

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 17962 BR

Thema

Standortplanung und -bewertung für Biogasanlagen im ökonomisch-ökologischen Spannungsfeld.

Berichtszeitraum

2014-01-01 - 2016-12-31

Forschungsvereinigung

BVL

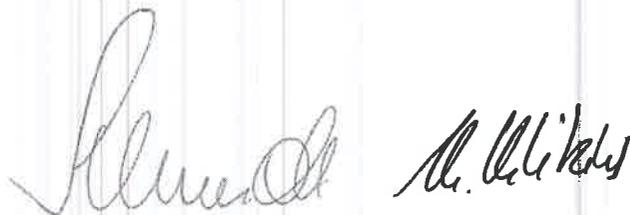
Forschungsstelle(n)

Technische Universität Dresden
Professur für Technische Logistik
Professur für Agrarsystemtechnik

Dresden, 31.01.2017

Dresden, 12.04.2017

Ort, Datum



Prof.-Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt

Prof.-Dr.-Ing. habil. Thomas Herlitzius

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Hinweis: Die Bearbeitung des Forschungsprojektes begann am 01.11.2014 aufgrund des erst zum 10/2014 erhaltenen Zuwendungsbescheids. Eine Vorleistung durch die beteiligten Forschungsinstitute war nicht möglich.

Kurzfassung der Ergebnisse

Aufgrund ihrer Eigenschaft Ziel- und Ausgangsort von Stoff- und Energieströmen zu sein, können Biogasanlagen (BGA) als logistische Einrichtungen, genauer als Umschlaglager, betrachtet werden. Die Wirtschaftlichkeit entsprechender Lager hängt z. T. von ihren fixen Errichtungs- und Betriebskosten, in größerem Maße jedoch von den mengen- und entfernungsabhängigen Kosten für Transportaufwände ab. Im Gegensatz zur reinen Transportkostenminimierung bei der klassischen Umschlaglagerplanung sind für Biogasanlagen auch Erlöse aus dem Strom-, Wärme- und Gärrestverkauf zu berücksichtigen.

Ausgehend von der beschriebenen Sichtweise ist die Frage nach der wirtschaftlichsten Konfiguration, bestehend aus der Wahl der zu eröffnenden Anlagentypen und deren Standorte, hinsichtlich der im Projekt spezifizierten Zielkriterien bestmöglich beantwortet. Während der Stromverkauf als quasi-fix betrachtet werden kann und standortunabhängig ist, spielte für die Steigerung der Wirtschaftlichkeit und der ökologischen Verträglichkeit die relative Nähe z. B. zu Wärmeabnehmern eine herausragende Rolle.

Mit Hilfe des formulierten gemischt-ganzzahligen linearen Modells können die erkannten Einflussgrößen sowie Änderungseffekte, z. B. in Form einer Transportkostenerhöhung für Gärsubstrate oder Absenkung des Gärsubstratangebots, erstmalig umfänglich quantifiziert und beurteilt werden. Die Überlegungen sind in einer Experimentierplattform implementiert worden, so dass beliebige Szenarien hinsichtlich ihrer optimalen Gestaltung durchgerechnet werden können. Die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse aus der Betrachtung von BGA auf Biomasse-Energie-Konverter im Allgemeinen ist möglich.

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden erreicht.

Die enge Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Forschungsstellen und dem damit verbundenen Wissensaustausch zwischen der Professur für Technische Logistik und der Professur für Agrarsystemtechnik führte zu Erkenntnissen, welche bei den Vertretern des projektbegleitenden Ausschusses auf außerordentlich positive Resonanz stießen. Es ist geplant diese Form der Zusammenarbeit beider Professuren fortzuführen. Ein entsprechender Langantrag zum gemeinsamen Forschungsthema „*Landwirtschaftslogistik*“ ist bereits eingereicht.

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

Forschungsziel laut Antrag	Ziel erreicht?	Vorgehen und Ergebnis
Die vollständige Erfassung und quantitative Beschreibung aller relevanten Quellen und Senken sowie den zugehörigen Teilprozessschritten unter Berücksichtigung der sie beeinflussenden natürlichen und künstlichen Randbedingungen		siehe 1.1.
Die Entwicklung eines umfassenden Modells für die Bewertung und den Vergleich von Alternativen des logistischen Gesamtprozesses bei der Bewirtschaftung von Biogasanlagen		siehe 1.2.
Der Entwurf eines Optimierungsalgorithmus zur Anpassung der Stoff- und Energieströme im Quellen-Senken-Modell an sich ändernde Randbedingungen, um den effizienten Betrieb der Anlagen zu gewährleisten		siehe 1.3.
Die Validierung von Modell und Algorithmus durch Implementierung in einem Demonstrator.		siehe 1.4.

1.1. Arbeitspaket 1: Identifikation relevanter Einflussparameter, Wirkzusammenhänge und Restriktionen (TL & AST)

- Dieses Arbeitspaket wurde plangemäß begonnen und ist abgeschlossen.

Ergebnisse:

Die für das Standortplanungsproblem bei Biogasanlagen (BGA) als relevant einzustufenden Einflussgrößen wurden identifiziert. Dabei konnte festgestellt werden, dass insbesondere Transportentfernungen sowie Transportkosten für Substrate bzw. Gärreste eine herausragende Bedeutung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Standortes zukommt. Des Weiteren sind das Gesamtangebot an Substraten im betrachteten Gebiet und maximale Ausbringungsmengen von Gärresten entscheidende Restriktionen. Sie bestimmen unmittelbar die Anzahl und maximale Leistung zu errichtender BGA. Die Nähe zu Wärmeabnehmern ist ebenfalls wirtschaftlich interessant, da nur bei entsprechendem Nachweis über die Nachnutzung entstehender Abwärme bestimmte Fördermodalitäten des EEG greifen. Die zu erzielenden Erlöse durch den Wärmeverkauf sind zu quantifizieren und es ist eine Metrik anzugeben, wieviel Wärme von spezifischen Standorten zu etwaigen Nachfragern verteilt werden kann.

Es wurde festgestellt, dass die Menge der zu untersuchenden potentiellen Standorte auch in dünnbesiedelten und landwirtschaftlich geprägten Räumen begrenzt ist. Insbesondere in der Nähe von Substratlieferanten, Wärmeabnehmern bzw. entlang von Verbindungsstraßen sind daher potentielle Standorte auf ihre Eignung hin zu prüfen. Dies führte zu der Erkenntnis, dass der Charakteristik des Wegenetzes und den dadurch verbundenen potentiellen Standorten in einem Betrachtungsgebiet eine entscheidende Rolle bezüglich der Verteilung der BGA zugeschrieben werden kann.

Eine weitere relevante Größe bei der Optimierung von BGA Standorten ist die Entscheidung für oder gegen bestimmte Anlagentypen, welche an den Standorten eröffnet werden sollen. BGA-Typen werden grundsätzlich hinsichtlich der Art und Menge ihrer benötigten Gärsubstrate bzw. der ausgestoßenen Nebenprodukte unterschieden. Die Art und Menge der Gärsubstrate definiert zudem weitestgehend die Gesamtleistung der BGA – die Leistung der BGA kann demnach als aggregierte Größe zur Unterscheidung der Typen von BGA herangezogen werden.

Die genannten Randbedingungen wirken sich nachweislich unmittelbar auf den wirtschaftlichen Erfolg von BGA aus und sind in der Regel durch den Betreiber der BGA kurzfristig nicht zu beeinflussen. Insbesondere das Gesamtangebot an Gärsubstrat, die Nachfrage an Nebenprodukten und die geographische Lage der Quellen und Senken können über einen vergleichsweise langen Zeitraum als unveränderlich angesehen werden.

1.2. Arbeitspaket 2: Modellierung der Logistikprozesse und Prozessalternativen (*TL & AST*)

- Dieses Arbeitspaket wurde plangemäß begonnen und ist abgeschlossen.

Ergebnisse:

Ausgehend von den AP 1 identifizierten Randbedingungen existieren Substratlieferanten mit entsprechenden Angebotsmengen, Abnehmer für Nebenprodukte mit entsprechenden Nachfragemengen und zwischen ihnen liegenden geographischen Entfernungen sowie eine Aussage darüber wieviel Wärme zwischen verschiedenen Standorten fließen kann. Es gibt mehrere Typen von BGA mit unterschiedlichen Bedarfen an Substraten und Angeboten an Nebenprodukten, welche an den Standorten der Substratlieferanten bzw. der Nebenproduktnachfrager sowie weiteren ausgewiesenen Standorten eröffnet werden können. Das gegebene Netzwerk aus Substratlieferanten, Nebenproduktnachfragern und ausgewiesenen Standorten sowie die zwischen ihnen liegenden Entfernungen kann mathematisch als ungerichteter, kantengewichteter Multigraph aufgefasst werden.

Aufgrund der Charakteristik der Problemstellung (Standortwahl im Netzwerk) ist das Problem als gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem (engl. MILP: mixed integer linear program) mit spezifischer Zielfunktion unter Nebenbedingungen formuliert worden. Nachfolgend ist das entwickelte Modell formal dargestellt:

Zielfunktion:

$$F(\chi, x, y) = \sum_{t \in T} \sum_{j \in V} y_{jt} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{c^{\alpha} \in C} D^{\alpha}_{ij} \cdot x_{ijc} \cdot c_{Tc} - \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{c^{\beta} \in C} D^{\beta}_{ij} \cdot \chi_{ijc} \cdot c_{Tc} - \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{c^{\beta} \in C} D^{\beta}_{ij} \cdot x_{ijc} \cdot c_{Tc} - \sum_{j \in V} \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} \left(y_{jt} \cdot \sigma_{tc} - \sum_{i \in V} x_{ijc} \right) c_{Lc} \quad 1$$

→ max

Nebenbedingungen:

$$\sum_{i \in V} \chi_{ijc} = \sum_{t \in T} y_{jt} \cdot \delta_{tc} \quad \forall j, c \quad 2$$

$$s_{ic} \geq \sum_{j \in V} \chi_{ijc} \quad \forall i, c \quad 3$$

$$\sum_{i \in V} x_{ijc} \leq \sum_{t \in T} y_{jt} \cdot \sigma_{tc} \quad \forall j, c \quad 4$$

$$d_{ic} \geq \sum_{j \in V} x_{ijc} \quad \forall i, c \quad 5$$

Nichtnegativitätsbedingungen:

$$y_{jt} \geq 0 \quad 6$$

$$\chi_{ijc}, x_{ijc} \geq 0 \quad 7$$

Zahlenräume

$$y_{jt} \in \mathbb{Z} \quad 8$$

$$\chi_{ijc}, x_{ijc} \in \mathbb{R} \quad 9$$

Die Bedingung (2) stellt sicher, dass die Menge eines jeden Substrats, welches von allen Substratlieferanten zu einer (eröffneten) BGA transportiert wird, auch den Bedarfen der BGA entspricht. Eine Unter- bzw. Überdeckung der Bedarfe an Substraten ist über den Betrachtungszeitraum nicht zulässig. Insbesondere finden keine unnötigen Transporte von Substraten zum Standort der BGA im Betrachtungszeitraum statt. Des Weiteren darf die Liefermenge das Angebot des Lieferanten für das jeweilige Substrat nicht übersteigen. Die entsprechende Restriktion ist durch Bedingung (3) formuliert.

Analog zu Bedingung (2) stellt Bedingung (4) sicher, dass das Angebot der BGA an Nebenprodukten die von der BGA ausgelieferte Menge von Nebenprodukten übersteigt oder dieser Menge entspricht. Die Bedingung (4) ist weniger streng formuliert. Dies führt unter Umständen zu Lagermengen von Nebenprodukten am Standort der BGA. Die Liefermenge an Nebenprodukten darf zudem den Bedarf der Kunden nicht überschreiten (Restriktion (5)).

Die Zielfunktion (1) besteht aus drei Hauptkomponenten. Maximiert werden Erlöse (z. B. Verkauf des erzeugten Stroms und der entstehenden Wärme) abzüglich der Kosten (z. B. Abschreibungen, Transport- und Lageraufwände) im Betrachtungszeitraum. Quasifixe Erlöse, z.B. für die gesamte produzierte Strommenge, sowie die Fixkosten werden durch

den ersten Term beschrieben. Der Zielfunktionswert kann, in Abhängigkeit des Standortes der Anlage(n), durch den Verkauf der überschüssigen Wärme erhöht werden. Dies drückt sich im zweiten Term aus. Standortabhängige Kosten fallen durch die Transportaufwände für Substrate und Nebenprodukte an. Sie werden durch den dritten und vierten Term beschrieben. Die letzte Komponente der Zielfunktion fasst die Lagerkosten für die u.U. an der BGA verbleibenden Gärprodukte zusammen.

Das in AP2 vorgeschlagene Modell bildet die in AP1 identifizierten Einflussgrößen und deren Zusammenhänge in geeigneter Form ab. Der hohe Formalisierungsgrad unterstützt eine effiziente algorithmische Behandlung der Problemstellung. Das Modell ist hinsichtlich der Erweiterbarkeit flexibel – es können z.B. beliebige unterschiedliche BGA Typen, Substrate und Nebenprodukte betrachtet werden – und ist gleichzeitig vergleichsweise anspruchslos bezüglich des Datenbedarfs.

1.3. Arbeitspaket 3: Entwurf eines Optimierungsalgorithmus (TL & AST)

- Dieses Arbeitspaket wurde plangemäß begonnen und ist abgeschlossen.

Ergebnisse:

Zur Lösung des Optimierungsproblems ist aufgrund der Variable d_{ij} (dem minimalen Transportweg zwischen allen Knoten i und j) eine vorgeschaltete Berechnung notwendig (preprocessing). Zur Ermittlung der minimalen Transportwege zwischen allen Knoten existieren diverse Algorithmen. Insbesondere der „all-pairs shortest path“ Algorithmus nach Floyd-Warshall oder auch Tripel-Algorithmus erfüllt jedoch den Anspruch an geringe Komplexität bezüglich des Rechenaufwands (hier: polynomial - $o(n^3)$) und vergleichsweise niedrigen Implementierungsaufwand. Wegen dieser Eigenschaften wird das Verfahren zur Lösung der Preprocessingaufgabe empfohlen und ist folglich in AP4 als Bestandteil des Berechnungswerkzeugs implementiert worden.

Aufgrund der Ganzzahligkeitsbedingung für die Anzahl der zu eröffnenden BGA eines bestimmten Typs an einem Standort ($y_{it} \in \mathbb{Z}$) folgte für das in AP 2 formulierte Optimierungsproblem, dass die Struktur des Lösungsraums (geometrisch: des konvexen Polyeders, welcher durch die Nebenbedingungen definiert wird) nicht genau bekannt ist.

Zur exakten Lösung von Problemen mit dieser Problemstruktur konnten grundsätzlich zwei Verfahren identifiziert werden: Branch-and-Bound sowie das Schnittebenenverfahren. Zudem sind Kombinationen dieser Verfahren möglich (Branch-and-Cut). Alle Verfahren basieren auf einer Relaxation des Ursprungsproblems, also der Vernachlässigung der Ganzzahligkeitsbedingung. Das relaxierte Problem kann z.B. mittels Simplexverfahren vergleichsweise schnell gelöst werden, führt allerdings im Allgemeinen zu nicht-ganzzahligen Lösungen. Im Anschluss werden daher schärfere Nebenbedingungen eingefügt und die entstehenden Probleme wiederum z.B. mittels Simplexverfahren gelöst. Iterativ wird nun solange vorgegangen bis schließlich die Ganzzahligkeit der betreffenden Entscheidungsvariablen erfüllt ist.

Für das vorliegende Problem hat sich ein Branch-and-Cut Ansatz als effizientes Lösungsverfahren herauskristallisiert. Im Verlaufe der Arbeiten konnte anhand von realistischen Beispielen (z.B. kleingleich 50 potentiellen Standorten, bei z. B. 3 verschiedenen Typen von BGA) festgestellt werden, dass die Rechenzeit für praktische Probleme in einem akzeptablen Rahmen von einigen wenigen Sekunden liegt. Bislang

verhielten sich alle betrachteten Beispielszenarien hinsichtlich der Rechenzeiten unproblematisch. Es kann somit vermutet werden, dass alle praxisrelevanten Problemgrößen mit dem gewählten Ansatz stets optimal und mit akzeptablem Rechenaufwand gelöst werden können. Für den Fall, dass eine (i. Allg. aber suboptimale) Eröffnungslösung ohne Solver-Einsatz gefunden werden soll, wird zudem nachfolgender rekursiver Algorithmus, eine Greedy-Heuristik, als Pseudo-Code angegeben:

Eingabe: *probleminstanz = netzwerk, konfiguration*

Ausgabe: *zielfunktionswert, y, chi, x*

bgaListe = ladeBGATypen(konfiguration)

median = ermittleMedian(netzwerk)

zielfunktionswert = berechneZielfunktionswert(y, chi, x) \triangleq Lagerkosten

y = 0

chi = 0

x = 0

berechneLoesung():

if *is empty* *bgaListe*:

return

else:

bga = berechneGewinnstaerksteBGA(bgaListe)

if *SubstratRestriktion(bga) = TRUE*:

pass

else:

y = eroeffneBGA(bga, median)*

chi = berechneKuerzesteSubstratTransporte(y*, netzwerk, konfiguration)*

x = berechneKuerzesteNebenproduktTransporte(y*, netzwerk, konfiguration)*

zielfunktionswert = berechneZielfunktionswert(y*, chi*, x*)*

if *zielfunktionswert* > zielfunktionswert*:

*zielfunktionswert = zielfunktionswert**

*y = y**

*chi = chi**

*x = x**

berechneLoesung()

else:

bgaListe = bgaListe - bga

berechneLoesung()

1.4. Arbeitspaket 4: *Entwicklung eines Berechnungs- und Optimierungstools (TL)*

- Dieses Arbeitspaket wurde plangemäß begonnen und ist abgeschlossen.

Ergebnisse:

Das für die Standortplanung und -bewertung entwickelte Modell erstreckt sich selbst für vergleichsweise kleine Problemgrößen mit wenigen zu betrachtenden Anlagen, Standorten und Produkten schnell, mit Nebenbedingungen und Zielfunktion, über tausend Zeilen Text. Eine „handschriftliche“ Berechnung kommt daher nicht in Frage. Damit jedoch eine Vielzahl von Probleminstanzen betrachtet werden kann und auch die Forderung nach einfachen Manipulationsmöglichkeiten für eine fundierte Szenarioanalyse erfüllt ist, wurde das nachfolgend beschriebene Programm entwickelt.

Mit Blick auf eine möglichst hohe Konsistenz der Eingabedaten und unter Berücksichtigung einer unkomplizierten Parametrierung durch den Nutzer ist ein validiertes XML-Dokument entstanden, welches alle Einflussgrößen und die zugehörigen Datentypen enthält. Somit entfällt nicht nur die Überprüfung der eingegebenen Daten im Programm (z.B. müssen Transportkosten vom Typ „float“ sein), auch kann der Quellcode

deutlich schlanker gehalten werden. Dem Nutzer wird durch die vorgegebene Struktur zudem eine Hilfestellung bezüglich der Programmsteuerung gegeben, so dass er sich auf die Ergebnisinterpretation konzentrieren kann. Eine umfangreiche Dokumentation wird unnötig.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xss:configs      xmlns:xsb="http://www.bga.de/properties"
                  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
                  xmlns:xss="http://www.bga.de/scenario"
                  xsi:schemaLocation="http://www.bga.de/scenario ./scenario-
conf.xsd"
>
  <xss:cargos>
    <xss:cargo name="maize" distance-type="beta">
      <xss:storagecosts>0</xss:storagecosts>
      <xss:transportcosts>2.0</xss:transportcosts>
    </xss:cargo>
    <xss:cargo name="sLurry" distance-type="beta">
      <xss:storagecosts>0</xss:storagecosts>
      <xss:transportcosts>3.0</xss:transportcosts>
    </xss:cargo>
    <xss:cargo name="digestate" distance-type="beta">
      <xss:storagecosts>3.0</xss:storagecosts>
      <xss:transportcosts>2.0</xss:transportcosts>
    </xss:cargo>
    <xss:cargo name="heat" distance-type="alpha">
      <xss:storagecosts>0</xss:storagecosts>
      <xss:transportcosts>2000</xss:transportcosts>
    </xss:cargo>
  </xss:cargos>
  <xss:facilities>
    <xss:biogas-facility name="75 kW">
      <xsb:demand name="sLurry" distance-type="beta">3000.0</xsb:demand>
      <xsb:demand name="maize" distance-type="beta">790.0</xsb:demand>
      <xsb:supply name="digestate" distance-type="beta">3000</xsb:supply>
      <xsb:supply name="heat" distance-type="alpha">56250000</xsb:supply>
      <xsb:costs>57197.5</xsb:costs>
      <xsb:returns>133912.5</xsb:returns>
    </xss:biogas-facility>
    <xss:biogas-facility name="500 kW">
      <xsb:demand name="sLurry" distance-type="beta">2200.0</xsb:demand>
      <xsb:demand name="maize" distance-type="beta">6500.0</xsb:demand>
      <xsb:supply name="digestate" distance-type="beta">2200</xsb:supply>
      <xsb:supply name="heat" distance-type="alpha">4500000</xsb:supply>
      <xsb:costs>302450.0</xsb:costs>
      <xsb:returns>346500.0</xsb:returns>
    </xss:biogas-facility>
  </xss:facilities>
  <xss:network>
    <xss:nodes>
      <xss:node name="1">
        <xss:demand name="heat" distance-type="alpha">4000</xss:demand>
        <xss:supply name="maize" distance-type="beta">5000.0</xss:supply>
      </xss:node>
      <xss:node name="2">
        <xss:demand name="heat" distance-type="alpha">180000</xss:demand>
        <xss:supply name="sLurry" distance-type="beta">6500.0</xss:supply>
      </xss:node>
      <xss:node name="3">
        <xss:demand name="digestate" distance-type="beta">3200</xss:demand>
```

Nach Eingabe der Szenariodaten (siehe XML-Ausschnitt), ist nur noch die Berechnung anzustoßen. Das hierfür entwickelte Python-Programm läuft ohne weitere Nutzerinteraktion ab. Dabei greift das Programm auf Komponenten eines open-source Solvers zurück (COIN-OR/ CBC). Die Berechnungsergebnisse werden wahlweise direkt auf dem Bildschirm ausgegeben oder können in eine Datei umgeleitet werden. Die Ausgabe erfolgt zum einen in Form einer Liste, mit der Angabe des errechneten Zielfunktionswerts und der Belegung aller Entscheidungsvariablen sowie mit der hierfür benötigten Berechnungszeit in Sekunden:

```
{'Status': 'Optimal', 'Solution time': 0.04498490074298919, 'Objective build time': 0.04999995231628418,
'Restriction build time': 0.032000064849853516, 'Objective value': 3786.1}
```

```
Chi_((3,'5'),_Maissilage') 790.0
```

```
Chi_((5,'5'),_Rinderguelle') 3000.0
```

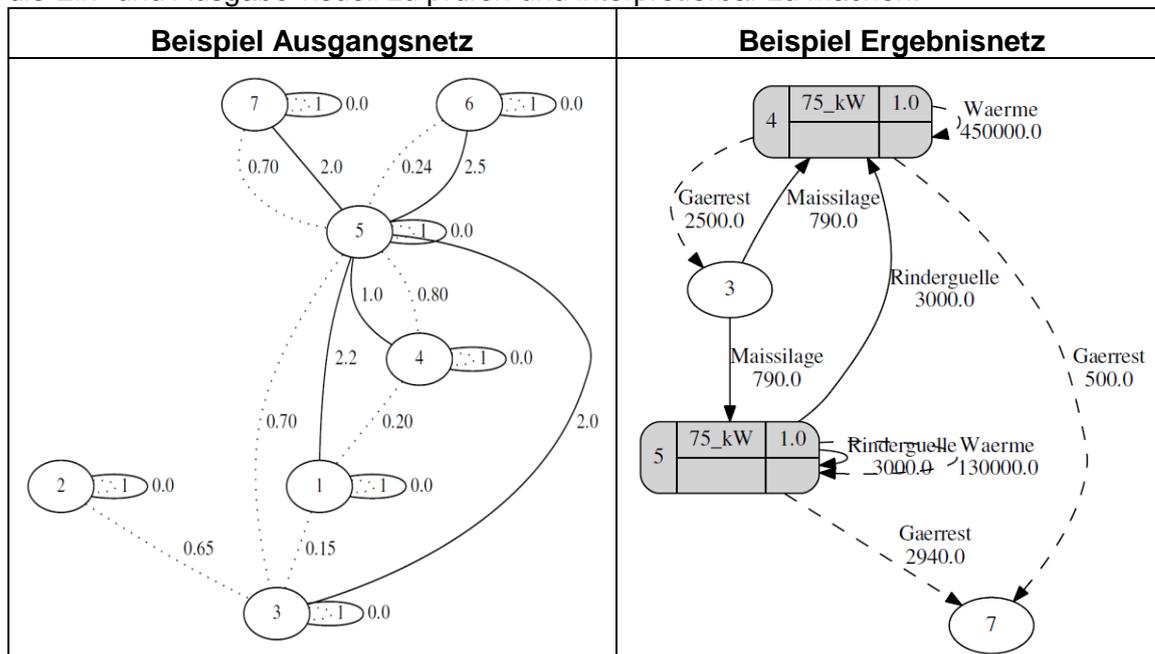
```
X_((4,'5'),_Waerme') 250000.0
```

```
X_((5,'5'),_Waerme') 67000.0
```

```
X_((7,'5'),_Gaerrest') 2574.0
```

```
Y_((5,'_75_kW') 1.0
```

Zum anderen werden das Ausgangsnetzwerk und das Ergebnis graphisch repräsentiert. Die gewählte Darstellung umfasst alle durch den Projektbegleitenden Ausschuss in den Fokus gestellten relevanten Informationen mit der Zielstellung schnell und übersichtlich die Ein- und Ausgabe visuell zu prüfen und interpretierbar zu machen.



Anhand der textuellen und der grafischen Repräsentation ist abzulesen, an welchen Standorten Biogasanlagen zu errichten sind und wie die Stoff- und Energieströme kosten- bzw. erlösoptimal zu verlaufen haben. Zudem wird angegeben, welcher Zielfunktionswert (jährliche Gesamterlös) in dem jeweiligen Szenario zu erwarten ist.

1.5. Arbeitspaket 5: Verifikation/Validierung des Modells und Test des Berechnungswerkzeugs (AST)

- Dieses Arbeitspaket wurde plangemäß begonnen und ist abgeschlossen.

Ergebnisse:

Der Schwerpunkt lag auf der Validierung der modellbasierten Berechnungen mit Beobachtungen aus der Praxis. Zudem sind, anhand von Plausibilitätschecks und Nebenrechnungen mit Zwischenergebnissen, die Kalkulationen des Berechnungswerkzeugs verifiziert worden – das Berechnungswerkzeug wird von den Projektbearbeitern und von den Mitgliedern des PA als korrekt arbeitend angesehen. Nachfolgend wird an einem der Beispiele gezeigt, wie die Ergebnisse validiert wurden. Die verwendeten Kenngrößen entstammen FNR, 2016 [Online] <http://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen> [Zugriff am 27.03.2017].

Zur Vereinfachung wird im gewählten Szenario angenommen, dass sich die jährlichen standortunabhängigen Kosten aus den spezifischen Investitionskosten, gleichmäßig verteilt über einen Nutzungsraum von 16 Jahren, zuzüglich der jährlichen Substratkosten zusammensetzen. Die spezifischen Investitionskosten der 75kWel Anlage belaufen sich auf 9.000,00€/kWel, in Summe also 675.000,00€. Für die 500kWel Anlage werden 4.600,00€/kWel angegeben, insgesamt hat das Investitionsvolumen somit einen Umfang von 2.300.000,00€. Ausgehend von den Investitionskosten sowie den Substratbedarfen ergeben sich für die Anlage mit 75kWel somit 42.187,50€ Fixkosten pro Jahr sowie 25.280,00€ an Substratkosten, also insgesamt 67.467,50€ pro Jahr. Für die Anlage mit 500kWel hingegen fallen 143.750,00€ Fixkosten und 315.800,00€ Substratkosten an, also insgesamt 459.550,00€.

Knoten	Produkt	(A)ngebot/ (N)achfrage	Menge	Metrik
1	Maissilage	A	10.000 t	β
2	Wärme	N	12.500 kWh	α
3	Gärrest	N	2.500 t	β
3	Maissilage	A	16.000 t	B
4	Wärme	N	250.000 kWh	α
5	Wärme	N	67.000 kWh	α
5	Rindergülle	A	12.400 m ³	β
6	Getreide-GPS	A	5.400 t	β
7	Gärrest	N	3.440 t	β
7	Grassilage	N	4.445 t	β

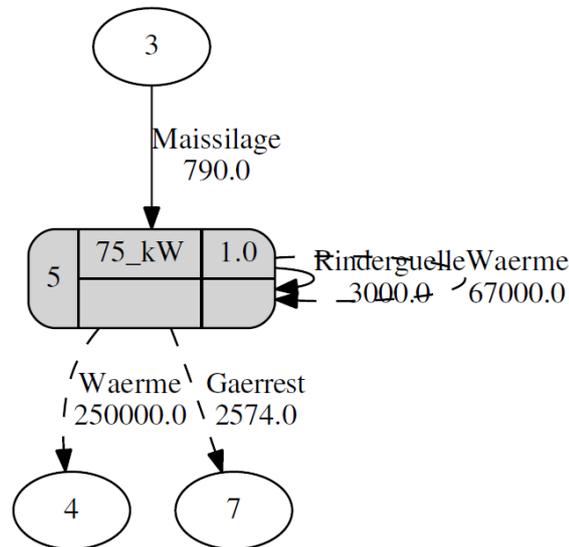
Die Vereinfachung ist unproblematisch, da im Planungswerkzeug jährliche Betriebskosten als Eingangsgröße hinterlegt werden. Diese können sich auf vielfältige Weise zusammensetzen. Zu Demonstrationszwecken soll die Reduktion auf zwei Kostengrößen genügen. Die Vergütung des erzeugten Stroms und der Wärme richtet sich nach dem zu erzielenden Marktpreis. Es wird davon ausgegangen, dass das Verhältnis der elektrischen zur thermischen Leistung im BHKW der Anlagen 2 zu 3 beträgt.

Substrat	Substratkosten	Bedarf 75 kWel	Bedarf 500 kWel
Rindergülle	0,00 €/m ³	3.000 m ³	2.200 m ³
Maissilage	32,00 €/t	790 t	6.500 t
Getreide-GPS	47,00 €/t	0 t	1.100 t
Grassilage	51,00 €/t	0 t	1.100 t

Kenngroße	75 kWel	75 kWel
Betriebsstunden pro Jahr	6800 h	8000 h
Leistung (thermisch)	112,5 kW	750,0 kW
Wärmeüberschuss pro Jahr	765.000 kWh	6.000.000 kWh
Wärmepreis	0.02 ct/kWh	0.02 ct/kWh
Leistung (elektrisch)	13,32 ct/kWh	11,49 ct/kWh
Stromerlös pro Jahr	67.932,00 €	459.600,00 €

Bislang sind für das Beispiel ausschließlich logistikunabhängige Kosten sowie die Erlöse aus der Stromeinspeisung betrachtet worden. Zudem ist die Kilowattstunde Wärme monetär bewertet worden. Schließlich sind noch die Lager- und Transportaufwände für Substrate und Gärreste zu bewerten. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit spielen Erlöse für Gärprodukte z. B. in Form von verkauften Düngemitteln im Folgenden keine Rolle. Entsprechende Erträge sind jedoch bei Bedarf im Berechnungsverfahren problemlos abbildbar.

Anhand der im Beispiel gewählten Parametrierung wird die in der Grafik dargestellte Lösung ausgegeben. Ausschließlich in Knoten 5 wird eine BGA vom Typ 75kWel errichtet. Die zugehörigen optimalen Transport- und Energieströme von und zur BGA können ebenfalls der Abbildung entnommen werden. Der sich nach Abzug aller Kosten ergebende Gewinn beträgt mit der beschriebenen Parametrierung und der daraus errechneten Konfiguration 3.786,20€ pro Jahr.



Bei Vergleich der Grafik mit der Verteilung der Substratangebote und Nebenproduktnachfrage aus entsprechenden Tabellen wird ersichtlich, dass die Position der Wärmesenken und die der Substratquellen signifikanten Einfluss auf den optimalen Standort der BGA und somit auf deren wirtschaftlichen sowie ökologischen Betrieb haben. Das modellbasierte Ergebnis spiegelt die Erfahrungen der Antragsteller aus der betrieblichen Praxis wider.

1.6. Arbeitspaket 6: *Dokumentation und Publikation*

- Dieses Arbeitspaket wurde plangemäß begonnen und ist abgeschlossen.

Dokumentation und Publikation umfasste während der gesamten Projektlaufzeit das Erstellen von öffentlichen Dokumenten, wie Homepageinhalten, Berichten, Postern und Vorträgen. Zudem wurden studentische Arbeiten betreut und deren Erkenntnisse in die Wissensbasis um das Forschungsprojekt integriert. Das Pflegen interner Dokumente, wie Quellcodedokumentation, Methodenbeschreibung, kollaborativer Ordnerstrukturen und Reportings fallen ebenfalls unter die Umfänge des Arbeitspakets. Das Arbeitspaket kann als das Projekt dauerhaft begleitend angesehen werden.

2. Verwendung der Zuwendung

TLA:

- Im Berichtszeitraum wurden zur Durchführung der Arbeiten bislang 24 Monate wissenschaftliches-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) eingesetzt.

Für Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) und Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) wurden keine Ausgaben geplant und keine durchgeführt.

AST:

- Im Berichtszeitraum wurden zur Durchführung der Arbeiten bislang 12 Monate wissenschaftliches-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) eingesetzt.

Für Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) und Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) wurden keine Ausgaben geplant und keine durchgeführt.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten leisten einen angemessenen Beitrag zum Forschungsvorhaben einer optimalen Standortbestimmung von Biogasanlagen. Die durchgeführten Arbeiten waren in Inhalt und Umfang notwendige Schritte zur Erreichung des Forschungsziels. Der Fortschritt des Projektes und der Mitarbeiterereinsatz entsprechen dem geplanten Arbeitsablauf.

4. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Bislang ist bei der Planung von BGA zu großen Teilen das Förderportfolio des EEG zugrunde gelegt worden. Aufgrund der weit über dem Marktpreis liegenden Vergütung des erzeugten Stroms war es demnach möglich, z. B. trotz langer Transportstrecken für Substrate und Gärreste bei kaum vorhandener Abwärmenutzung ausreichende Gewinne zu erzielen. Aufgrund einer Vielzahl von Novellen der Gesetzeslage und der damit einhergehenden Reduktion gewährter Boni bzw. der Verschärfung von Restriktionen, z.B. der verpflichtenden Nutzung von Abwärme, ist eine Entscheidung für oder wider der Errichtung verstärkt vom Effizienzgedanken getrieben.

Im Ergebnis des Forschungsprojekts ist ein flexibles, umfassendes Modell entwickelt worden, mit dessen Hilfe nicht nur bestehende BGA-Szenarien hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit untersucht werden können. Vielmehr entstand ein umfassendes Planungswerkzeug mit dessen Hilfe Entscheidungen für oder wider der Errichtung entsprechender Anlagen quantifiziert getroffen werden können. Die Hauptleistung liegt in der Adaption logistischer Methoden, um den agrarwirtschaftlichen Sachverhalt nachweislich umfassend abzubilden und dem mit dieser Methode verknüpften und vergleichsweise geringen Aufwand zur Modellparametrierung. Somit sind landwirtschaftlich geprägte KMU erstmals in die Lage versetzt, schnell und transparent Szenarien zu erstellen und anhand eines belastbaren Ergebnisses zu bewerten. Es wird nicht nur die Frage nach der ökonomisch sinnvollen

Konfiguration beantwortet, sondern auch eine Argumentation für die ökologische Vertretbarkeit, z.B. aufgrund der Minimierung der Gesamttransportstrecken, geliefert. Damit kann Kritik an der geplanten Errichtung einer oder mehrerer Anlagen fundiert begegnet werden.

Das prototypisch entwickelte Berechnungswerkzeug versetzt Anwender aufgrund der einfachen Bedienung in die Lage, Szenarien beliebiger Komplexität zu erstellen, zu kalkulieren und mittels geeigneter visueller Ergebnisrepräsentation zu interpretieren. Die mathematisch-modellhafte Formulierung der Problemstellung ist somit einer für Endanwender nutzstiftenden Umsetzung zugeführt worden.

Insbesondere bei politischen Entscheidungen, welche in der Landwirtschaft z.T. enorme Schlagkraft entfalten, kann das Werkzeug eine wichtige Unterstützung für die Abschätzung bestimmter Fördermaßnahmen sein. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass eine eher allgemeine Vergabe von Fördergeldern nach dem „Gießkannenprinzip“ ungünstige Effekte hat. So ist zu erwarten, dass aufgrund fehlender Wärmesenken insbesondere ältere und größere Anlagen in ländlichen Gebieten „sterben“ werden. Der Effekt kann aus dem Modell abgeleitet werden und ist in der Praxis bereits zu beobachten. Die Autoren halten es daher für angebracht, den Einzelfall stets gesondert zu bewerten, da die landwirtschaftliche Gemengelage regional große Unterschiede aufweist. Mit dem vorgestellten Berechnungswerkzeug ist das möglich.

5. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Folgende Transfermaßnahmen wurden im Berichtszeitraum durchgeführt:

Eine umfangreiche Projektbeschreibung sowie detaillierte Darstellung der bereits erreichten Projektergebnisse findet sich zudem im Internet unter <https://tu-dresden.de/mw/biogaslogistik> und wird projektbegleitend weiterentwickelt.

Zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft wurde eine Sitzung mit dem projektbegleitenden Ausschuss am 29.01.2016 an der Professur für Technische Logistik durchgeführt. Inhaltlich wurden insbesondere die identifizierten Einflussgrößen auf die Standortwahl von BGA und deren Zusammenhänge ausführlich diskutiert und bewertet. Im Ergebnis wurde die Korrektheit des Modells aus AP2 bestätigt. Des Weiteren sind Anforderungen für eine geeignete Ergebnisrepräsentation des Optimierungsproblems in Kooperation mit den Wirtschaftsvertretern spezifiziert worden.

Am 04.02.2016 wurde das Forschungsvorhaben und die erreichten Zwischenergebnisse in Form eines Vortrags sowie einer Posterpräsentation zum 8. Fachkolloquium der TLA (Technische Logistik und Arbeitssysteme) in Dresden vorgestellt. Der wissenschaftliche Artikel zum Vortrag wurde im Tagungsband (ISBN: 978-3-86780-464-6) veröffentlicht. Eine weitere Veröffentlichung erfolgte am 28.-29.09.2016 auf dem 12. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik in Form eines Posterbeitrags in Stuttgart. Zudem sind Modell und Heuristik einer breiteren Öffentlichkeit im Logistics Journal (URN:0009-14-44745) vorgestellt worden.

Eine weitere Sitzung mit dem projektbegleitenden Ausschuss fand am 01.06.2016 an der Professur für Technische Logistik statt. Insbesondere das entwickelte Berechnungswerkzeug stand im Fokus der Diskussionen. Einigkeit bestand bei der Vorgehensweise der Parametrierung. Die Gestaltung der Ergebnisausgabe, speziell der visuellen Repräsentation, wurde angepasst.

Am 04.02.2016 wurde das Forschungsvorhaben und die erreichten Zwischenergebnisse in Form eines Vortrags sowie einer Posterpräsentation zum 9. Fachkolloquium der TLA

(Technische Logistik und Arbeitssysteme) in Dresden vorgestellt. Der wissenschaftliche Artikel zum Vortrag wurde im Tagungsband (ISBN: 978-3-86780-511-7) veröffentlicht. Auf der 22. Fachtagung zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe – Bioökonomie 3.0 am 16.03.2017 bis zum 17.03.2017 wurden die Ergebnisse einem Fachpublikum aus der Agrarwirtschaft in Form eines Posterbeitrags vorgestellt. Ein Artikel in der Fachzeitschrift „Die Landtechnik“ wird im ersten Quartal 2017 erscheinen.

Zur Übersicht sind im Plan für den Ergebnistransfer in die Wirtschaft in der Anlage A die bereits durchgeführten Maßnahmen grün markiert.

Maßnahme	Ziel/Beschreibung	Zeitraum	
Projektbegleitender Ausschuss	ausführliche und fortlaufende Diskussion mit den Vertretern der Unternehmen im projektbegleitenden Ausschuss	10/2014-09/2016	<input checked="" type="checkbox"/>
Ansprache weiterer Unternehmen	Gewinnung zur Mitarbeit im projektbegleitenden Ausschuss, Problemsensibilisierung und Diskussion	10/2014-09/2016	<input checked="" type="checkbox"/>
Internetpräsentation	Darstellung des Forschungsvorhabens und der Ergebnisse auf den Internetseiten der Professur Technische Logistik und der Professur für Agrarsystemtechnik	ab 2016	<input checked="" type="checkbox"/>
	freier Download des Berechnungswerkzeugs aus AP 4	ab 03/2017	<input checked="" type="checkbox"/>
Vorträge	Schriftlicher Tagungsbeitrag auf Seminaren der DLG, der FNR, der INE zu Energiepflanzen ¹ (ggf. weitere)	Herbst 2017	offen
	Fachtagung „Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe“ an der TU Bergakademie Freiberg	03/2017	<input checked="" type="checkbox"/>
	Fachkolloquium der WGTL inklusive Artikel im Tagungsband	Herbst 2016	<input checked="" type="checkbox"/>
	Fachkolloquium für Technische Logistik an der TU Dresden inklusive Artikel im Tagungsband	Frühjahr 2016	<input checked="" type="checkbox"/>
Publikationen	Veröffentlichung in praxisnahen Fachzeitschriften, z.B. „profi“, „top agrar“, „dlz agrarmagazin“ und „Lohnunternehmen“ sowie „Landtechnik“ (wissenschaftliche Publikation)	ab Ende 2016	<input checked="" type="checkbox"/>
Messeteilnahmen	Projektpräsentation auf dem Messestand der Professur für Agrarsystemtechnik (und ggf. in Fachforen) auf der Agritechnica (Hannover)	11/2017	<input checked="" type="checkbox"/>
	Projektpräsentation auf dem Messestand der Professur für Agrarsystemtechnik (und ggf. in Fachforen) auf der Agra (Leipzig)	ab Frühjahr 2016	<input checked="" type="checkbox"/>

¹ Folgende Verbände sind mit den Akronymen gemeint: Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. (DLG), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Internationale Vereinigung für nachwachsende Rohstoffe und Energiepflanzen e.V. (INE).

Maßnahme	Ziel/Beschreibung	Zeitraum	
Beratung von Unternehmen	Kontakte zu weiteren Unternehmen, die nicht über den projektbegleitenden Ausschuss in das Forschungsvorhaben eingebunden sind, kommen insb. durch Vorträge und Messteilnahmen zustande	ab 2016	<input checked="" type="checkbox"/>
Übernahme der Ergebnisse in die Lehre	Aufnahme der Thematik in die Lehrveranstaltung „Landmaschinen“ der Professur für Agrarsystemtechnik	ab WS 2016/2017	<input checked="" type="checkbox"/>
	Bearbeitung von Teilaufgaben im Rahmen von Diplom- und Master-Arbeiten an beiden Professuren und damit Verbreitung der Erkenntnisse durch Absolventen der TU Dresden	ab 2015	<input checked="" type="checkbox"/>