

Standorteröffnung von Biogasanlagen: Problemmodellierung, -einordnung und -lösung

Location opening for biogas plants:
Modelling, model analysis and solution

Hannes Hahne

*Professur für Technische Logistik
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Technische Universität Dresden*

Biogasanlagen (BGA) sind gleichzeitig Quelle und Senke von Stoff- und Energieströmen. Dies gilt auch für einige der sie versorgenden Substratlieferanten. Nachfolgend wird ein gemischt-ganzzahliges lineares Standortplanungsmodell vorgestellt, welches die Transport- und Lagerkosten für Gärsubstrate und -reste minimiert, die einen Großteil der Betriebskosten verursachen. Unter Berücksichtigung von Angebots- und Nachfragerestriktionen werden anhand des Modells die optimale Anzahl und Typauswahl bestimmt sowie die Standorte der zu eröffnenden BGA festgelegt und somit langfristig deren Wirtschaftlichkeit verbessert.

[Schlüsselwörter: gemischt-ganzzahliges lineare Programmierung, Standortwahl, Biogasanlage, Modell, Heuristik]

Biogas plants are both sinks and sources of material and energy flows. This also applies to some of their substrate suppliers. Transport and storage of substrates and byproducts are causing a large part of the operating costs. Therefore, a mixed linear location planning model is presented aiming to reduce these costs to a minimum. Taking into account the supply and demand constraints, the optimum number of facilities will be calculated, their types will be picked and their locations will be set, thus improving long-term profitability.

[Keywords: mixed linear integer programming, location siting, biogas plants, model, heuristic]

1 MOTIVATION

In Biogasanlagen (BGA) werden durch Fermentation Gärsubstrate in Biogas - in der Regel zur weiteren Umwandlung in Strom - und in Gärreste umgewandelt (vgl. hierzu [KAL10]). BGA werden aufgrund der benötigten Substrate für die Vergärung überwiegend in landwirtschaftlich geprägten Gebieten errichtet. Der Transport dieser Ressourcen erfolgt in der Regel auf dem Landweg über das vorhandene Straßen- und Wegenetz, ebenso die Verteilung anfallender Gärreste (z. B. als Dünger) auf Nachfrager. Zudem sind Biogasproduzenten seit 2012 ge-

setzlich dazu angehalten, die bei der Stromproduktion entstehende Abwärme vorhandenen Wärmeverbrauchern (z. B. Tierzuchtbetriebe, Gewächshäuser) zur Verfügung zu stellen und weiter zu nutzen. Durch Bonuszahlungen soll die Nachnutzung von Abwärme gefördert werden. Zur Produktion von Biogas werden unterschiedliche Gärsubstrate eingesetzt. Dem überwiegenden Teil der in Deutschland betriebenen BGA wird Mais zugeführt. Zudem werden Reststoffe aus der Nutztierhaltung (z. B. Gülle, Mist) vergoren und aufgrund ihrer katalytischen Wirkung auf den Fermentationsprozess als Co-Produkte eingesetzt. Für deren Einsatz erhält der Betreiber der BGA ebenfalls einen Bonus. Andere Substrate, wie Grassilage, Zuckerrüben oder organische Abfälle spielen ebenfalls eine, wenn auch mengenmäßig untergeordnete Rolle.

Aufgrund der vergleichsweise hohen Aufwände für Logistikprozesse beim Betrieb von Biogasanlagen – sie müssen permanent mit Gärsubstraten versorgt werden – stellen logistische Stellgrößen einen wesentlichen Optimierungsfaktor dar. Insbesondere hohe Transportentfernungen für Gärsubstrate und -reste wirken sich nachteilig aus. Die kostenverursachende Lagerung überschüssiger Substrate und Nebenprodukte gilt es ebenfalls zu vermeiden. Die logistischen Einflussgrößen wirken sich unmittelbar auf den wirtschaftlichen Erfolg von BGA aus und sind in der Regel durch deren Betreiber kurzfristig nicht zu beeinflussen. Insbesondere das Gesamtangebot an Gärsubstrat, die Nachfrage an Nebenprodukten und die geographische Lage der Quellen und Senken unterschiedlicher Gärsubstrate und -reste können über einen vergleichsweise langen Zeitraum als unveränderlich angesehen werden. Demzufolge wird bereits durch die Auswahl der Standorte der BGA und der Festlegung der zu errichtenden BGA-Typen eine weitreichende Entscheidung mit Auswirkung auf den zukünftigen wirtschaftlichen Erfolg getroffen.

2 MODELLIERUNG

Ausgehend von dem in Kapitel 1 beschriebenen Sachverhalt existieren Substratlieferanten mit entsprechenden Angebotsmengen, Abnehmer für Nebenprodukte mit entsprechenden Nachfragemengen. Zwischen ihnen liegen geographischen Entfernungen. Verschiedene BGA Typen (z.B. Trockenfermenter, mehrstufige Anlagen) mit unterschiedlichen Bedarfen an Substraten und Angeboten an Nebenprodukten können an den Standorten der Substratlieferanten bzw. der Nebenproduktnachfrager und weiteren Standorten eröffnet werden. Typisch für BGA ist ihre Errichtung im ländlichen Raum. Im Allgemeinen besteht daher kaum Knappheit an Bauplatz - die Anlagen können also „in unmittelbarer Nähe“ von Lieferanten und Abnehmer (z.B. an einem Maisfeld) errichtet werden. In der Praxis wird mit dem Ziel die Transportentfernungen zu minimieren auch so verfahren – im Modell ist eine Errichtung am Standort des Lieferanten bzw. Abnehmers daher zugelassen. Das gegebene Netzwerk aus Substratlieferanten, Nebenproduktnachfragern und weiteren Standorten mit den zwischen ihnen liegenden Entfernungen kann mathematisch als ungerichteter, kantengewichteter Graph aufgefasst werden. In Abhängigkeit gegebener Rahmenbedingungen (Substratangebot, Nebenproduktnachfrage, Netzwerk, BGA-Typen, Kosten und Erlöse) ist nun anhand eines geeigneten Modells zu entscheiden, welche BGA an welchen Standorten zu errichten sind, so dass die Erlöse aus der Biogasproduktion abzüglich der durch diese Standortwahl entstehenden Transport- und Lagerkosten maximiert werden.

2.1 FORMALISIERUNG

Sei $V = \{1, 2, \dots, n\}$ die Menge aller Knoten mit $v_i, v_j \in V$ und $i, j \in N$, welche den betrachteten Substratlieferanten, Nebenproduktkunden und ausgewiesenen Standorten entsprechen. Weiterhin sei $E \subseteq V \times V$ die Menge der Kanten mit $k_h = \langle v_i, v_j \rangle$ und $k_h \in E$, also das Straßen- und Wegenetz im betrachteten Gebiet. Zudem sind Entfernungen in Form von Kantengewichten $g: E \rightarrow \mathbb{R}$ mit $g(k_h)$ für alle $k_h \in E$ mit $h \in N$ gegeben.

Eine Folge k_1, k_2, \dots, k_s von Kanten k_h heißt Weg p von v_0 nach v_s , wenn eine Folge von Knoten v_0, v_1, \dots, v_s existiert, so dass $k_h = \langle v_{h-1}, v_h \rangle$ für alle $h = 1, \dots, s$ ist. Die Länge des Weges ist definiert als $w(p) = \sum_{h=1}^s g(k_h)$. Bezeichne $P(v_0, v_s)$ die Menge aller Wege von Knoten v_0 nach v_s , dann ist $d_{v_0, v_s} = \min\{w(p) \mid p \in P(v_0, v_s)\}$ die Distanz dieser Knoten in [EE] (Entfernungseinheiten). Die Bestimmung der Distanzen zwischen allen Knoten in einem kantengewichteten Graphen $G = (V, E, g)$ wird als all-pairs shortest-path Problem (APSP) bezeichnet. Einen Algorithmus zur Lösung des APSP beschreiben [FLO62].

Weiterhin existieren die Mengen T mit $t \in T$ (Typen von Biogasanlagen mit BGA-Typ t) und C mit $c \in C$ (Produktmenge mit den Produkten). Die Menge C entspricht im Kontext der Standortplanung für Biogasanlagen den Substraten bzw. Nebenprodukten. Jedem BGA-Typ t wird über die Funktion $r: T \rightarrow \mathbb{R}$ mit $r_t := r(t)$ für alle $t \in T$ ein Erlös bzw. über $f: T \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f_t := f(t)$ für alle $t \in T$ ein Fixkostenanteil (z. B. Abschreibungen) in [GE] (Geldeinheiten) bezogen auf den Betrachtungszeitraum zugewiesen. Ebenso werden anfallende Transport- und Lagerkosten in [GE] angegeben. Nun seien $i, j \in V$. Die Funktion $s: V \times C \rightarrow \mathbb{R}$ repräsentiert das Angebot für jedes Produkt in den einzelnen Knoten. Es ist $s_{ic} := s(\langle i, c \rangle)$. Analog gibt die Funktion $d: V \times C \rightarrow \mathbb{R}$ den Bedarf an Produkten in jedem Knoten an. Es ist $d_{ic} := d(\langle i, c \rangle)$. Angebote und Bedarfe werden in [ME] (Mengeneinheiten) angegeben. $c_{Tc} := c_T(c)$ beschreibt die Transportkosten der Form $c_T: C \rightarrow \mathbb{R}$ für alle $c \in C$ in $\frac{[GE]}{[ME] \cdot [EE]}$ des jeweiligen Produkts. $c_{Lc} := c_L(c)$ beschreibt die Lagerkosten der Form $c_L: C \rightarrow \mathbb{R}$ für alle $c \in C$. Griechische Buchstaben für Variablen deuten an, dass es sich um Angebots- oder Nachfragemengen der BGA bzw. Transportmengen hin zur BGA handelt. Entsprechend stellen die lateinischen Buchstaben für Variablen die Betrachtungsrichtung aus Sicht der Substratlieferanten und Nebenproduktnachfrager dar. Die Funktion $\sigma: T \times C \rightarrow \mathbb{R}$ repräsentiert das Angebot jedes Produkts bei einem speziellen Typ t . Es ist $\sigma_{tc} := \sigma(\langle t, c \rangle)$. Analog hierzu gibt die Funktion: $\delta: T \times C \rightarrow \mathbb{R}$ den Bedarf an einem Produkt durch eine BGA des Typs t an. Es ist $\delta_{tc} := \langle \langle t, c \rangle \rangle$.

Die Entscheidungsvariable $y_{jt} := y(\langle j, t \rangle)$ bezeichnet die Anzahl der eröffneten Biogasanlagen eines Typs t in einem Knoten j ($y: V \times T \rightarrow \mathbb{N}$). Die Entscheidungsvariable $\chi_{ijc} := \chi(\langle i, j, c \rangle)$ gibt die Transportmenge des Produktes c an eine (eröffnete) Biogasanlage an ($\chi: V \times V \times C \rightarrow \mathbb{R}$). Die Entscheidungsvariable $x_{ijc} := x(\langle i, j, c \rangle)$ gibt die Transportmenge des Produktes c von einer (eröffneten) Biogasanlage zu einem potentiellen Nachfrager i an ($x: V \times V \times C \rightarrow \mathbb{R}$). Es wird davon ausgegangen, dass die landwirtschaftlichen Rahmenbedingungen fixiert sind (vgl. auch Kapitel 1). Angenommen wird, dass eine bestimmte Menge an Substrat des betrachteten Gebiets von den Landwirten für den Einsatz in BGA vorgesehen ist. Nicht verbrauchte Substrate verursachen daher Lagerkosten und führen zu einer Reduktion des Zielfunktionswerts. Nachfolgend wird das Modell formalisiert. Die Komponenten des Modells werden im Anschluss daran erläutert.

2.2 MODELL

Zielfunktion:

$$\begin{aligned}
 F(y, \chi, x) = & \sum_{j \in V} \sum_{t \in T} y_{jt} \cdot (r_t - f_t) & 1 \\
 & - \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{c \in C} d_{ij} \cdot \chi_{ijc} \cdot c_{Tc} \\
 & - \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{c \in C} d_{ij} \cdot x_{ijc} \cdot c_{Tc} \\
 & - \sum_{i \in V} \sum_{c \in C} \left(s_{ic} - \sum_{j \in V} \chi_{ijc} \right) c_{Lc} \\
 & - \sum_{j \in V} \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} \left(y_{jt} \cdot \sigma_{tc} - \sum_{i \in V} x_{ijc} \right) c_{Lc}
 \end{aligned}$$

→ 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 jedes Substrats welches von allen Substratlieferanten zu einem BGA-Standort 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 größergleich als die von der BGA ausgelieferte Menge von Nebenprodukten ist. Die Bedin-

gung (4) ist weniger streng formuliert - dies führt unter Umständen zu Lagermengen von Nebenprodukten am Standort der BGA. Die Liefermenge an Nebenprodukten darf den Bedarf der Kunden nicht überschreiten (Bedingung (5)).

Die zu maximierende Zielfunktion (1) besteht aus drei Hauptkomponenten: Erlöse und Nichtlogistikkosten im Betrachtungszeitraum werden durch den ersten Term beschrieben. Logistikkosten fallen durch die Transport- und Lageraufwände für Substrate und Nebenprodukte an. Der zweite und dritte Term beschreiben die Transportkosten. Die beiden letzten Komponenten der Zielfunktion fassen die Lagerkosten zusammen.

Symbolverzeichnis	
Entscheidungsvariablen	
χ	Transportvolumen - Produkte hin zur Biogasanlage
x	Transportvolumen - Produkte weg von der Biogasanlage
y	Anzahl eröffneter Biogasanlagen
Mengen	
T	Typen von Biogasanlagen
V	Standorte
C	Produkte
Laufvariablen	
i, j	Element der Menge V
t	Element der Menge T
c	Element der Menge C
Konstanten	
c_{Tc}	Transportkosten für Produkte aus der Menge C
c_{Lc}	Lagerkosten für Produkte aus der Menge C
Zahlenräume	
\mathbb{R}	Reelle Zahlen
\mathbb{Z}	Ganze Zahlen

3 PROBLEMEINORDNUNG

Anhand der in Kapitel 2 getroffenen Aussagen und der daraus abgeleiteten formalen Abbildung wird das Problem als gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem behandelt. Eröffnete BGA können nur positiv-ganzzahlig sein, während die Transportmengen für Gärsubstrate und -reste positiv-reelle Werte annehmen. Da keine der Entscheidungsvariablen eine Potenz größer eins aufweist, handelt sich um ein lineares Problem. Belegungen der Entscheidungsvariablen, welche alle Nebenbedingungen erfüllen, werden mittels Zielfunktion bewertet. Die Belegung mit dem größten Zielfunktionswert ist die gesuchte Lösung. Es handelt sich also um ein Optimierungsproblem.

Das vorliegende Optimierungsproblem kann als Warehouse Location Problem (WLP) aufgefasst werden, wobei die zu errichtenden BGA den Warehouses entspre-

chen. WLP behandeln im Allgemeinen die Frage, wie viele Lager vorzusehen und an welchen Standorten diese zu errichten sind, sodass Nachfrage- und Angebotsmengen von Gütern nicht überschritten werden und die Summe aus Errichtungskosten sowie Transport- und Lagerkosten minimiert wird. Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass ein direkter Gütertausch zwischen Anbietern und Kunden nicht zugelassen ist sondern ausschließlich über das Warehouse umgeschlagen wird [vgl. hierzu auch Dom96 (S. 51 ff.)]. Insbesondere ähnelt das vorgestellte Modell einem kapazitierten, zweistufigen Mehrprodukt-WLP mit Stoffumwandlung.

Anhand der Restriktionen 2 und 3 (vgl. Kapitel 2.2: Nebenbedingungen) wird ersichtlich, dass das vorliegende WLP kapazitiv beschränkt ist. An eine BGA eines bestimmten Typs kann nicht mehr Substrat geliefert als von dieser benötigt wird. Zudem stellt sie nicht mehr Nebenprodukte zur Verfügung als sie durch Stoffumwandlung produziert. Die Variablen χ_{ijc} und x_{ijc} deuten an, dass zwei Transportstufen innerhalb des Modells zu berücksichtigen sind. Das Vorkommen unterschiedlicher Produkte, insbesondere Substrate (z.B. Mais und Gülle) und Nebenprodukte (z.B. Gärreste und Wärme) wird im Modell durch die Menge C abgebildet. Da diesen Produkten zudem unterschiedlich hohe Transport- und Lagerkosten gegenüberstehen, handelt es sich um ein Mehrgüterstandortmodell.

3.1 BESONDERHEITEN

In WLP wird die Menge V der betrachteten Knoten bzw. potentiellen Standorte in drei Mengen ($V = V_A \cup V_U \cup V_B$) untergliedert. Dabei handelt es sich um die Angebots-, Bedarfs- und Umschlagsorte. In der Regel wird angenommen, dass $V_A \cap V_B = \emptyset$ gilt, also die Angebots- und Bedarfsorte disjunkt sind. Da Substratlieferanten (z.B. Maisfelder) gleichzeitig Abnehmer von Nebenprodukten (z.B. Gärresten als Dünger) sind, kann diese Annahme für das vorliegende Problem nicht getroffen werden.

Die Modellierung der „transportablen Güter“ erfolgt im Modell anhand der Menge C . Sie umfasst alle Güter die zwischen BGA und Substratlieferanten bzw. Nebenproduktachfragern ausgetauscht werden können. Anhand der Nebenbedingungen des Modells (vgl. Kapitel 2.2: Nebenbedingungen) wird festgelegt, welche Standorte in welchem Umfang Produkte anbieten bzw. nachfragen. Besteht kein Angebot bzw. keine Nachfrage in einem Knoten an einem Produkt $c \in C$ werden s_{ic} bzw. d_{ic} null gesetzt. Selbiges gilt für die BGA - also σ_{tc} bzw. $\delta_{tc} = 0$.

WLP werden oft mit binären Entscheidungsvariablen für die Standorteröffnung (z.B.: $y_{jt} \in \{0,1\}$) modelliert, da ausschließlich die Frage geklärt werden soll, ob ein Warehouse vom Typ $t \in T$ im Standort $j \in V$ errichtet wird oder nicht. Im vorliegenden Fall wird diese Ein-

schränkung aufgehoben. Vielmehr interessiert die Frage ob ggf. mehrere BGA eines spezifischen Typs an einem Standort eröffnet werden sollen. Für y_{jt} gilt demnach folgende Aussage getroffen: $y_{jt} \in \mathbb{Z} \wedge y_{jt} \geq 0$). Unterschiedliche reale Typen von BGA skalieren hinsichtlich ihrer Bedarfe und Angebote sowie der Kosten und Erlöse nicht linear. Eine „große“ BGA entspricht demnach nicht zwei „kleinen“ BGA. Es ist daher u.U. sinnvoll mehrere „kleine“ BGA bzw. „große“ und „kleine“ BGA gemeinsam an einem Standort zu errichten.

4 PROBLEMLÖSUNG

WLP sind ganzzahlige, kombinatorische Optimierungsprobleme und NP-schwer [vgl. Dom96 (S. 26)]. Es ist zudem derzeit kein Algorithmus bekannt, der mit polynomialem Rechenaufwand eine gegebene Lösung hinsichtlich ihrer Korrektheit prüfen kann. Das beschriebene Problem liegt demnach nicht in der Klasse NP und ist somit auch nicht NP-vollständig.

Bereits das Ermitteln einer Lösung ist i.d.R. aufwändig. Zum Erzeugen einer solchen ist die Anwendung heuristischer (z.B. Greedy-Algorithmen) als auch exakter (z.B. Branch-and-Bound Algorithmen) Verfahren möglich. Bei der Entwicklung entsprechender Lösungsverfahren ist das erklärte Ziel, den Lösungsraum durch Ausschließen von nachweislich suboptimalen Lösungen schnellstmöglich einzugrenzen.

4.1 EXAKTE VERFAHREN

Bei der exakten Lösung entsprechender Probleme wird grundsätzlich wie nachfolgend beschrieben vorgegangen. Es soll das stets wiederkehrende Prinzip verdeutlicht werden - dabei besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit (z.B. weitere Abbruchkriterien etc.) oder einen Formalismus. Hierfür sei auf die Literatur verwiesen [vgl. z.B. Dom96 (S. 26)]:

1. Relaxation des Ursprungsproblems, z.B. durch Entschärfen der Ganzzahligkeitsbedingung.

Somit entsteht ein lineares Optimierungsproblem (LP) welches sich effizient lösen lässt (z.B. mit dem Simplex-Algorithmus). Die so erhaltene, i.d.R. nicht ganzzahlige also unzulässige Lösung bildet die Ausgangsbasis für Schritt 2. Die untere bzw. obere Schranke des Zielfunktionswerts ist beim Erhalt einer unzulässigen Lösung in diesem Schritt (bei der ersten Durchführung) auf unendlich zu setzen.

2. Verzweigung/ Branch durch Fixierung von Entscheidungsvariablen.

Anhand der unzulässigen Lösung aus Schritt 1 wird eine einzelne Entscheidungsvariable, die

nicht ganzzahlig ist, auf die nächste ganze Zahl auf- bzw. abgerundet. Die Auswahl der Variablen genügt einer Verzweigungsregel. Die Fixierung wird als neue Nebenbedingung dem Ursprungsproblem hinzugefügt. Es erfolgt erneut Schritt 1 (Relaxierung) für das so gewonnene Teilproblem. Ist schließlich auf diese Weise eine erste, in allen Entscheidungsvariablen ganzzahlige Lösung des Ursprungsproblems gefunden, bildet der ermittelte Zielfunktionswert die aktuelle untere bzw. obere Schranke des Optimierungsproblems.

- Schrankenbildung/ Bound durch Berücksichtigung der im Schritt 2 gefundenen unteren bzw. oberen Schranke.

Ist der durch die Relaxierung des (Teil)Problems gefundene Zielfunktionswert schlechter als die bislang beste gefundene Schranke, braucht dieser Zweig nicht weiter untersucht zu werden. Die Schranke wird angepasst, sobald ein besserer Zielfunktionswert einer als zulässig erkannten Lösung gefunden wurde.

Kann keine Zielfunktionswertverbesserung mehr erfolgen, da entweder

- alle Entscheidungsvariablen den unrelaxierten Bedingungen genügen,
- die Relaxierung zu unzulässigen Lösungen führt,
- die relaxierten Lösungen schlechter sind als die bisher beste gefundene Schranke

endet das Verfahren. Es wird schnell deutlich, dass in Abhängigkeit der Auswahl einer nächsten nicht-ganzzahligen Variablen zur Fixierung bzw. der Auswahl des nächsten zu untersuchenden Teilproblems (Zweiges) das Verfahren bezogen auf das Problem hinsichtlich der Laufzeit mehr oder weniger effizient ist.

4.2 HEURISTIK

Aufgrund der Annahme, dass derzeit keine Algorithmen existieren, um das vorliegende Problem effizient zu lösen, wird nachfolgend ein heuristisches Verfahren zur Erzeugung einer Ausgangslösung angegeben. Eine solche, i.d.R. nicht optimale Lösung ist bezüglich der Nebenbedingungen zulässig. Mit der heuristisch ermittelten Schranke kann ein exaktes Verfahren bei der Suche nach der optimalen Lösung unterstützt werden.

Die Komplexität des BGA-Standortproblems resultiert im Wesentlichen aus zwei parallel zu lösenden Teilaspekten:

- Kombinatorische Fragestellung: Welche BGA werden auf welchen Knoten in welcher Anzahl eröffnet?
- Zuordnungsproblem: Welche BGA wird von wem mit Substrat beliefert und wer bekommt von welcher BGA welche Nebenprodukte?

Der nachfolgend im Pseudocode angegebene Algorithmus ermittelt unter Berücksichtigung aller Randbedingungen schnell eine zulässige Startlösung. Die Performanz wird durch die Reduktion der zuvor beschriebenen Komplexität erzielt, indem alle zu eröffnenden BGA im Median (distanzgewichteter Schwerpunkt) des Netzwerks verortet werden.

```

Eingabe: probleminstanz = netzwerk, konfiguration
Ausgabe: ziefunktionswert, y, chi, x

bgaListe = ladeBGATypen(konfiguration)
median = ermittleMedian(netzwerk)
ziefunktionswert = berechneZiefunktionswert(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)
            ziefunktionswert* = berechneZiefunktionswert(y*, chi*, x*)
        if ziefunktionswert* > ziefunktionswert:
            ziefunktionswert = ziefunktionswert*
            y = y*
            chi = chi*
            x = x*
            berechneLoesung()
    else:
        bgaListe = bgaListe - bga
        berechneLoesung()
    
```

Abbildung 1. Heuristik zur Generierung einer Startlösung

Das vorgeschlagene Verfahren entspricht einem Greedy-Algorithmus, da in jedem Durchlauf die den ersten Term der Zielfunktion am stärksten erhöhende BGA zur Eröffnung ausgewählt wird. Das Vorgehen erfolgt rekursiv, der Abbruch erfolgt, sobald die Liste der BGA Typen leer ist.

5 BEISPIEL

Nachfolgend wird, von einem einfachen Beispielszenario ausgehend, die Implementierung des Modells in einem Softwaredemonstrator vorgestellt. Insbesondere die Schritte der Parametrierung, der heuristischen Lösung und der Optimierung sowie die Ergebnisvisualisierung stehen hierbei im Fokus. Der Demonstrator ist in Python 2.7, einer universellen, interpretierten höheren Programmiersprache geschrieben, die sich nicht zuletzt aufgrund der Vielzahl frei verfügbarer Module hervorragend für das

Prototyping eignet. Insbesondere fanden folgende Module Anwendung bzw. wurden für den Demonstrator entsprechend modifiziert: *ElementTree*, *pygraph*, *pulp* und *pydot*. *ElementTree* ist ein XML-Parser. *Pygraph* dient der Organisation von Graphdaten und Anwendung von Graphalgorithmen. *Pulp* ist ein Modul zur Beschreibung mathematischer Optimierungsprobleme in Python und bietet Schnittstellen zu einer Vielzahl von closed- und open-source Solvern. *Pydot* ist ein ein Pythoninterface für die *Graphviz's Dot*-Sprache zur Visualisierung von Graphen.

Die Konfigurationen für ein Szenario, bestehend aus einem Netzwerk von Knoten (möglichen Standorten) und Kanten (Straßenverbindungen) sowie allen weiteren Modellparametern (z. B. Kostensätze und Erlöse), erfolgt in einem validierten XML-Dokument (vgl. Abbildung 2). Szenarien werden ausschließlich durch entsprechende Manipulation dieser Konfigurationsdatei definiert.

```
<?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">
  <xss:storagecosts>15.0</xss:storagecosts>
  <xss:transportcosts>5.0</xss:transportcosts>
  </xss:cargo>
  <!--Gekürzt (weitere cargo-Elemente)-->
  <xss:facilities>
  <xss:biogas-facility name="big">
  <xsb:demand name="maize">800.0</xsb:demand>
  <xsb:demand name="slurry">400.0</xsb:demand>
  <xsb:supply name="digestate">200.0</xsb:supply>
  <xsb:supply name="heat">100.0</xsb:supply>
  <xsb:costs>4000.0</xsb:costs>
  <xsb:returns>16000.0</xsb:returns>
  </xss:biogas-facility>
  <!--Gekürzt (weitere facility-Elemente)-->
  </xss:facilities>
  <xss:network>
  <xss:nodes>
  <xss:node name="1">
  <xss:supply name="maize">1400.0</xss:supply>
  </xss:node>
  <!--Gekürzt (weitere node-Elemente)-->
  </xss:nodes>
  <xss:edges>
  <xss:edge from="1" to="5">
  <xss:distance>1.0</xss:distance>
  </xss:edge>
  <!--Gekürzt (weitere edge-Elemente)-->
  </xss:edges>
  </xss:network>
</xss:configs>
```

Abbildung 2. Beispielkonfiguration in XML

Die nachfolgenden Erläuterungen beziehen sich auf das im XML-Dokument beschriebene Netzwerk (vgl. Abbildung 3) sowie alle weiteren im Dokument enthaltenen Parameterwerte (vgl. Abbildung 2). Das vollständig parametrisierte Optimierungsproblem wird durch den Demonstrator entsprechend der gewählten Solversyntax aufbereitet und übersetzt. Zur Lösung der durch das Beispiel

beschriebenen Probleminstanz wird CBC (COIN-OR branch and cut, ein Open Source Solver) verwendet.

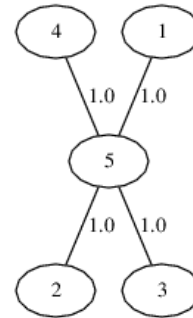


Abbildung 3. Einfaches Szenario

Das vergleichsweise einfache Szenario umfasst 80 Nebenbedingungen zzgl. der Nichtnegativitätsbedingungen und Wertebereichseinschränkungen. Die Ausgabe der Berechnung erfolgt im Demonstrator textbasiert mit Angaben zur Lösungsgüte (z.B. optimal, heuristisch, unlösbar), der benötigten Rechenzeit in Sekunden sowie zum erreichten Zielfunktionswert und der Belegung aller Entscheidungsvariablen. Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit und besseren Ergebnisinterpretation werden zusätzlich Grafiken generiert, welche die optimalen Transportströme und eröffneten BGA im Netzwerk visualisieren (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1. Ergebnisse des Beispielszenarios

Heuristik	CBC-Solver
$F(y, \chi, x) = 9250.0$	$F(y, \chi, x) = 10500.0$

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Für das beschriebene Problem der Standorteröffnung von Biogasanlagen ist ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem, ähnlich einem Warehouse Location Problem, angegeben worden. Auftretende Besonderheiten, wie die Errichtung mehrerer (unterschiedlicher) BGA an einem Standort sowie die gleichzeitig als Quelle und Senke von Stoff- und Energieströmen auftretenden Lieferanten, sind im Modell formalisiert worden. Die

Komplexität des beschriebenen Problems aufgrund des unbekanntes und im Allgemeinen sehr großen Lösungsraums legt den Einsatz von heuristischen Strategien der Problemlösung nahe. Eine solche Strategie ist in Form eines Greedy-Algorithmus angegeben worden. Eine mit diesem Verfahren gefundene untere Schranke des Zielfunktionswerts wird zur Eingrenzung des Lösungsraums bei der Suche nach der optimalen Lösung verwendet.

Die durch das Modell gewonnenen Erkenntnisse sind durch Beispielszenarien aus der Praxis weiter zu validieren. Insbesondere ist zu prüfen, ob alle aus logistischer Sicht relevanten Randbedingungen für die Standorteröffnung berücksichtigt wurden. Zudem ist anhand von Szenarienanalysen mit vergleichsweise kleinen Parameterschwankungen (z.B. Kostensätze, Substratmengen) die Robustheit gefundener Lösungen, also die Sensitivität der Entscheidungsvariablen des Modells gegenüber Änderungen zu untersuchen. Aufgrund des zu erwartenden hohen Rechenaufwands bei der Lösung größerer Probleme ist zu prüfen bis zu welcher Größe der Probleminstanzen optimale Lösungsstrategien anwendbar bleiben. In diesem Zusammenhang ist die vorgeschlagene Heuristik weiterzuentwickeln, um die Abweichung vom optimalen Zielfunktionswert zu verringern. Nicht zuletzt die Allgemeingültigkeit des hier vorgeschlagenen Modells bietet die Möglichkeit seiner Übertragung auf weitere logistische Standortentscheidungsprobleme (z.B. Maschinenstandorte in Produktionsstätten).

LITERATUR

- [Dom96] Domschke, Drexel: *Logistik: Standorte*. München, R. Oldenbourg Verlag GmbH, 4. Auflage, 1996. – ISBN 3-486-23586-9
- [FLO62] Floyd R. W.: *Algorithm 97: Shortest Path*. In: Commun. ACM, Jg. 5 Heft 6, S.345
- [KAL10] Kaltschmitt M. et al: *Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung*. Gülzow, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 5. Auflage, 2010. ISBN 3-00-014333-5

Dipl.-Wi.-Ing. Hannes Hahne, Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Professur für Technische Logistik, Technische Universität Dresden.

Hannes Hahne wurde 1984 in Freital geboren. Zwischen 2004 und 2011 studierte er Wirtschaftsingenieurwesen an der Technischen Universität Dresden.

Adresse: Professur für Technische Logistik, Technische Universität Dresden, Münchner Platz 3, 01062 Dresden
Tel: +49 351 463-32537, Fax: +49 351 463-35499,
E-Mail: hannes.hahne@tu-dresden.de