



Harald Uhlemair

# Optimierung des Produktions- und Distributionssystems von Bioenergiedörfern



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



# Optimierung des Produktions- und Distributionssystems von Bioenergiedörfern





# Optimierung des Produktions- und Distributionssystems von Bioenergiedörfern

von  
Harald Uhlemair



**Cuvillier Verlag Göttingen**  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2012  
Zugl.: Göttingen, Univ., Diss., 2012

978-3-95404-172-5

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2012  
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen  
Telefon: 0551-54724-0  
Telefax: 0551-54724-21  
[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2012  
Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-95404-172-5



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Produktion und Logistik der Georg-August-Universität Göttingen. Im Forschungsprojekt “Nachhaltige Nutzung von Energie aus Biomasse im Spannungsfeld von Klimaschutz, Landschaft und Gesellschaft” des Interdisziplinären Zentrums für Nachhaltige Entwicklung und der Professur für Produktion und Logistik konnte ich mein Forschungsvorhaben konkretisieren und umsetzen.

Ganz herzlich möchte ich mich bei meiner akademischen Lehrerin Frau Prof. Dr. Jutta Geldermann dafür bedanken, dass ich meine eigenen Vorstellung umsetzen konnte, dafür ihre Unterstützung fand und konstruktive Anregungen bekam. Herrn Prof. Dr. Lutz M. Kolbe danke ich für die kritische Durchsicht meiner Arbeit als Zweitgutachter und Herrn Prof. Dr. Achim Spiller für den Vorsitz bei der Disputation. Mein besonderer Dank gilt Frau PD Dr. Anke Daub, Herrn Dr. Mark-Christoph Körner und meinem Zimmerkollegen Ingo Karschin für die fachliche Unterstützung und die humorvolle Zusammenarbeit.

Mein Interesse an der Entwicklung und Anwendung von mathematischen Methoden zur Planungs- und Entscheidungsunterstützung wurde in meiner Studienzeit an der Universität Augsburg geweckt. Ich möchte mich an dieser Stelle ausdrücklich bei Herrn Prof. em. Dr. Otto Opitz und seinen damaligen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Mathematische Methoden der Wirtschaftswissenschaften bedanken. Die sehr gute fachliche Ausbildung und die hervorragende Betreuung der Studenten durch den Lehrstuhl waren die Hauptbeweggründe, warum mich mein Weg in die Welt der Forschung und Lehre führte.

Ganz besonders möchte ich mich natürlich bei all meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen für ihre Unterstützung und die schöne und lustige Zeit in Göttingen bedanken. Gemeinsame Bergtouren in den Allgäuer Alpen, wie z.B. auf den Säuling in Füssen, den Sipplinger Kopf im Gunzesrieder Tal oder auf die Hochplatte in Halblech bei Füssen, Musikeinlagen mit Klarinette und Tenorhorn oder die anhaltend gute Stimmung am Lehrstuhl beschreiben nur einen Bruchteil der Dinge, an die ich mich gerne erinnere. In diesem Sinne, vielen Dank an Meike Schmehl, Genoveva Uskova, Carsten Kempka, Nico Michalak, Prof. Dr. Manfred Zilling, Dr. Lars-Peter Lauen, Dr. Sumetee Wongsak, Katharina Amann, Martina Hesse, Susanne Wiedenmann, Jan Friedrich, Fabian Rénatus, Henning Gössling, Heti Mulyati, Nils Lerche, Sebastian Ludorf, Sybille Dühring, Mohammad Sa-degh Taskhiri, Volker Ruwisch, Karol Granoszewski, André Wüste und Jens Ibendorf.

Mit einem dicken Kuss bedanke ich mich bei meiner Frau Sarah für ihre unermüdliche Unterstützung und ihren unendlichen Humor. Danke!

*Harald*





# Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>iii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>Formelverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Ausgangssituation und Problemstellung . . . . .	1
1.2. Zielsetzung und Lösungsweg . . . . .	2
<b>2. Rahmenbedingungen für Bioenergiedörfer</b>	<b>5</b>
2.1. Bioenergiedörfer . . . . .	5
2.2. Bioenergie . . . . .	8
2.3. Gesetze und Verordnungen . . . . .	11
<b>3. Nahwärmenetze als Distributionssystem</b>	<b>15</b>
3.1. Grundlagen der Nahwärmeversorgung . . . . .	16
3.2. Konstruktion von Nahwärmenetzen . . . . .	19
3.2.1. Ökonomische Bewertung von Wärmekunden und Netzteilstücken . .	22
3.2.2. Graphentheoretische Beschreibung des Optimierungsproblems . . .	29
3.3. Mathematische Modellformulierung . . . . .	33
3.3.1. Netzwerkkonstruktionsprobleme . . . . .	37
3.3.2. Optimierungsmodell . . . . .	39
3.4. Modellanwendung auf ein ausgewähltes Nahwärmenetz . . . . .	41
3.4.1. Optimiertes Nahwärmenetz im Fallbeispiel . . . . .	41
3.4.2. Sensitivitätsanalyse . . . . .	42
<b>4. Biogasanlagen als Produktionssystem</b>	<b>53</b>
4.1. Grundlagen der Biogasproduktion . . . . .	54
4.1.1. Verfahren der Biogaserzeugung . . . . .	56
4.1.2. Anlagenaufbau . . . . .	57
4.1.3. Fermenter . . . . .	60
4.1.4. Blockheizkraftwerk (BHKW) . . . . .	63
4.1.5. Gärrest . . . . .	64
4.2. Bereitstellung von Energiepflanzen . . . . .	66
4.2.1. Kosten der Erntelogistik . . . . .	69
4.2.2. Substratkosten . . . . .	72





4.3. Ökonomische Bewertung von Biogasanlagen . . . . .	77
4.3.1. Investition in die Anlagentechnik und Peripherie . . . . .	79
4.3.2. Anlagebezogene Auszahlungen . . . . .	81
4.3.3. Einspeisevergütung . . . . .	81
4.3.4. Kapitalwert und Sensitivitätsanalyse . . . . .	83
<b>5. Produktions- und Distributionssystem eines Bioenergiedorfes</b>	<b>93</b>
5.1. Simultanes Optimierungsmodell . . . . .	94
5.2. Modellanwendung - Bioenergiedorf Dinkelhude . . . . .	100
5.3. Modellerweiterung um eine zusätzliche Wärmequelle . . . . .	108
<b>6. Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	<b>115</b>
<b>7. Zusammenfassung</b>	<b>123</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>127</b>
<b>A. Datentabellen - Biogasanlagen, Wärmekunden, Netzteilstücke</b>	<b>139</b>
<b>B. Mosel Xpress Quellcode</b>	<b>151</b>
B.1. Nahwärmenetz . . . . .	151
B.2. Nahwärmenetz und Biogasanlage . . . . .	152



# Tabellenverzeichnis

3.1. Kapitalwerte der Szenarien 1 bis 4 . . . . .	47
4.1. Durchschnittliche Zusammensetzung von Biogas . . . . .	55
4.2. Vergärungsverfahren . . . . .	57
4.3. Ertragsabhängige Erntelogistikkosten von Silomais . . . . .	70
4.4. Erntelogistikkosten von Silomais . . . . .	70
4.5. Entfernungsabhängige Substratkosten . . . . .	73
4.6. Energiegehalt der Biomasse . . . . .	74
4.7. Anlagenleistung und Biomassekennzahlen . . . . .	77
4.8. Annahmen zur Berechnung der anlagebezogenen Auszahlungen . . . . .	81
4.9. Einspeisevergütung nach dem EEG 2009 . . . . .	82
4.10. Einspeisevergütung nach dem EEG 2012 . . . . .	83
A.1. Haushalte in Oberhude - Kennwerte . . . . .	139
A.2. Netzteilstücke in Oberhude - Kennwerte . . . . .	140
A.3. Kennwerte je Anlagenleistung . . . . .	141
A.4. Grundvergütung ohne Bonuszahlungen (EEG 2009) . . . . .	142
A.5. Grundvergütung + NawaRo-Bonus (EEG 2009) . . . . .	143
A.6. Grundvergütung + NawaRo-Bonus + Gülle-Bonus (EEG 2009) . . . . .	144
A.7. Grundvergütung ohne zusätzliche Einsatzstoffvergütungen (EEG 2012) . . . . .	145
A.8. Grundvergütung + Einsatzstoffvergütung I (EEG 2012) . . . . .	146
A.9. Grundvergütung + Einsatzstoffvergütung II (EEG 2012) . . . . .	147
A.10. Haushalte in Dinkelhude - Kennwerte . . . . .	148
A.11. Netzteilstücke in Dinkelhude - Kennwerte . . . . .	149
A.12. Fallstudie Dinkelhude – Kapitalwerte . . . . .	150





# Abbildungsverzeichnis

2.1. Entwicklung Biogasanlagenbestand . . . . .	7
2.2. Typische Energiebereitstellungskette von Biomasse . . . . .	10
3.1. Beispielhafte Jahreslinie der Wärmeleistung . . . . .	16
3.2. Mögliche Hauptverteilungssysteme für Nahwärmenetze . . . . .	17
3.3. Steiner-Problem . . . . .	19
3.4. Biogasanlage, Wärmekunden und möglicher Netzverlauf . . . . .	22
3.5. Kostenoptimales Nahwärmenetz . . . . .	41
3.6. Szenario 2: Optimales Nahwärmenetz . . . . .	45
3.7. Szenario 3: Optimales Nahwärmenetz . . . . .	46
3.8. Szenario 4: Optimales Nahwärmenetz . . . . .	47
4.1. Verfahren der Biogaserzeugung . . . . .	56
4.2. Prozessschritte der Biogasgewinnung . . . . .	58
4.3. Aufbau einer landwirtschaftlichen Biogasanlage . . . . .	58
4.4. Verfahren der Biogaserzeugung . . . . .	60
4.5. Zweikulturnutzung . . . . .	67
4.6. Rotation der Energiepflanzen auf den Ackerflächen . . . . .	68
4.7. Erntelogistik von Silomais . . . . .	69
4.8. Entfernungsabhängige Erntekosten von Silomais . . . . .	71
4.9. Einzugsbereich des Energiepflanzenanbaus . . . . .	74
4.10. Zahlungsströme bei der Investition in Biogasanlagen . . . . .	78
4.11. Zahlungsströme der Investition in Biogasanlagen . . . . .	84
4.12. Kapitalwerte für Biogasanlagen (EEG 2009) . . . . .	85
4.13. Kapitalwerte für Biogasanlagen (EEG 2012) . . . . .	85
4.14. Kapitalwerte für kleine Gülleanlagen (EEG 2009) . . . . .	86
4.15. Kapitalwerte für kleine Gülleanlagen (EEG 2012) . . . . .	87
4.16. Sensitivitätsanalyse der Kapitalwerte (EEG 2009) . . . . .	88
4.17. Sensitivitätsanalyse der Kapitalwerte (EEG 2012) . . . . .	88
4.18. Kapitalwerte in Abhängigkeit des Gülleanteils . . . . .	89
5.1. Optimierte Nahwärmeversorgung in Dinkelhude . . . . .	103
5.2. Optimierte Nahwärmenetzverläufe und Anlagenleistungen . . . . .	106
5.3. Beispielhafte Jahresverlaufslinie der Wärmeleistung . . . . .	111
6.1. Multikriterielle Entscheidungsunterstützung für Bioenergiekonzepte . . . . .	117



# Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
AHP	Analytic Hierachy Process
ASUE	Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und Umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.
BauGB	Baugesetzbuch
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
BHKW	Blockheizkraftwerk
BioAbfV	Bioabfallverordnung
BiomasseV	Biomasseverordnung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d	Tag
DBFZ	Deutsches Biomasse Forschungszentrum
DIN	Deutsches Institut für Normung
DüV	Düngeverordnung
DüMV	Düngemittelverordnung
EEG	Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz
el	elektrisch
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité
etc.	et cetera
FM	Frischmasse
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
h	Stunde
ha	Hektar
km	Kilometer
km <sup>2</sup>	Quadratkilometer
kWh	Kilowattstunde
kWh <sub>el</sub>	Kilowattstunden (elektrisch)
kWh <sub>th</sub>	Kilowattstunden (thermisch)
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz



kW	Kilowatt
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
LP	Linear Program
m	Meter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
MADM	Multi Attribute Decision Making
MAUT	Multi Attribute Utility Theory
MIP	Mixed Integer Program
MODM	Multi Objective Decision Making
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
oTS	organische Trockensubstanz
PJ	Petajoule
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations
Srm	Schüttraummeter
t	Tonne
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TierNebG	Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz
TierNebV	Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsverordnung
th	thermisch
TS	Trockensubstanz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Vol.	Volumen
UBA	Umweltbundesamt
z.B.	zum Beispiel

# Formelverzeichnis

$\alpha_s$ = Energiegehalt der Biomasse $s, s = 0, \dots, r$	[kWh/t]
$A$ = Menge aller Pfeile (Rohrleitungsstücke) $e_{ij}$	
$A'$ = Menge aller Pfeile $e_{ij}$ des Steinerbaumes	
$Af$ = Ackerfläche	[ha]
$b_s$ = verfügbare Menge an Biomasse $s, s = 0, \dots, r$	[t/a]
$b_1$ = Menge von Mais und Getreidekorn im Substrat	[t/a]
$b_0$ = Güllemenge im Substrat	[t/a]
$B$ = verfügbare Menge Holz	[Srm/a]
$BA_t(l_k)$ = anlagebezogene Auszahlungen	[€/a]
$\beta$ = Eigenwärmebedarf der Biogasanlage zur Fermenterbeheizung	[%]
$c_e(e_{ij})$ = Kapitalwert von Netzteilstück $e_{ij}$	[€]
$c_h(h_p)$ = betriebsunabhängiger Teil des Kapitalwertes des Holzheizwerkes	[€]
$c_l(l_k)$ = Kapitalwert der Anlagenleistung $l_k$ der Biogasanlage	[€]
$c_v(v_i)$ = Kapitalwert von Haushalt $v_i$	[€]
$c_w(h_p, F)$ = betriebsabhängiger Teil des Kapitalwertes des Holzheizwerkes	[€]
$d$ = einmalige Netzanschlussgebühr	[€]
$d_i^{max}$ = Wärmespitzenlast von Haushalt $v_i$	[kW <sub>th</sub> ]
$d_i^{th}$ = Jahreswärmebedarf von Haushalt $v_i$	[kWh <sub>th</sub> /a]
$\delta$ = Betriebsstunden der Anlage	[h/a]
$EW$ = Endwertmethode	[€]
$E_t(l_k)$ = Stromeinspeisevergütung nach EEG	[€/a]
$\eta_{el}$ = elektrischer Wirkungsgrad der Biogasanlage	[%]
$\eta_{th}$ = thermischer Wirkungsgrad der Biogasanlage	[%]
$\epsilon$ = Wärmeverlust im Holzheizwerk	[%]
$f$ = einmalige Finanzeinlage	[€]
$f_{ij}$ = Flussvariable	$f_{ij} \in \mathbb{R}$
$F(l_k, f(t))$ = thermische Energie vom Holzheizwerk	[kWh <sub>th</sub> /a]
$FM_s$ = verfügbare Frischmasse (FM) von Biomasse $s$	[t]
$g$ = Grundgebühr (netto) der Nahwärmeversorgung	[€/a]
$\gamma$ = Wärmeverlust im BHKW und Wärmenetz	[%]
$h$ = Auszahlungen für die Wärmeübergabestation	[€]





$h_p$ = thermische Leistung der Holzheizwerkes $p$	[kW <sub>th</sub> ]
$I(l_k)$ = Investition in eine Biogasanlage mit der Leistung $l_k$	[€]
$\kappa$ = Anteil der Ackerfläche an der Gesamtfläche	[%]
$k_{ij}$ = Anschaffung und Installation von Netzteilstück $e_{ij}$	[€/m]
$K$ = Hilfsvariable	$K \in \{0, 1\}$
$Kf$ = gesamte Kreisfläche des Biomasseeinzugsgebietes	[km <sup>2</sup> ]
$KW$ = Kapitalwertmethode	[€]
$L_{el}$ = Installierbare elektrische Leistung mit Biomasse	[kW <sub>el</sub> ]
$l_i$ = Auszahlungen für den Hausanschluss von Objekt $v_i$	[€/m]
$l_k$ = elektrische Leistung der Biogasanlage $k$	[kW <sub>el</sub> ]
$\lambda$ = Energiegehalt des Holzes	[kWh/Srm]
$m$ = Wartungspauschale	[%/a]
$M_s$ = Methangehalt der oTS der Biomasse $s$	[m <sup>3</sup> /t oTS]
$n_{ij}$ = Länge des Netzteilstückes $e_{ij}$	[m]
$\nu$ = Biomasse Lagerverluste	[%]
$N$ = Hilfsvariable	$N \in \{0, 1\}$
$oTs_s$ = Anteil oTS in der TS der Biomasse $s$	[%]
$p_e$ = Wärmeeinkaufspreis (netto)	[€/kWh <sub>th</sub> ]
$p_{e,krit.}$ = kritischer (maximaler) Wärmeeinkaufspreis (netto)	[€/kWh <sub>th</sub> ]
$p_v$ = Wärmeverkaufspreis (netto)	[€/kWh <sub>th</sub> ]
$\phi$ = Wärmeverlust im Wärmenetz	[%]
$\psi$ = Anteil des BHKW an der (Wärme-)Spitzenlastabdeckung	[%]
$q$ = Wartungspauschale für das Nahwärmenetz	[2%/a]
$Q_p$ = Variable für die thermische Leistung des Holzheizwerkes	$Q_p \in \{0, 1\}$
$r$ = interner Kalkulationszinssatz	[%]
$R$ = Kreisradius des Biomasseanbauggebietes	[km]
$s$ = staatliche Subvention pro Wärmekunde	[ €]
$S$ = staatliche Subvention für Nahwärmenetze	[ €/m]
$t$ = Planungsperiode, $t = 1, \dots, T$	[a]
$\tau$ = Energiegehalt von Methan	[kWh/m <sup>3</sup> ]
$Ts_s$ = Anteil TS in der FM der Biomasse $s$	[%]
$u$ = Verwaltungsaufwand	[ €/a]
$u_l(l_k)$ = eingesetzte Menge Biomasse bei Anlagenleistung $l_k$ des BHKW	[t/a]
$V$ = Menge aller Knoten $v_i$	
$V'$ = Menge aller Knoten $v_i$ des Steinerbaumes	
$VA_t(l_k)$ = rohstoffbezogene Auszahlungen	[€/a]

---

$\varrho$	= Betriebsdauer des Holzheizwerkes	[h/a]
$w_{it}$	= Wärmebedarf von Objekt $v_i$ zum Zeitpunkt $t$	[kWh/a]
$X_i$	= Variable von Haushalt $v_i$	$X_i \in \{0, 1\}$
$Y_{ij}$	= Variable von Netzteilstück $e_{ij}$	$Y_{ij} \in \{0, 1\}$
$Z_k$	= Variable der elektrischen Leistung des BHKW	$Z_k \in \{0, 1\}$