJ/kg aufweisen.

Um einen sehr feuchten Reststoff wie Gärrest verwenden zu können, muss dieser erst entwässert und getrocknet werden. Hierfür haben sich Pressverfahren (Pressschnecke) sowie Bandtrockner bewährt. Für die folgenden Berechnungen wird der Einsatz einer Pressschnecke des Herstellers Regenis und ein Bandtrockner des Herstellers Dorset (500 kW) zugrunde gelegt. Für die Separation und Trocknungsberechnung des feuchten Gärrestes werden Daten der LWK-Niedersachsen (30) verwendet.

### 3.3.2 Schritte der Gärrestaufbereitung

Der angenommene TM-Gehalt bei Entnahme aus dem Gärrestlager liegt bei 8%. Mit der Pressschnecke lässt sich der TM-Gehalt in der Dickphase auf etwa 25% steigern. Die Dünnphe wird mit 5,6% TM-Gehalt in das Gärrestlager zurückgeleitet. Pro m<sup>3</sup> Gärrest landen 124,72 kg in der Dickphase, wovon ca. 31 kg reine Trockenmasse und ca. 94 kg Wasser sind. Dieser Wasseranteil muss nun durch die Trocknung auf 20% reduziert werden.

**Tabelle 1:**  
**Stoffstromverteilung nach Pressschneckenseparation**

Schritt 1:	Separation mit Pressschnecke				
1 m3 Gärrest mit 8 % TM	kg H2O	kg TM	kg gesamt	% TM	
Dünnphase	877,2	49,1	876,3	5,6	
Dickphase	93,8	31	124,7	25	
<b>Es werden 38,7 % des Feststoffes in die Dickphase gedrückt</b>					

Um 124,72 kg eingedickten Gärrest mit 25% TM auf 80% TM zu bringen, müssen von den darin enthaltenen 93,79 kg Wasser 86,06 kg verdunstet werden:

**Tabelle 2:**  
**Zu verdunstendes Wasser nach Gärresttrocknung**

Schritt 2:	Zu verdunstendes Wasser		
Posten	Menge/Anteil	Einheit	
Wasseranteil	93,8	kg	
TM-Anteil	30,9	kg	
Gesamtgewicht	124,7	kg	
zu verdunstendes Wasser	86,1	kg	
Restwasser	7,7	kg	
Gewicht neu	38,7	kg	
TM-Anteil	80	%	
H2O-Anteil	20	%	

Nach der Verdunstung beträgt das Restwasser: 7,73 kg ( $93,79 \text{ kg} - 86,06 \text{ kg} = 7,73 \text{ kg}$ ) und die Trockenmasse 30,93 kg. Dies ergibt eine Gesamtmasse von 38,66 kg mit jeweils 20% Wasseranteil und 80% TM-Anteil.

Bei einem mittleren anzunehmenden Energiebedarf für die Gärresttrocknung von 1 kWh pro kg Wasser werden also 86,06 kWh pro m<sup>3</sup> Gärrest oder 8.606 kWh für 100 m<sup>3</sup> Gärrest (jeweils Frischmassegewicht) an Abwärme benötigt.

Von 100 m<sup>3</sup> Gärrest bleiben nach der Trocknung also  $30,93 \text{ kg} \cdot 100 \text{ m}^3$ , also ca. 3,1 t reine Trockenmasse (anteilig 80%) plus der Wasseranteil von  $7,73 \text{ kg} \cdot 100 \text{ m}^3$ , also ca. 773 kg (anteilig 20%) übrig.

**Tabelle 3:****Benötigte Energie und Kosten zur Bereitstellung von 1 Tonne TM für die Pyrolyse**

<b>Energieeinsatz u. Kosten (1 t TM)</b>		
<b>Posten</b>	<b>Menge/Anteil</b>	<b>Einheit</b>
Energie pro kg Wasser	1	kWh
TM-Output (100m <sup>3</sup> GR)	3,1	t
Energie (th.)	2782,3	kWh/t TM
Energiepreis (th.)	0,03	€/kWh
Energiekosten (th.)	83,5	€/t TM
Energiepreis (el.)	0,2	€/kWh
Energiebedarf (el.)	32,3	kWh/t TM
Energiekosten (el.)	6,5	€/t TM

Um eine Tonne Trockenmasse aus Gärrest für die Pyrolyseanlage zu gewinnen, werden 8.606 kWh / 3,1 t TM = 2.782,3 kWh an thermischer Energie benötigt. Die Pyrolyseanlage sollte in den Monaten und Zeiten, wenn im Nahwärmenetz nur wenig Wärme abgenommen wird (Sommer) und Überschusswärme anfällt, betrieben werden. Da die Wärme betriebsintern und überschüssig anfällt, wird für die im Folgenden dargestellten Berechnungen, bei denen der Gärrest als Substrat für die Pyrolyse zum Einsatz kommt, dieser als kostenneutral betrachtet. Sämtliche Kosten der Erzeugung (Fixkosten, variable Kosten) sind in der Wirtschaftlichkeitsberechnung für diese Variante enthalten.

### 3.3.3 Kosteneinsparung durch verringerte Gärrestausbringung/Lagerung

Obwohl Gärreste einen hochwertigen Lieferanten für Nährstoffe und Kohlenstoff für die Humusbildung darstellen, sind sie für viele Biogasanlagen eher ein Kostenfaktor als eine Einnahmequelle. Dies liegt zum einen an den über die neue Düngeverordnung vorgegebenen langen Lagerfristen für Gülle und Gärreste als auch an der verbreiteten Nährstoffübersorgung von Ackerflächen und den damit verbundenen Nitratbelastungen des Grundwassers. So entstehen für die Gärreste Kosten der Lagerung, des Transportes und der Ausbringung, die im Durchschnitt, je nach Anlagenstandort und den örtlichen Gegebenheiten bei ca. 16 €/m<sup>3</sup> liegen (31).

**Tabelle: 4:**  
**Kosteneinsparung bei Verwendung des Gärrestes als Pyrolysesubstrat**

Kosteneinsparung beim Gärrest		
Posten	Menge/Anteil	Einheit
Menge Gärrest (frisch)	100	m <sup>3</sup>
Dickphase pro 100 m <sup>3</sup>	12,47	m <sup>3</sup>
Menge an TM	3,1	t
Kosten für GR (Lager etc.)	16,0	€/m <sup>3</sup>
Kosteneinsparung	64,4	€/t TM

Bezogen auf 100 m<sup>3</sup> Gärrest (frisch) werden 12,47 m<sup>3</sup> Dickphasenanteil (Tabelle 4) durch Abpressen und Trocknen der Weiterverarbeitung in der Pyrolyse zugeführt. Diese 12,47 m<sup>3</sup> enthalten 3,1 t Trockenmasse (25%). So können pro Tonne erzeugter Trockenmasse die Kosten für Lagerung, Transport und Ausbringung für ca. 4 m<sup>3</sup> Gärrest eingespart werden. Bei Kosten von 16 € pro m<sup>3</sup> sind das also 64,4 €, die pro Tonne erzeugtem Brennstoff (Trockenmasse) eingespart werden.

$$100 \text{ m}^3 * 12,47\% = 12,47 \text{ m}^3 \rightarrow \frac{12,47 \text{ m}^3}{3,1 \text{ t TM}} = 4,023 \text{ m}^3/\text{t TM} * 16 \text{ €/m}^3 = 64,4 \text{ €/t TM}$$

Insgesamt können 24% der in der Pyrolyse benötigten Substratmenge durch getrockneten Gärrest abgedeckt werden. Diese Begrenzung begründet sich durch die zur Verfügung stehende Überschuss-Wärmemenge in Höhe von 1.500 MWh/Jahr. Die restlichen 400 MWh an Überschusswärme können zur Trocknung von Hackschnitzeln oder anderen Biomassen verwendet werden.

Je nachdem, ob am Standort Gärrest getrocknet und der Pyrolyse zugeführt werden soll und welche zusätzlichen oder sonstigen Substrate zum Einsatz kommen, variieren sowohl die fixen, als auch die variablen Betriebskosten. Weitere Stellgrößen, die die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage erheblich beeinflussen, sind die während der Anlagenbetriebszeit erzielbaren Erlöse für die erzeugte Wärme (€/kWh) für das Nahwärmenetz und die Pflanzenkohle (€/t). Mittels einer Sensitivitätsanalyse für diese drei Variablen (Substratpreis, Wärmepreis, Pflanzenkohlepreis) wird im Ergebnisteil ein Überblick über die Wirtschaftlichkeit der Anlage unter verschiedenen Einkaufs- und Verkaufsbedingungen gegeben.

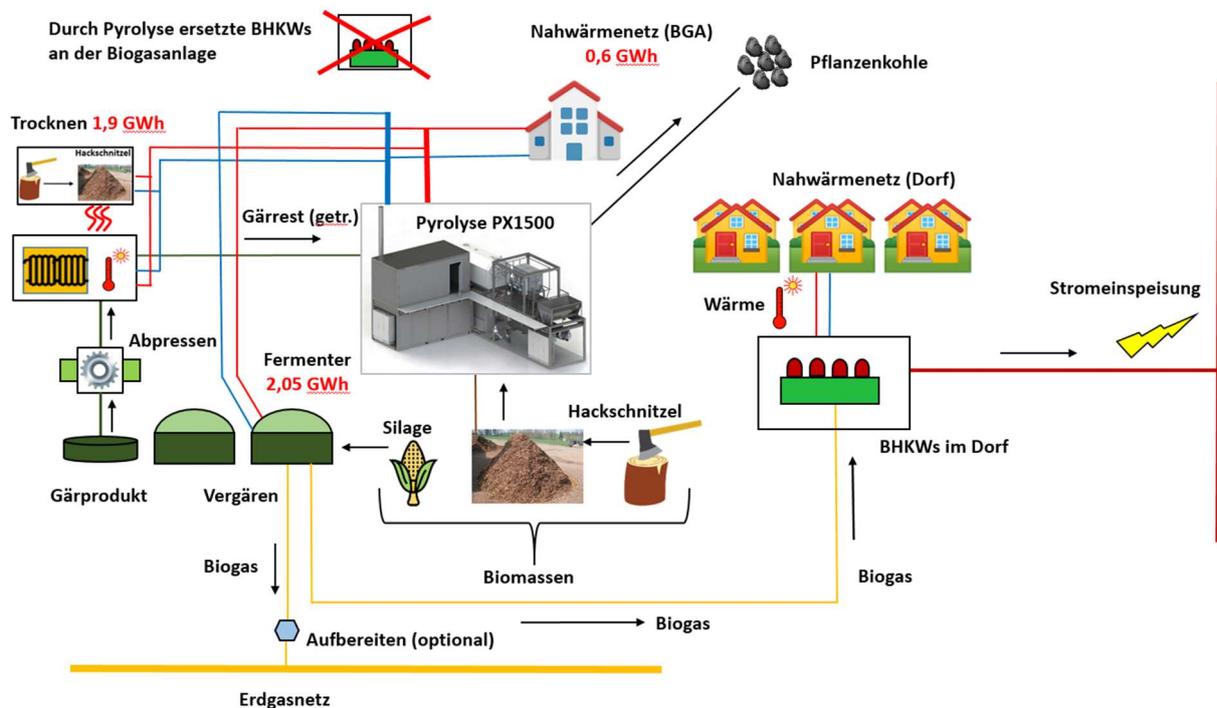
## 4 Szenarien für die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Pyrolyse und deren Annahmen

In den hier vorgestellten Wirtschaftlichkeitsberechnungen wird folgende Ausgangssituation betrachtet. Eine landwirtschaftliche Biogasanlage versorgt ein kleines Nahwärmenetz im Bereich des Anlagenstandortes sowie ein größeres Dorf-Nahwärmenetz, das über eine 1,5 km lange Biogasleitung und die daran angeschlossenen Satelliten-BHKWs mit Wärme versorgt wird. Da die BHKWs am Dorfstandort (Heizzentrale-Dorf) einige Jahre nach den BHKWs am Anlagenstandort ans Netz gegangen sind, werden diese aufgrund des längeren Vergütungszeitraumes durch das EEG bei diesen Betrachtungen außen vorgelassen. Für die BHKWs am Anlagenstandort könnte jedoch der Fall eintreten, dass trotz der erfolgreichen Teilnahme an einer Ausschreibung für die 10-jährige Weiterförderung durch das EEG, der in diesen BHKWs produzierte Strom zu Börsenpreisen vermarktet werden müsste. Gesetzt dieser Fall tritt ein, dann wäre ein wirtschaftlicher Weiterbetrieb der BHKWs unter heutigen Gesichtspunkten kaum mehr möglich. Dies begründet sich in erster Linie darin, dass die zu erwartenden Stromerlöse am Strommarkt nicht ausreichen, um die Biogasgestehungskosten (Betrieb der Biogasanlage) und die Kosten für den Betrieb der BHKWs (Strom- und Wärmeproduktion) zu decken. Weiterhin könnte der Fall eintreten, dass der Anlagenbetreiber in eine Methanaufbereitungsanlage investiert, um einen Teil der produzierten Biogasmenge in das Gasnetz einzuspeisen oder in Kooperation mit einer Tankstelle in den Verkehrssektor zu verkaufen, eventuell auch über eine eigene Hoftankstelle. Da sich beim Eintreten beider Fälle sowohl die Beheizung des Fermenters als auch die Versorgung des kleinen Nahwärmenetzes am Anlagenstandort schwierig gestalten würden, soll eine Pyrolyseanlage mit einer thermischen Leistung von 1.500 kW als ergänzender Wärmeerzeuger in das bestehende System der Biogasanlage integriert werden. Die Pyrolyseanlage hat einen angenommenen Brennstoffbedarf von 2.250 Tonnen Trockenmasse pro Jahr, woraus wiederum etwa 560 t Pflanzkohle hergestellt werden (vgl. Tabelle 5). Das bei der Biomasseverkohlung entweichende Pyrolysegas wird in einem Brenner schadstoffarm (FLOX<sup>®</sup>-Verfahren) verbrannt und die Verbrennungswärme über einen Wärmetauscher nutzbar gemacht. Das FLOX<sup>®</sup>-Verfahren ermöglicht eine Verbrennung des Gases mit stark reduzierten Stickstoffemissionen (NO<sub>x</sub>). Nach Abzug der Wärmemenge, die für die Aufrechterhaltung des Pyrolyseprozesses benötigt wird, können über das Jahr gerechnet 600 kW, also mehr als 1/3 von ihr für Heizzwecke oder die Gärresttrocknung ausgekoppelt werden.

**Tabelle 5:**  
**Technische Daten einer Pyrolyseanlage (Angaben lt. Hersteller Pyreg®)**

<b>Typ</b>	<b>PX 1500</b>
<b>Hersteller</b>	<b>Pyreg</b>
Wärmeleistung in kW	1.500
Auskoppelbar (Wärme) kW	600
Biomasseinput t/a (= 100% TM)	2.250
Output Pflanzkohle (t/a)	560
Betriebsstunden (Jahr)	7.500
Strombedarf kW	45
<b>Auskoppelbare Jahreswärmeproduktion in MW!</b>	<b>4.500</b>

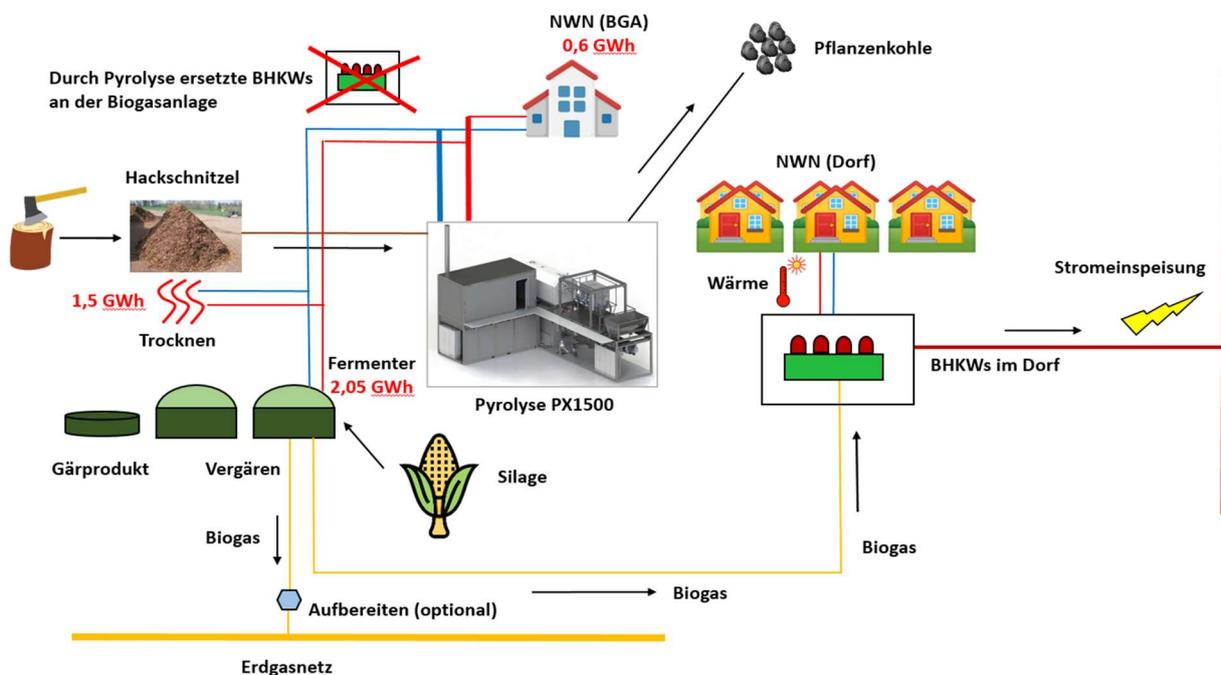
Bei 7.500 jährlichen Betriebsstunden ergibt sich eine nutzbare Brutto-Jahreswärmemenge von 4,5 Mio. kWh. Von den auskoppelbaren 4,5 Mio. kWh werden jährlich etwa 2,05 Mio. kWh für die Beheizung des Biogas-Fermenters und etwa 0,6 Mio. kWh für den Betrieb des kleinen Nahwärmenetzes am Anlagenstandort benötigt. Somit ergibt sich eine Überschusswärme von rd. 1,9 Mio. kWh, die für die Gärrest- und Biomassetrocknung eingesetzt werden kann. In Abbildung 2 ist diese Anlagenkonstellation für das Szenario 1 schematisch dargestellt.



**Abbildung 2: Anlagenschema für Szenario 1, Pyrolyseanlage (1500 kW) als ergänzender Wärmeerzeuger plus Gärrest- und Hackschnitzeltrocknung**

Alternativ wird in den folgenden Berechnungen auch eine Variante mit Holzhackschnitzel als Substrat betrachtet (Szenario 2), hier entfällt die Technik der Aufbereitung (Separierung und Trocknung). Durch

den Wegfall entstehen ganzjährig Wärmeüberschüsse, die zur Trocknung von z.B. Hackschnitzeln oder anderen Biomassen verwendet werden. Hierfür muss das Substratlager mit einem Lochblech-Trocknungsboden versehen und ein Teil der Abwärme mittels eines Gebläses in das Lager geführt werden (s. Abbildung.3).



**Abbildung 3: Anlagenschema für Szenario 2, Pyrolyseanlage (1500 kW) als ergänzender Wärmeerzeuger plus Hackschnitzeltrocknung**

#### 4. 1 Kosten der Pyrolysetechnologie

Pyrolyseanlagen werden mittlerweile von verschiedenen Herstellern und in unterschiedlichen Leistungsklassen angeboten. Aufgrund der Tatsache, dass Pyrolyseanlagen noch nicht in der Breite als Technologie angekommen sind, existiert in diesem Bereich bisher keine vergleichende Marktübersicht hinsichtlich der Investitions- und Betriebskosten. Für den seit über 10 Jahren am Markt befindlichen Hersteller Pyreg<sup>®</sup> aus Dörth, Nordrhein-Westfalen sieht es hingegen anders aus. Die Datenlage für die Pyreg<sup>®</sup>-Anlagen ist gut und bei den für diese Berechnungen verwendeten Preisen und Kosten handelt es sich um Praxisdaten und Direktauskünfte des Herstellers. Pyreg<sup>®</sup> stellt eine kleine Anlage mit 500 und eine große Anlage mit 1500 kW Nennleistung her. Für diese Studie wurde, aufgrund der größeren Abwärmeleistung, im Fallbeispiel von der größeren Anlage ausgegangen. Neben den reinen Anlagenkosten, in Höhe von 1,54 Mio. € muss noch in periphere Technik (249,6 T €), das Substratlager (145 T €), eine Halle mit Fundament (55,5 T €) und die Versorgungsanschlüsse (15 T €) investiert werden (Tabelle 6). Laut Auskunft von Fa. Pyreg<sup>®</sup> kann für die Errichtung einer solchen Anlage ein Zuschuss der KfW-Bank in Höhe von bis zu 55% der Investitionskosten aus dem Förderprogramm 295 (Energieeffizienz in der Wirtschaft – Prozesswärme aus Erneuerbaren Energien) in Anspruch

genommen werden. Für die folgenden Berechnungen wurden alle Varianten jeweils mit und ohne den Investitionszuschuss gerechnet.

**Tabelle 6:**  
**Investitionskosten für die Pyrolyseanlage, notwendige Peripherie und Gebäude sowie Kosten des Betriebes**

Investitions- und Betriebskosten Pyrolyse	
Anlage 331 m <sup>3</sup>	1.540.600 €
Peripherie (Absackstation, etc.)	249.600 €
Fundament + Bodenplatte (100 m <sup>2</sup> zu 100 €/m <sup>2</sup> )	10.000 €
Substratlager	145.000 €
Halle (Leichtbau), 700 m <sup>3</sup> zu 65€/m <sup>3</sup>	45.500 €
Anschlüsse (Wasser, Strom, Internet)	15.000 €
<b>Gesamtinvestition (förderfähig)</b>	<b>2.005.700 €</b>
Tilgungszuschuss KfW Förderung	55%
Invest minus Zuschuss (förder)	902.565 €
Finanzierungskosten (4% p.a.)	-109.656 €
Betriebskosten (fix)/a	-169.008 €
Betriebskosten (var)/a	-140.336 €

Quellen: Pyrolyseanlage; Auskunft der Fa. Pyreg® (04/2021) Bauseitig: Internetrecherche

Die jährlichen Kosten des Betriebes setzen sich aus Kosten der Finanzierung (Abtrag und Zinsen) in Höhe von 109,6 T €, den Fixkosten (169 T €) und den variablen Kosten (140,3 T €) zusammen. Wenn zusätzlich Gärrest getrocknet werden soll, muss in eine Pressschnecke (Regenis GT 200) und einen Bandrockner (Dorset, 500 kW<sub>th</sub>) mit den zugehörigen Bauelementen investiert werden (Tabelle 7). Die Gesamtinvestitionen hierfür belaufen sich auf 345 T €. Die jährlichen Betriebskosten der beiden Technikkomponenten (8.054 € und 60.688 €) sind jeweils die Summen aus Finanzierungs-, Fix- und variablen Kosten. Für die Trocknungswärme werden keine Kosten angenommen, da es sich um Überschusswärme handelt, die betriebsintern anfällt und für die es, außer für Trocknungszwecke, keine weitere Verwendung gibt. Mit der zur Verfügung stehenden Wärmemenge (1.500 MWh) lassen sich 539 t reine Trockenmasse (mit Restfeuchte 20%) erzeugen. Die hierfür benötigte Frischmenge an Gärrest beträgt 17.430 t und die (nach dem Abpressen) in der Pyrolyse verarbeitete Menge beträgt 2.174 t (entsprechend 12,47 Vol.%). Werden Kosten der Lagerung, des Transportes und der Ausbringung des Gärrest mit 16 €/m<sup>3</sup> zugrunde gelegt (LWK-Niedersachsen), so kommt es hier zu einer Betriebskosteneinsparung von 34.782 € pro Jahr durch die Trocknung. Weiterhin können Einnahmen von etwa 1.500 € jährlich mit dem Verkauf von Ammonium-Sulfat Dünger aus der Abluftwäsche der Dorset Anlage erzielt werden. Die Gesamtkosten der Trocknung des Gärrestes belaufen sich auf 77.460 €/Jahr.

**Tabelle 7:**  
**Investitions- und Betriebskosten für Separation und Trocknung**

Pressschnecke (Regenis GT 200)*	50.000 €
Bandrockner (Dorset 500)**	240.000 €
Bodenplatte, Fundament (100 m <sup>2</sup> zu 100 €/m <sup>2</sup> )	10.000 €
Halle (Leichtbau), 700 m <sup>3</sup> zu 65€ /m <sup>3</sup>	45.500 €
Betriebskosten (Regenis, gesamt )	-8.054 €
Betriebskosten (Dorset, gesamt )	-60.688 €
Wärmekosten (0 ct./kWh, da betriebsintern)	0 €
Energieeinsatz (th.) in MWh	1.500
Jahresmenge (TM in t)	539
Jahresmenge (Gärrest, frisch in m <sup>3</sup> )	17.430
Einsparung (Gärrestmenge in m <sup>3</sup> )	2.174
Einsparung (monetär bei 16 €/m <sup>3</sup> Gärrestkosten)	34.782 €
Einnahmen Flüssigdünger (ASL zu 15 €/m <sup>3</sup> )	1.500 €
Jahreskosten Trocknung	-32.460 €
Kosten pro Tonne Trockenmasse an Substrat	-60 €

Quellen: \*Regenis: Internetrecherche \*\*Dorset: LWK-Niedersachsen (32)

#### 4.2 Kosten der Pyrolysesubstrate und Varianten für die Wirtschaftlichkeitsberechnung

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebes werden drei verschiedene Restbiomassen als Substrate betrachtet. Zum einen die Hackschnitzel aus Landschaftspflegematerial, für die ein Einkaufspreis von 120 €/t TM (35% Wassergehalt) angenommen wird (33). Für die Verwendung des Gärrest als Pyrolysesubstrat fallen Investitions- und Betriebskosten für die Separierung und Trocknung an (s. Tabelle 7). Die Trocknung des Gärrestes mit Abwärme am Anlagenstandort bleibt kostenneutral. Als drittes Substrat wird Getreide- und Rapsstroh geprüft. Für das Stroh wird ein Einkaufspreis von 100 €/t TM angenommen. Je nach Saison und Verfügbarkeit kann der Preis auch durchaus niedriger als 100 € ausfallen, aber so soll sichergestellt werden, dass bei diesem nicht unerheblichen Kostenfaktor ein Puffer nach oben gegeben ist.

Folgende Varianten wurden somit auf Wirtschaftlichkeit geprüft:

**Variante 1:** die Pyrolyseanlage wird zu 100% mit Holzhackschnitzeln beschickt.

**Variante 2:** ein Mix aus 38% Hackschnitzel, 38% Stroh sowie 24% getrocknetem Gärrest

**Variante 3:** ein Mix aus 76% Holzhackschnitzel und 24% getrocknetem Gärrest.

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung des Anlagenbetriebes wurden je nach Ausgangssubstrat für die Pyrolyse drei erzielbare Verkaufspreise für die Pflanzenkohlen angenommen.

Verkaufspreise für Pflanzenkohlen aus:

- 1) Gärrest: 300 €/t
- 2) Stroh: 600 €/t
- 3) Holzhackschnitzeln: 1000 €/t

Bei den Berechnungen mit Substratmischen fließen diese Preise entsprechend anteilig in die erzielbaren Erlöse ein.

**Tabelle 8:**

**Varianten des Substratmixes und prozentuale Anteile sowie erwarteter Erlös**

Varianten	Anteile in Prozent	Erwarteter Erlös in €/t
1. Holzhackschnitzel	100	1.000
2. Gärrest/Stroh/Holzhackschnitzel	24/38/38	680
3. Gärrest/Holzhackschnitzel	24/76	832

## 5 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Erwartungsgemäß haben die zunehmenden Pflanzenkohlepreise einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit aller 3 Varianten. Die rot-gestrichelten Linien mit den Beträgen 1.000 €, 680 € und 832 € markieren jeweils die für den Substratmix angenommenen maximalen Verkaufspreise für die erzeugten Kohlen. Die Variante 1 (Abbildung 4) mit 100% Hackschnitzelbeschickung schneidet wirtschaftlich am besten ab, trotzdem wird die Gewinnschwelle erst bei einem Kohleerlöspreis von 850 €/t einschließlich KfW- Förderung und den Einnahmen aus dem CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel erreicht. Kann die Pflanzenkohle zu einem Höchstpreis von 1000 €/t vermarktet werden, würde in einem Berechnungszeitraum von 20-Jahren ein Gewinn vor Steuern von ca. 850.000 € bis 1,8 Mio. € erwirtschaftet werden können (Abbildung 3). Die zusätzlichen Einnahmen aus dem CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel (blaue Säulen) bewirken eine Gewinnsteigerung um ca. 1,0 Mio. € über alle Kohlenpreise hinweg, die Inanspruchnahme der KfW-Förderung (einfarbig) verbessert die Gewinnaussicht um etwa weitere 1,3 Mio. € für alle Kohlepreise.

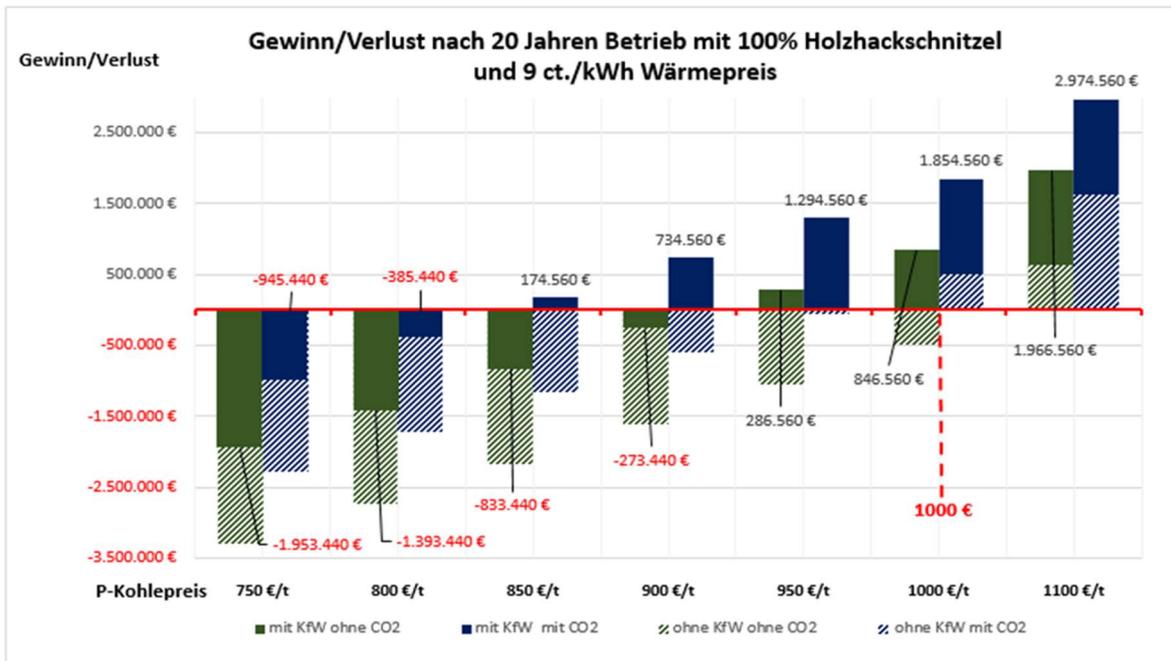


Abbildung 4: Gewinn/Verlust für verschiedene Pflanzkohlepreise (s. P-Kohlepreis), einem Wärmepreis von 9 ct/kWh und dem Einsatz von 100% Hackschnitzeln – jeweils mit und ohne Einfluss durch KfW-Förderung und CO<sub>2</sub>-Zertifikatshandel

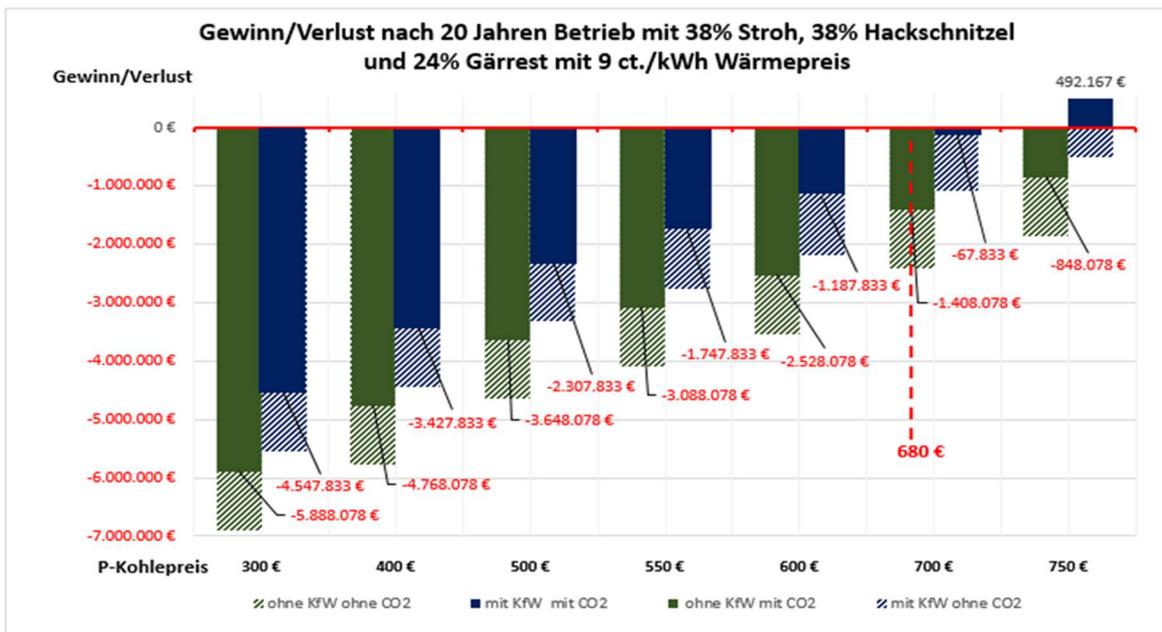
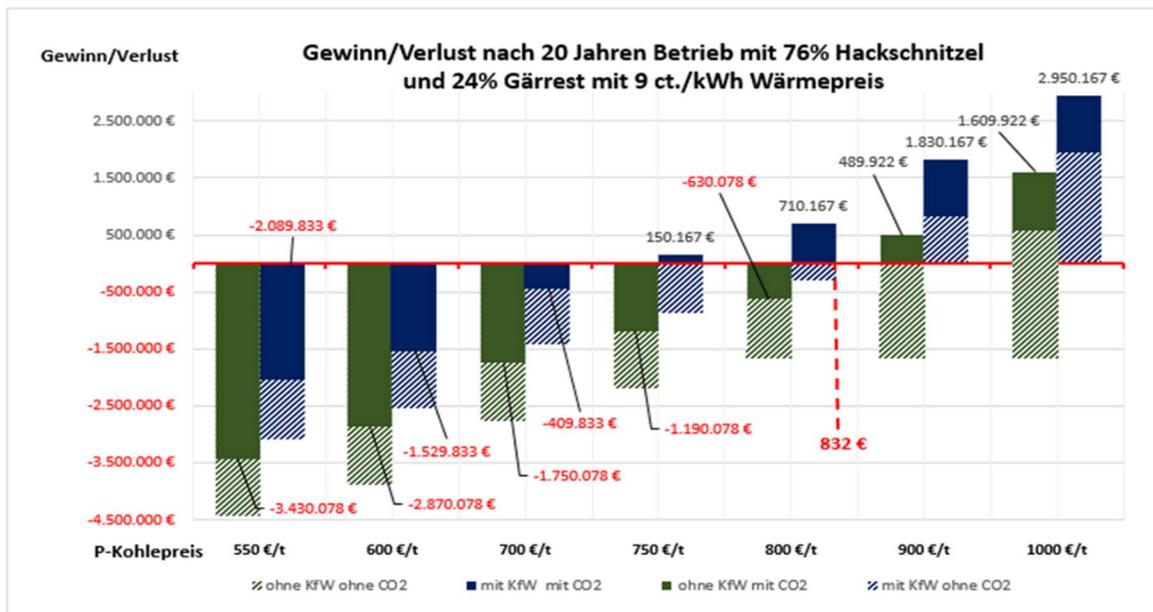


Abbildung 5: Gewinn/Verlust für verschiedene Pflanzkohlepreise (s. P-Kohlepreis), einem Wärmepreis von 9 ct/kWh und dem Einsatz von 33% Hackschnitzeln, 33% Stroh und 24% getrocknetem Gärrest – jeweils mit und ohne Einfluss durch KfW-Förderung und CO<sub>2</sub>-Zertifikatshandel



**Abbildung 6: Gewinn/Verlust für verschiedene Pflanzkohlepreise (s. P-Kohlepreis), einem Wärmepreis von 9 ct/kWh und dem Einsatz von 76% Hackschnitzeln und 24% getrocknetem Gärrest – jeweils mit und ohne Einfluss durch KfW-Förderung und CO<sub>2</sub>-Zertifikatshandel**

Bei der **Variante 2** (Abbildung 5) mit einem Substratmix aus Stroh, Hackschnitzeln und Gärrest schlagen insbesondere die hohen Aufbereitungskosten des Gärrestes und relativ hohe Strohpreise zu Buche. Für Pflanzkohlen aus diesem Materialmix können keine sehr hohen Verkaufspreise erzielt werden. Bei einem angenommenen maximalen Pflanzkohleverkaufspreis von 680 €/t ist selbst mit KfW-Förderung und CO<sub>2</sub>-Zertifikathandel kein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage möglich. Die Gewinnzone ist erst bei einem Kohleverkaufspreis von 750 €/t erreicht, unter Ausschöpfung der Förderung und des Zertifikathandels.

**Variante 3** (Abbildung 6) mit einem Mix aus  $\frac{3}{4}$  Holz hackschnitzel und  $\frac{1}{4}$  Gärrest verhält sich intermediär und es kann über den höheren angenommenen maximalen Verkaufspreis für die Pflanzkohle (832 €/t) eine Verbesserung der Gewinnsituation gegenüber der Variante 2 erreicht werden. Die Gewinnschwelle wird bei einem Kohlepreis von 800 €/t mit Förderung und Zertifikathandel erreicht. Der 20-Jahresgewinn beträgt allerdings nur 710.000 €. Höhere Kohlepreise zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit dieses Substratmixes sind nicht zu erwarten. Diese relativ geringen Gewinne lassen nur noch wenig Handlungsspielraum im Falle unvorhergesehener Risiken.

Im Folgenden soll ermittelt werden, ob die Variation des Nahwärmepreises eine Stellschraube ist, die die Gewinnsituation beeinflusst. Der bisher konstant angenommene Wärmepreis von 9 ct/kWh liegt für BED durchaus im Rahmen (34) (35). Auch Konditionen wie Anschlussgebühr und Einlage in die

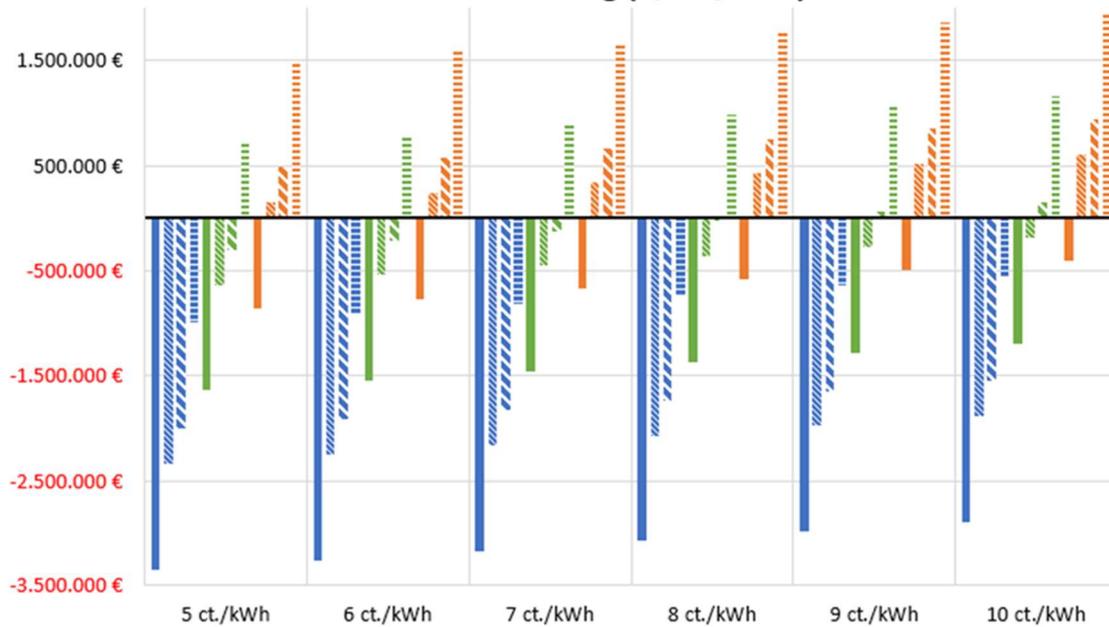
Genossenschaft fließen in die Vollkosten für die Nahwärme ein. Für die Sensitivätsberechnung werden die Wärmepreise zwischen 5 und 10 ct/kWh variiert.

In Abbildung 7 wird für die **3 Varianten** (hier V1 = braun, V2 = blau, V3 = grün) der Gewinn bzw. Verlust vor Steuern nach 20 Betriebsjahren für verschiedene Wärmepreise dargestellt. Die maximal erzielbaren Preise für die Pflanzkohle entsprechen jeweils den Preisen, die den Varianten zugeteilt sind (V1 = 1.000 €, V2 = 680 €, V3 = 832 €). Die Wärmemenge teilt sich wie folgt auf: 0,6 GWh in ein kleines Nahwärmenetz, 2,05 GWh in die Fermenterbeheizung, 1,5 GWh in die Gärresttrocknung (Varianten 1 u. 2) bzw. die Biomassetrocknung (Variante 3).

Auch hier wird wieder deutlich, dass die Variante 3 (100% Holzhackschnitzel) im Vergleich zu den anderen beiden Varianten, über alle 4 Untervarianten (KfW-Förderung, CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel) die besten Gewinnaussichten hat, da durch die Verwendung von reinem Holzhackschnitzelsubstrat die höchsten maximalen Pflanzkohlepreise zu erzielen sind.

Die unterschiedlichen Nahwärmepreise haben nur einen geringen Einfluss auf die Gewinnentwicklung, da nur 0,6 GWh in die Beheizung des kleinen Nahwärmenetzes am Anlagenstandort gehen. Die vergleichsweise große Wärmemenge, die zum Beheizung des Fermenters benötigt wird (2,05 GWh) hat deutlich größeren Einfluss auf die Gewinne. Hier wurde über alle Varianten von einem Preis von 4,0 ct/kWh ausgegangen, der sich an dem Wärmepreis von Holzhackschnitzelheizungen orientiert, die alternativ als Wärmequelle zur Anwendung kommen könnten.

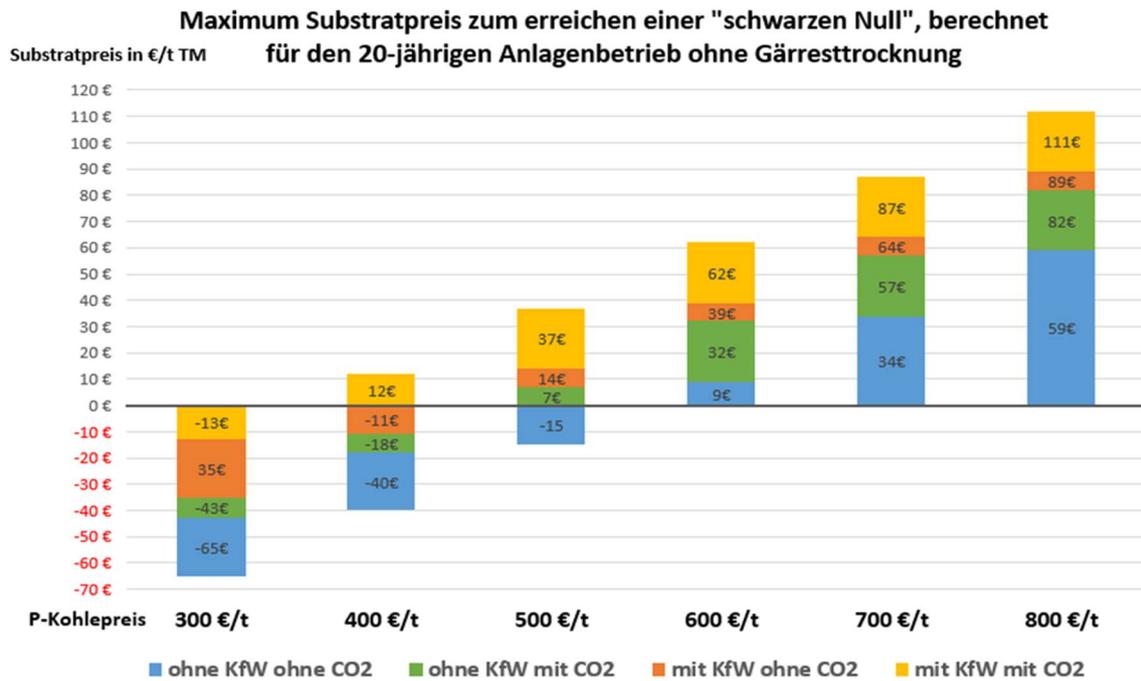
### Einfluss Wärmepreis auf 20-jährigen Vorsteuergewinn - mit Fermenterbeheizung (4,0 ct/kWh)



Variante 1: 100% Hackschnitzel
Variante 2: 38%/38%/24% Mix
Variante 3: 76%/24% Mix



**Abbildung 7: Einfluss des Wärmepreises auf die Gewinn-Verlustrechnung bei einer Laufzeit der Pyrolyseanlagen von 20 Jahren, in Abhängigkeit von Pyrolysesubstrat, KfW-Förderung und CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel**



**Abbildung 8: Wieviel darf die Tonne Biomasse (TM) bei verschiedenen Wärmepreisen maximal kosten, damit nach 20 Betriebsjahren die „Schwarze Null“ erreicht wird (Systemvariante ohne Gärresttrocknung)**

In einer abschließenden Untersuchung wurde für verschiedene Pflanzenkohlepreise jeweils der maximale Preis für die Inputbiomasse berechnet, mit dem der 20-jährige Betrieb der Anlage ohne Verluste (schwarze Null) bei einem Wärmeverkaufspreis für die Nahwärmekunden von 9 ct/kWh möglich wäre (Abbildung 8). Hierbei wird ausschließlich der Betrieb der Pyrolyseanlage, ohne die Gärresttrocknung betrachtet. Wie zu erwarten, kann unter Annahme von geringen Pflanzenkohlepreisen auch nicht besonders viel für die eingesetzten Biomassen ausgegeben werden. Bei 300 €/t Pflanzenkohlepreis müsste ohne KfW-Förderung und CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel bzw. ohne KfW und mit CO<sub>2</sub> die Biomasse sogar kostenpflichtig entgegengenommen werden, um keine Verluste zu erwirtschaften. Bei 400 €/t Pflanzenkohlepreis wird die „schwarze Null“ nur mit KfW und CO<sub>2</sub>-Bepreisung erreicht. Pro 100 € mehr an Erlös aus dem Kohleverkauf können etwa 25 € mehr für die Tonne Biomasse ausgegeben werden. Bei einem Pflanzenkohlepreis von 800 €/t liegt der Maximalpreis für die Tonne Biomasse bei 59 € (ohne KfW und ohne CO<sub>2</sub>). Durch die Inanspruchnahme von KfW-Förderung und CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel könnte ab einem Kohlepreis von 700 €/t ein in der Praxis realistischer Preis von 87 bis 110 €/t für Biomassesubstrate gezahlt werden.

## 6 Diskussion

Energie aus Biomasse stellt nach wie vor einen wichtigen Baustein im Mix der erneuerbaren Energien dar und wird dies aller Voraussicht nach auch mittelfristig so bleiben. Denn die Vorteile der Speicherbarkeit des Energieträgers Biomasse und dessen Beitrag zur Regenergie sind gegeben und wichtig für das Gelingen der Energiewende. Allerdings ist die Bioenergienutzung aufgrund des auf 2,3 Mio. Hektar angestiegenen Anbaus von Energiepflanzen in die Kritik gekommen. Agrarflächen sind ein knapper werdendes Gut und diese Verknappung wird, bedingt durch den Klimawandel, in den kommenden Jahrzehnten noch verschärft werden. Um dennoch Bioenergie als erneuerbare Regenergiequelle nutzen zu können, sollte deshalb vermehrt auf Rest- und biogene Abfallstoffe zurückgegriffen werden.

In diesem Aufsatz wird am Beispiel eines Bioenergiedorfes mit Biogasanlage und Nahwärmenetz der Einsatz einer noch relativ wenig verbreiteten Bioenergiegewinnungsform, der Pyrolysetechnik, mit Hilfe einer Wirtschaftlichkeitsberechnung untersucht. Im ersten Anpassungsschritt des Praxisprojekts geht es um den Ersatz zweier BHKWs, die spätestens 2031 aus dem EEG herausfallen würden und bisher für die Wärmeversorgung des Fermenters und das kleine Nahwärmenetz am Anlagenstandort zuständig sind. Die weiteren Satelliten-BHKW am Dorfrand des BED wurden später installiert und erhalten noch 8 Jahre länger die EEG-Förderung. Die Pyrolyseanlage soll in erster Linie die Wärmelücke am Anlagenstandort für Fermenter und kleines Nahwärmenetz schließen, aber auch mit Pflanzenkohle ein marktfähiges neues Produkt liefern.

Als potenzielle Substrate für die Pyrolyseanlage wurden die Reststoffe Stroh, Gärrest und Holzhackschnitzel aus Landschaftspflegeholz untersucht. Allen drei Stoffen ist gemeinsam, dass sie im ländlichen Raum, zum Teil in erheblichen Mengen, anfallen. Die bisherige geringe Nutzung dieser Substrate liegt u. a. an einer noch nicht implementierten Logistik zur Gewinnung und z. T. auch kostenintensiven Ernte- und Bergungskosten bei Landschaftspflegeholz. Auch Nutzungskonkurrenzen können bei Stroh eine Rolle spielen.

Die im Ergebnisteil präsentierten Werte zur Wirtschaftlichkeit des Betriebes einer Pyrolyseanlage zur Wärme- und Pflanzenkohlegewinnung haben gezeigt, dass die wichtigste Stellgröße die über einen profitablen oder verlustreichen Betrieb einer solchen Anlage entscheidet, der Vermarktpreis für die gewonnene Pflanzenkohle ist. Wenn hierfür ein guter Preis erzielt werden kann, der idealerweise über 800 €/t liegen sollte, dann kann auch Restbiomasse begrenzt eingesetzt werden, die durch ihre spezifischen Gewinnungs-, Bergungs- und Transportkosten verteuert wird, wie dies z.B. bei der Gärrestaufbereitung der Fall ist.

Wenn die Pflanzenkohle mit einem hohen Verkaufspreis vermarktet werden kann, dann kann ein günstiger Wärmeverkaufspreis für Wärmekunden angeboten werden und dies macht eine Pyrolyseanlage attraktiv für die Wärmelieferung in einem Nahwärmenetz. Bei den Einkaufspreisen für

Biomasse hat sich gezeigt, dass die Nutzung von Stroh gegenüber der von Holzhackschnitzeln keine Vorteile hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit mit sich bringt. Stroh ist zwar in großem Umfang vorhanden, es unterliegt aber auch anderen Nutzungspfaden, wie z.B. der Tierhaltung (Futter, Stalleinstreu) und hat somit einen relativ hohen Marktpreis. Pflanzenkohle aus Stroh zu produzieren ist zwar ein gangbarer Weg, der aber vermutlich schlechtere Vermarktungsmöglichkeiten für die Kohle mit sich bringt, welche durch den geringfügig niedrigeren Einkaufspreis (hier angenommene 100 €/t TM) für Stroh im Vergleich zu den Hackschnitzeln nicht ausgeglichen werden kann. Ähnlich sieht es bei der Nutzung von getrockneten Gärresten als Pyrolysesubstrat aus. Aufgrund der vorhandenen Überschusswärme kann der Gärrest zwar kostengünstig getrocknet werden, dies wird aber durch hohe zusätzliche Investitionen in die Trocknungsinfrastruktur wieder konterkariert. Eine Tonne Trockenmasse aus Gärrest kostet nach der oben beschriebenen Berechnungsmatrix ca. 60 €. Da der angenommene Verkaufspreis für Pflanzenkohle aus Gärresten aber nur bei 300 €/t liegt, also weniger als 1/3 von dem erzielbaren Preis für Kohlen aus Hackschnitzeln, ergibt sich hier ein deutlicher Preisnachteil. Wenn allerdings der Fall vorliegt, dass Gärreste in weiter entfernte Regionen transportiert werden müssen, wie es bei Gebieten mit einer hohen Viehbesatzdichte oft der Fall ist, könnte eine Trocknung mit anschließender Nutzung als Pyrolysesubstrat auch wirtschaftlich interessanter werden. Bei einer Verdoppelung der Kosten für den Gärrest (Lagerung, Transport, Ausbringung) auf 32 €/m<sup>3</sup> können jährlich etwa 26.000 € zusätzlich eingespart werden. Für den 20-Jahreszeitraum sind das über 0,5 Mio. €, die wiederum die Investition in die Trocknungstechnik wirtschaftlich interessanter machen.

Die vorgestellten Berechnungen haben gezeigt, dass Holzhackschnitzel (zu 120 €/t TM) das wirtschaftlich interessanteste Substrat für den Betrieb einer Pyrolyseanlage darstellt. Da Holz aus dem Forstbereich aufgrund der klimawandelbedingten Waldschäden zwar zurzeit vermehrt auf den Markt kommt, stellt dessen Nutzung nach Auffassung der Autoren jedoch keine langfristig und nachhaltig nutzbare Substratquelle dar. Auch sonst ist Waldrestholz eine begehrte Energiequelle und könnte zukünftig unter noch höheren Nutzungsdruck kommen. Aus diesem Grund wurde im Beispiel von der Nutzung von Landschaftspflegeholz ausgegangen. Diese Ressource ist oftmals noch nicht erschlossen und bringt naturschutzfachliche Synergieeffekte mit sich (s. Kap.3.2). Doch auch hier sind der Nutzung zurzeit noch wirtschaftliche Grenzen gesetzt, sei es durch zu hohe Ernte- und Bergungskosten oder minderwertige Qualität z.B. durch Störstoffe oder hohe Rindenanteile. Perspektivisch kann es sich bei weiter steigenden CO<sub>2</sub>-Preisen jedoch lohnen, neben holzigen auch auf nichtholzige Reststoffe für die Beschickung einer Pyrolyseanlage auszuweichen, bzw. unterschiedliche Materialien im Betrieb zu kombinieren. Die hier dargestellten Berechnungen haben gezeigt, dass zurzeit eine Pyrolyseanlage unter den getroffenen Annahmen nur bedingt mit einem Substratmix wirtschaftlich betrieben werden

kann. Voraussetzungen sind ein hoher Holzhackschnitzelanteil am Substratmix und die Ausnutzung der KfW-Förderung sowie die Vermarktung von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten.

Im vorliegenden Beispiel wird sehr viel Wärme für den Fermenter benötigt und relativ wenig Wärme für das kleine Nahwärmenetz am Standort der Biogasanlage. Diese besondere Konstellation wirkt sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit der Pyrolyseanlage aus, denn für die Beheizung des Fermenters wird lediglich ein Wärmepreis von 4 ct/kWh angesetzt, während mit dem Verkauf der Nahwärme mehr als doppelt so hohe Preise angesetzt werden können. Eine Pyrolyseanlage hauptsächlich als Wärmequelle für einen Fermenter zu betreiben ist wirtschaftlich schwierig dazustellen und nur unter „Best case“ Bedingungen profitabel.

Sollte sich die Technik der Pyrolyse jedoch bewähren und die Vermarktung der Pflanzkohlen erfolgreich sein, ständen den Anlagenbetreibern im BED in Zukunft weitere Optionen offen: Die Pyrolyseanlage könnte modular erweitert werden und auch die weiteren BHKW als Wärmequelle ersetzen. Höhere Einnahmen aus dem Wärmeverkauf und die Vermarktung der Pflanzkohle wären dann die beiden wichtigsten Standbeine für BED.

In Tabelle 8 werden die Chancen und Risiken der Pyrolysetechnik als ergänzende Wärmeversorgung für BED in Form einer SWOT-Analyse zusammenfassend beschrieben.

**Tabelle 8:**  
**Stärken und Schwächen der Pyrolyse**

<b>Stärken aus Sicht des BED</b>	<b>Schwächen aus Sicht des BED</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abwärme lässt sich in Nahwärmenetz einbinden</li> <li>• Kann mit Biogasanlage gut kombiniert werden</li> <li>• Hohe Investitionszuschüsse und voraussichtlich wirtschaftlicher Betrieb ohne EEG</li> <li>• Neue Standbeine durch neue Vermarktungsprodukte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einstieg in völlig neue, noch nicht in der Breite etablierte Technik</li> <li>• Evtl. Technische Probleme wirken sich auf Nahwärmeversorgung aus</li> <li>• Etablierung der Pflanzkohleprodukte auf unbekanntem Markt evtl. schwierig</li> </ul>
<b>Chancen durch äußere Faktoren</b>	<b>Risiken durch äußere Faktoren</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Negativ- (CO<sub>2</sub>)-Emissionstechnik wird honoriert</li> <li>• Klimaschutz durch Reststoffnutzung ist politisch gewollt</li> <li>• Zurzeit ein Wachstumsmarkt</li> <li>• Kaskadennutzung und C-Speicherung machen Technik attraktiv</li> <li>• Zertifikathandel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preise und Verfügbarkeit von Substraten variieren je nach Standort</li> <li>• Preisentwicklung der Pflanzkohlen ungewiss</li> <li>• Günstige Reststoffe erzielen geringere Qualitäten und Pflanzkohlepreise</li> </ul>

## Zusammenfassung

### Bioenergiedörfer im Wandel

#### Betrachtungen des Einsatzes von Reststoffen sowie des Zubaus einer Pyrolyseanlage an Biogasbestandsanlagen unter den Gesichtspunkten der Nahwärmeversorgung und der Wirtschaftlichkeit

In den vergangenen 15 Jahren sind in Deutschland zahlreiche Bioenergiedörfer entstanden, in denen eine klimafreundliche und zumeist auf Biomasse basierende Wärmeversorgung der angeschlossenen Haushalte umgesetzt wird. Sowohl biogene Reststoffe für die Energieerzeugung in die Nutzung zu bringen als auch die Erzeugung und Vermarktung von Biomethan, stellen Bioenergiedörfer mit ihren Biogasanlagen vor neue Herausforderungen. Es gilt, trotz sinkenden Vergütungen für den KWK-Strom aus den Biogasanlagen, die Wärmeversorgung der Dörfer sicher zu stellen. In dieser Studie wurde anhand eines Modell-Bioenergiedorfes der Fall untersucht, bei dem ein Teil der Biogas-BHKWs außer Betrieb genommen und das Anlagenkonzept (Energieerzeuger + Wärmenetz) durch den Zubau einer Pyrolyseanlage ergänzt wird. Die Pyrolyseanlage erzeugt einerseits Wärme, die im Nahwärmenetz für die Versorgung der Haushalte und für die Beheizung des Fermenters genutzt wird und andererseits vermarktungsfähige Pflanzenkohlen. Für die Überprüfung der Wirtschaftlichkeit wurden 3 Substratmixszenarien aus Hackschnitzeln, Stroh und Gärrest mit unterschiedlichen Verkaufs- bzw. Einkaufspreisen für Pflanzenkohle, Wärme und Biomasse untersucht. Die Berechnungsergebnisse haben im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit ergeben, dass der Verkaufspreis für die Pflanzenkohle die wichtigste Stellschraube ist. Hohe Pflanzenkohlepreise können mit holzigen Substraten, vornehmlich Holzhackschnitzeln, erzielt werden. Gärreste, die günstig oder kostenlos als Pyrolyse-Substrat an Biogasanlagen verfügbar sind, bedürfen einer kostenintensiven Trocknung vor dem Einsatz. Durch die Trocknung wird der Kostenvorteil dieses Substrates zunichte gemacht und er kann aufgrund der geringeren Qualität der Pflanzenkohlen und den damit erzielbaren niedrigen Marktpreisen nicht wieder hereingeholt werden. Substratmischungen aus Gärresten, Stroh und Holzhackschnitzel erreichen auch mit KFW-Förderung und CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel nicht die Gewinnschwelle. Die ökonomisch sinnvollste Variante ist wegen ihres hohen erzielbaren Verkaufspreises die Erzeugung von Pflanzenkohlen aus 100% Holzhackschnitzeln.

## Summary

### Bioenergy Villages in Transition

Considerations of the use of residual materials as well as the addition of a pyrolysis plant to existing biogas plants from the point of view of local heating supply and economic efficiency

In the past 15 years, many so called bio-energy villages have sprung up all over Germany. In these villages, climate-friendly and, mostly biomass-based heating grids have been implemented for the local households. To use more residual material for energy production or to produce and sell bio-methane are new challenges for bio-energy villages and their biogas plants. In spite of decreasing revenues from renewable electricity sales, the heat supply of the villages has to be kept up and affordable. This study examines the case of a model bio-energy village that shuts down some of its thermal power stations and adds a pyrolysis reactor to the existing set up of heat/power generators and the heating grid. The pyrolysis reactor on the one hand produces heat for the grid and the biogas fermenter and on the other hand it produces biochar which can be sold at market prices. To examine the economic efficiency of this addition, 3 scenarios with different pyrolysis feedstocks (wood chips, straw and digestate) have been examined by a sensitivity analysis with varying prices for biomass, biochar and heat. Economic efficiency calculations have shown, that the market price for biochar is the most important set-screw. High biochar prices can mainly be achieved with woody biomass and in particular with wood-chips as input material. Biogas fermenter digestate, which is available for free or at a low cost needs to be dried with a high amount of energy input, foiling the original cost advantage. On top of that, chars from digestate will most likely achieve lower market values and can thus not compensate the drying cost. The break-even point can also not be achieved with a mixed substrate input (digestate, straw, and wood chips) even when the KfW-investment help and trade with CO<sub>2</sub>-certificates are made use of. The most viable variant for biochar production, as seen from an economic standpoint, is therefore to operate the pyrolysis plant with 100% wood chips.

## Literatur

1. RUPPERT, H., SCHMUCK, P., EIGNER-THIEL, S., GIRSCHNER, W., KARPENSTEIN-MACHAN, M., RUWISCH, V., SAUER, B., ROLAND, F. *Das Bioenergiedorf – Voraussetzungen und Folgen einer eigenständigen Wärme- und Stromversorgung durch Biomasse für Landwirtschaft, Ökologie und Lebenskultur im ländlichen Raum. Endbericht Förderkennzeichen: 2 2 0 2 2 1 0 3*, 2008.
2. WILKENS, I., BAUBÖCK, R., IßLER, R., KARPENSTEIN-MACHAN, M., KELCH, J., SCHMUCK, P. Wie sieht die Zukunft der Bioenergiedörfer nach dem Auslaufen der 20 Jahre EEG aus? In: *Tagungsband zum 14. Rostocker Bioenergieforum*.
3. LI, D., R. ZHAO, X. PENG, Z. MA, Y. ZHAO, T. GONG, M. SUN, Y. JIAO, T. YANG und B. XI. Biochar-related studies from 1999 to 2018: a bibliometrics-based review [online]. *Environmental science and pollution research international*, 2020, **27**(3), 2898-2908. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11356-019-06870-9

4. WU, P., S.T. ATA-UL-KARIM, B.P. SINGH, H. WANG, T. WU, C. LIU, G. FANG, D. ZHOU, Y. WANG und W. CHEN. A scientometric review of biochar research in the past 20 years (1998–2018) [online]. *Biochar*, 2019, **1**(1), 23-43. ISSN 2524-7972. Verfügbar unter: doi:10.1007/s42773-019-00002-9
5. JEFFERY, S., F. VERHEIJEN, M. VAN DER VELDE und A.C. BASTOS. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis [online]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, **144**(1), 175-187. ISSN 0167-8809. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.agee.2011.08.015
6. VERHEIJEN, F., S. JEFFERY und A.C. BASTOS. *Biochar application to soils. A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions*. Luxembourg: Publications Office, 2010. EUR. Scientific and technical research series. 24099. ISBN 978-92-79-14293-2.
7. BARTOLI, M., M. GIORCELLI, P. JAGDALE, M. ROVERE und A. TAGLIAFERRO. A Review of Non-Soil Biochar Applications [online]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2020, **13**(2). ISSN 1996-1944. Verfügbar unter: doi:10.3390/ma13020261
8. CHEN, W., J. MENG, X. HAN, Y. LAN und W. ZHANG. Past, present, and future of biochar [online]. *Biochar*, 2019, **1**(1), 75-87. ISSN 2524-7972. Verfügbar unter: doi:10.1007/s42773-019-00008-3
9. SAKHIYA, A.K., A. ANAND und P. KAUSHAL. Production, activation, and applications of biochar in recent times [online]. *Biochar*, 2020, **2**(3), 253-285. ISSN 2524-7972. Verfügbar unter: doi:10.1007/s42773-020-00047-1
10. DAHAL, R.K., B. ACHARYA, G. SAHA, R. BISSESSUR, A. DUTTA und A. FAROOQUE. Biochar as a filler in glassfiber reinforced composites: Experimental study of thermal and mechanical properties [online]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, **175**, 107169. ISSN 13598368. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.compositesb.2019.107169
11. DAS, O., A.K. SARMAH und D. BHATTACHARYYA. A sustainable and resilient approach through biochar addition in wood polymer composites [online]. *The Science of the total environment*, 2015, **512-513**, 326-336. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.scitotenv.2015.01.063
12. WERNER, C., H.-P. SCHMIDT, D. GERTEN, W. LUCHT und C. KAMMANN. Biogeochemical potential of biomass pyrolysis systems for limiting global warming to 1.5 °C [online]. *Environmental Research Letters*, 2018, **13**(4), 44036. Verfügbar unter: doi:10.1088/1748-9326/aabb0e
13. LEHMANN, J. und S. JOSEPH, Hg. *Biochar for environmental management. Science and technology*. Reprint. London: Earthscan, 2010. ISBN 184407658X.
14. JIRKA, S., T. TOMLINSON. *State of the biochar industry 2014* [online]. *A Survey of Commercial Activity in the Biochar Sector*, 2015 [Zugriff am: 17. Mai 2021]. Verfügbar unter: [https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/11/ibi\\_state\\_of\\_the\\_industry\\_2014\\_final.pdf](https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/11/ibi_state_of_the_industry_2014_final.pdf)
15. XING, X., F. FAN und W. JIANG. Characteristics of biochar pellets from corn straw under different pyrolysis temperatures [online]. *Royal Society open science*, 2018, **5**(8), 172346. ISSN 2054-5703. Verfügbar unter: doi:10.1098/rsos.172346
16. HORNUNG, A. und E. SCHRÖDER. Production of Biochar and Activated Carbon via Intermediate Pyrolysis - Recent Studies for Non-Woody Biomass. In: A. HORNUNG, Hg. *Transformation of Biomass. Theory to Practice*. Hoboken: Wiley, 2014, S. 321-338. ISBN 9781118693643.
17. SRINIVASAN, P., A.K. SARMAH, R. SMERNIK, O. DAS, M. FARID und W. GAO. A feasibility study of agricultural and sewage biomass as biochar, bioenergy and biocomposite feedstock: production, characterization and potential applications [online]. *The Science of the total environment*, 2015, **512-513**, 495-505. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.scitotenv.2015.01.068
18. IPPOLITO, J.A., L. CUI, C. KAMMANN, N. WRAGE-MÖNNIG, J.M. ESTAVILLO, T. FUERTES-MENDIZABAL, M.L. CAYUELA, G. SIGUA, J. NOVAK, K. SPOKAS und N. BORCHARD. Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review [online]. *Biochar*, 2020, **2**(4), 421-438. ISSN 2524-7972. Verfügbar unter: doi:10.1007/s42773-020-00067-x

19. EBC 2012. Version 9.3 E of 11th April 2021, *European Biochar Certificate –Guidelines for a Sustainable Production of Biochar*. Arbaz, Schweiz [Zugriff am: 3. Juni 2021]. Verfügbar unter: [https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version\\_en\\_9\\_3.pdf](https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_9_3.pdf)
20. EBC. 2.1E, *EBC-Guidelines for the Certification of Biochar Based Carbon Sinks*. Arbaz, Schweiz [Zugriff am: 3. Juni 2021]. Verfügbar unter: [https://www.european-biochar.org/media/doc/2/c\\_en\\_sink-value\\_2-1.pdf](https://www.european-biochar.org/media/doc/2/c_en_sink-value_2-1.pdf)
21. ZELLER, V.e.a. *Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung*. Leipzig, 2012. DBFZ-Report. 13.
22. BROROWSKI, A., P. ADLER, G. ERDMANN, W. STINNER, D. THRÄN und U. MANTAU. *Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen. Status Quo in Deutschland*. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2015. Schriftenreihe nachwachsende Rohstoffe. 36. ISBN 978-3-942147-29-3.
23. LEHMANN, T. und E. FRIEDRICH. Stroh statt Feldfrüchte. *Landtechnik*, 2012, **67**(Nr.5), 358-360.
24. LEHMANN, T. und F. FRIEDRICH. *Fraunhofer sagt "besser geht es nicht" - Bioextrusion by Lehmann bringt 100% Ausnutzung der fermentierbaren Biomasse*. Pöhl/Dresden, 2012.
25. FNR, Hg. *Gülzower Fachgespräche. Betriebliche Umsetzung der Düngeverordnung*. Gülzow, 2018. Gülzower Fachgespräche. 57.
26. BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT. *Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen*. DüV, 2017.
27. BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT. *Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV)*. DüMV, 2012.
28. WISSENSCHAFTLICHER DIENST. *Schadstoffe und Hygiene von Biogasgärresten* [online] [Zugriff am: 12. Mai 2021]. Verfügbar unter: <https://www.bundestag.de/resource/blob/405946/1308676858473d25fb174c0dd8c0a2a0/wd-8-121-11-pdf-data.pdf>
29. DLG-AUSSCHUSS FÜR ACKERBAU. *Gärreste im Ackerbau effizient nutzen* [online], 10/2017 [Zugriff am: 12. Mai 2021]. Verfügbar unter: <https://www.dlg.org/de/landwirtschaft/themen/pflanzenbau/pflanzenernaehrung/dlg-merkblatt-397-gaerrete-im-ackerbau-effizient-nutzen>
30. SCHÜNEMANN-PLAG, P. *Wirtschaftliche Betrachtungen zur Gärretrocknung* [online], 2011 [Zugriff am: 8. März 2021]. Verfügbar unter: <https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/349/article/16664.html>
31. ROTH, U, S. WULF, M. FECHTER, J. DAHLIN. *Bedeutung der Rahmenbedingungen für die Wirtschaftlichkeit der Gärrestaufbereitung*. Hannover, 14. November 2018. Biogas Convention.
32. FERCH, A. *Gärrestetrocknung mit dem Dorset Bandtrockner und nachgeschalteter Abluftreinigung* [online]. *Dorset Agrar- und Umwelttechnik GmbH Andreas Ferch*, 2011 [Zugriff am: 8. März 2021]. Verfügbar unter: <https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/349/article/16664.html>
33. C.A.R.M.E.N EV. *Marktpreise Hackschnitzel* [online] [Zugriff am: 20. Juni 2021]. Verfügbar unter: <https://www.carmen-ev.de/service/marktueberblick/marktpreise-energieholz/marktpreise-hackschnitzel/>
34. KARPENSTEIN-MACHAN, M. Wärmenetze mit Schlüsselfunktionen für die Energiewende. In: *Biogasjournal*, S. 72 – 76.
35. KARPENSTEIN-MACHAN, M., WÜSTE, A. UND SCHMUCK, P. Erfolgreiche Umsetzung von Bioenergiedörfern in Deutschland - Was sind die Erfolgsfaktoren? In: *Berichte über Landwirtschaft*, S. 1–25.

## Anschrift der Autoren

Dr. Roland Bauböck  
Georg-August-Universität Göttingen  
Geographisches Institut  
Abt. Kartographie, GIS und Fernerkundung  
Goldschmidtstraße 5  
37077 Göttingen  
E-Mail: [roland.bauboeck@uni-goettingen.de](mailto:roland.bauboeck@uni-goettingen.de)

PD Dr. Ing. Marianne Karpenstein-Machan  
Universität Kassel  
Fachgebiet Mikroökonomik und empirische Energieökonomik  
Untere Königsstraße 71  
34117 Kassel, Germany  
E-Mail: [mariannekarpenstein@uni-kassel.de](mailto:mariannekarpenstein@uni-kassel.de)

## Danksagung

Die in diesem Artikel vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Innovative Konzepte und Geschäftsmodelle für zukunftsfähige Bioenergiedörfer – klimafreundlich, demokratisch, bürgernah“ (FKZ: 22405817, 22405218), gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR), erarbeitet.

Herzlichen Dank dafür.

## Verwendete Abkürzungen

CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
BED	Bioenergiedorf
NWN	Nahwärmenetz
T	metrische Tonne
Nm <sup>3</sup>	Normkubikmeter
CH <sub>4</sub>	Methangas
H <sub>2</sub> O	Wasser
oTS	organische Trockensubstanz
TM	Trockenmasse
kWh	Kilowattstunden
MWh	Megawattstunden
GWh	Gigawattstunden
el.	elektrisch
th.	thermisch
EBC	European Biochar Certificate
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe