

1. Einleitung

1.1. Ausgangssituation und Problemstellung

Im Dezember 2009 hat die Weltgemeinschaft in Kopenhagen das langfristige Ziel formuliert, den Temperaturanstieg auf der Erdoberfläche auf maximal 2 Grad Celsius im Vergleich zu den vorindustriellen Werten zu begrenzen. Offiziell anerkannt wurde dieser Wert in einer Sitzung der Vereinten Nationen bei der Weltklimakonferenz in Cancún (Mexiko) Ende 2010 (BMU, 2011c). Die Mitglieder des Europäischen Parlaments und des Rates der Europäischen Union sind im Jahr 2009 zu dem Ergebnis gekommen, dass zur Einhaltung der 2-Grad-Grenze die weltweiten Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um mindestens 50 % gegenüber dem Jahr 1990 gesenkt werden müssen (EU, 2009a). In der dafür verfassten Entscheidung verpflichtet sich die Europäische Union zu einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen gegenüber dem Jahr 1990 in Höhe von mindestens 20 % bis zum Jahr 2020. Zusätzlich wurde optional eine 30 prozentige Reduzierung der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020 definiert, falls andere Industrienationen ähnliche Ziele zur Emissionsminderung verfolgen (EU, 2009a).

Im Jahr 2010 machten energiebedingte Treibhausgasemissionen ca. 83,5 % der gesamten Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente) aus (UBA, 2012). Industrieprozesse und landwirtschaftliche Aktivitäten waren jeweils für knapp 8 % dieser Emissionen verantwortlich. Im Bereich der Abfallwirtschaft und der Produkt- und Lösemittelverwendung lagen die Anteile bei ungefähr 1,3 bzw. 0,2 % (UBA, 2012). Nach dem Kyoto-Protokoll hat sich Deutschland verpflichtet, den Treibhausgasausstoß zwischen 2008 und 2012 um 21 % unter das Niveau von 1990 zu senken. Laut Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) sind die Treibhausgasemissionen in Deutschland im Jahr 2010 gegenüber dem Basisjahr 1990 bereits um fast 25 % zurückgegangen (BMU, 2012a). Bis zum Jahr 2020 soll eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen von mindestens 40 % erreicht werden. Dazu soll der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch im Jahr 2020 bei mindestens 18 % liegen und danach stufenweise auf 60 % im Jahr 2050 erhöht werden (BMU, 2011a). Den Kommunen kommt bei der Umsetzung dieser Klimaschutzziele eine besondere Bedeutung zu. Städte und Gemeinden sind nicht nur große Grundstücks- und Gebäudeeigentümer, Energieverbraucher und wichtige Genehmigungsinstanzen, sondern können über den Aufbau von Stadtwerken oder Bioenergiedörfern auch selbst Anlagenbetreiber von Energieerzeugungsanlagen für erneuerbare Energien sein.

Das Bioenergiedorf Jühnde in Südniedersachsen gilt als Pilotprojekt unter den Bioenergiedörfern in Deutschland. Seit 2005 wird ein Großteil der Dorfbewohner über ein eigenes Nahwärmenetz mit Wärme versorgt und der in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugte Strom in das bestehende Stromnetz eingespeist. Zur Unterstützung der ökonomischen Planung



in Bioenergiedörfern kann bisher nur auf Ergebnisse von Machbarkeitsstudien oder auf Beispielrechnungen für ausgewählte Anlagenleistungen zurückgegriffen werden, so dass bislang nur mehr oder weniger effiziente und wirtschaftlich vorteilhafte energetische Biomassenutzungskonzepte umgesetzt werden. Berechnungen dieser Art sind beispielsweise in (FNR, 2004, 2010c) dargestellt. Technische und ökonomische Bewertungen von Bioenergie-Konversionspfaden sind z.B. in (Müller-Langer u. a., 2008a; FNR, 2010a; Koch, 2009; Postel u. a., 2009) beschrieben. In (Meyer, 2010; Döring u. a., 2010; Toews, 2009; Amon u. a., 2008; Mitterleitner u. a., 2007) wird das Thema Biomasselogistik behandelt. Die Frage der Standortwahl von Biogasanlagen wurde in (Plata, 2008; Delzeit, 2008) bearbeitet. Eine multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme und eine übersichtliche Darstellung der Forschung im Bereich der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung im Energiebereich ist in (Oberschmidt, 2010) zu finden. Weitere Details zur Entscheidungsunterstützung im Energiebereich finden sich beispielsweise in (Wang u. a., 2009; Zhou u. a., 2006; Diakoulaki u. a., 2005). Modellbasierte Optimierungsrechnungen für die simultane Planung der Anlagen zur Strom- und Wärmeproduktion (z.B. im Blockheizkraftwerk einer Biogasanlage) und der Wärmeverteilung (z.B. über ein Nahwärmenetz) in Bioenergiedörfern sind in der Literatur bisher nicht bekannt. Aus diesem Grund soll in dieser Arbeit mit Hilfe von mathematischen Methoden ein quantitatives ökonomisches Planungsmodell für Bioenergiedörfer entwickelt werden.

1.2. Zielsetzung und Lösungsweg

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines ökonomischen mathematischen Optimierungsmodells, das auf Basis der verfügbaren Menge an Biomasse und der Wünsche der Dorfbevölkerung folgende Komponenten des Energieversorgungssystems simultan ermittelt:

- die Anlagenleistung der Bioenergieanlage,
- die an ein Nahwärmenetz anzuschließenden Wärmekunden (mit und ohne Berücksichtigung der Anschlusswünsche) und
- den Streckenverlauf des Rohrleitungssystems.

Eine simultane Betrachtung der Energieerzeugungsanlage (Produktionssystem) und des Wärmenetzes (Distributionssystem) ist aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeit der beiden Systeme notwendig. Die Größe des Wärmenetzes bzw. die darin zu transportierende Menge an thermischer Energie hängt von der Anlagenleistung der Energieerzeugungsanlage ab. Die Anlagenleistung wird im Gegenzug durch die Größe des Wärmenetzes nach unten begrenzt. Grundsätzlich hängen beide Systeme von der zur Verfügung stehenden Menge an Biomasse und den Anschlusswünschen der Dorfbevölkerung ab.

Im zweiten Kapitel werden die Rahmenbedingungen der regionalen Energiebereitstellung aus Biomasse beschrieben. Dabei werden die Aspekte Bioenergiedörfer, Bioenergie und gesetzliche Rahmenbedingungen der Bioenergieerzeugung in Deutschland erläutert.

In Kapitel 3 werden die technischen Grundlagen von Nahwärmenetzen erklärt und die Wärmekunden und Rohrleitungsteilstücke als entscheidungsrelevante Komponenten des Nahwärmenetzes definiert. Für diese Komponenten werden die der Betreibergesellschaft entstehenden jährlichen Zahlungsströme ermittelt. Für die Betreibergesellschaft wird in der gesamten Arbeit angenommen, dass sie als Genossenschaft das Nahwärmenetz inklusive der Energieerzeugungsanlage betreibt, dass alle Wärmekunden und Biomasse liefernden Landwirte Genossenschaftsanteile erwerben und dass sich die Genossenschaftsanteile mehrheitlich im Besitz der Dorfbevölkerung befinden. Anhand der Zahlungsströme werden Kapitalwerte zur ökonomischen Bewertung der Rohrleistungsstücke und der potenziellen Wärmekunden berechnet. Die Kapitalwerte der Wärmekunden und der Rohrleistungsstücke werden als Parameter im Optimierungsmodell verwendet. Da bezüglich der Komponenten des Nahwärmenetzes ja/nein Entscheidungen (Anschluss ja/nein) zu treffen sind und thermische Energie zwischen der Wärmequelle und den Wärmesenken fließt, wird mit binären und reellwertigen Variablen ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell für Nahwärmenetze entwickelt und angewendet.

Bei der Modellanwendung im dritten Kapitel werden Lösungen für unterschiedliche Anschlussbereitschaften der Dorfbevölkerung an das Nahwärmenetz ermittelt. Zusätzlich wird untersucht, inwieweit eine von den Wärmekunden zu zahlende Anschlussgebühr gesenkt oder der von der Betreibergesellschaft des Nahwärmenetzes an den Energieerzeuger zu zahlende Wärmeeinkaufspreis steigen darf, ohne dass eine Investition in das Nahwärmenetz aus ökonomischen Gründen abgelehnt werden sollte. In diesem Kapitel wird ausschließlich das Nahwärmenetz betrachtet. Bis zur simultanen Betrachtung des Produktions- und Distributionssystems in Kapitel 5 wird davon ausgegangen, dass die thermische Energie von einem nicht näher bestimmten Energieerzeuger bezogen werden kann.

In Kapitel 4 werden die Grundlagen der Biogaserzeugung beschrieben. In der Arbeit wird angenommen, dass die Landwirte von Bioenergiedörfern die Biomasselieferanten sind. Landwirtschaftliche Biogasanlagen, die überwiegend Gülle und nachwachsende Rohstoffe als Substrat verwenden, stehen im Fokus der Arbeit. Auf energetische Potenziale von kommunalen, industriellen und landwirtschaftlichen Reststoffen und auf Landnutzungskonkurrenzen beim Energiepflanzenanbau wird in den Schlussfolgerungen in Kapitel 6 eingegangen. Ein Großteil des Kapitels 4 wird darauf verwendet, die Biomasselogistik bei der Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen zu untersuchen und daraus die Biomassepreise der ortsansässigen Landwirte in Abhängigkeit der Transportentfernungen abzuleiten. Genauso wie für die Wärmekunden und die Rohrleistungsstücke, werden für 23 unterschiedliche Anlagenleistungen der Blockheizkraftwerke von Biogasanlagen die der Betreibergesellschaft entstehenden Zahlungsströme exemplarisch ermittelt und Kapitalwerte berechnet. Kleinere Anlagen mit einer elektrischen Leistung unter 100 Kilowatt werden separat betrachtet. Mit einer Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen unterschiedlicher Biomassepreise, Einspeisevergütungen, Gülleanteile und Wirkungsgrade des Blockheizkraftwerkes auf die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen untersucht. Die Kapitalwerte für unterschiedliche Anlagenleistungen werden als Parameter im Optimierungsmodell in Kapitel 5 verwendet.



In Kapitel 5 wird auf Basis des Optimierungsmodells von Nahwärmenetzen ein simultanes Optimierungsmodell für das Produktions- und Distributionssystem von Bioenergiedörfern entwickelt und auf ein Beispieldorf angewendet. Neben den Haushalten und Rohrleitungsstücken wird die Anlagenleistung des Blockheizkraftwerkes als binäre Entscheidungsvariable definiert. In der Zielfunktion wird die Maximierung des Gesamtkapitalwertes als Ziel definiert. Die ermittelten Kapitalwerte der Haushalte, Rohrleitungsstücke und Anlagenleistungen bilden die Parameter der Entscheidungsvariablen im Modell. Bei der Anwendung werden unterschiedliche Anschlussbereitschaften der Dorfbevölkerung an das Nahwärmenetz berücksichtigt. Zusätzlich wird untersucht, welche Konsequenzen sich für die Optimierungsergebnisse ergeben, wenn ein Mindestwärmenutzungsgrad für die Biogasanlage vorgegeben wird. In dem verwendeten Beispiel muss auf Basis des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) ein Mindestwärmenutzungsgrad in Höhe von 60 % eingehalten werden, da keine Direktvermarktung des Stromes stattfindet und die vorhandene Güllemenge weniger als 60 Masseprozent im Substrat ausmacht (§27 EEG 2012). Im Anschluss an die Anwendung des Modells wird zusätzlich zur Biogasanlage der Einsatz einer Holzhackschnitzelanlage im Modell berücksichtigt.

In Kapitel 6 werden Schlussfolgerungen für das Modell und für Bioenergiedörfer erörtert. Im Ausblick wird dargestellt, wie das Modell mit multikriteriellen Modellen der Entscheidungsunterstützung kombiniert werden kann. Zusätzlich wird beschrieben, wie das entwickelte Modell im Zusammenhang mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen eingesetzt werden könnte. In Kapitel 7 wird die Arbeit zusammengefasst.

2. Rahmenbedingungen für Bioenergiedörfer

Zur Festlegung des Untersuchungsrahmens wird in Abschnitt 2.1 zunächst das Konzept von Bioenergiedörfern beschrieben. Da in dieser Arbeit Biogasanlagen im Fokus stehen, wird zusätzlich auf die Entwicklung des Anlagenbestandes von Biogasanlagen und auf den Ackerflächenbedarf im Zusammenhang mit der Biogaserzeugung in Deutschland eingegangen. In Abschnitt 2.2 wird der Begriff Bioenergie definiert, die energetische Bereitstellungskette von Biomasse dargestellt und der Anteil von Bioenergie am gesamten Endenergieverbrauch in Deutschland beschrieben. In Abschnitt 2.3 wird auf die gesetzlichen Rahmenbedingungen der Bioenergieerzeugung in Deutschland eingegangen.

2.1. Bioenergiedörfer

In Bioenergiedörfern wird ein Großteil des Strom- und Wärmebedarfes durch Energie aus Biomasse (Bioenergie) gedeckt. Eine einheitliche Definition und eindeutige Richtlinien für Bioenergiedörfer existieren nicht. Im Leitfadenswege zum Bioenergiedorf von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) werden Bioenergiedörfern beispielsweise folgende Eigenschaften zugeordnet (FNR, 2008):

- Der Strombedarf des Dorfes wird zu 100 % durch Bioenergie gedeckt.
- Der Wärmebedarf des Dorfes wird mindestens zu 50 % durch Bioenergie gedeckt. Die Energie sollte zur Effizienzsteigerung möglichst durch Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt werden.
- Die Energieanlagen befinden sich mindestens zu 50 % im Eigentum der Wärmekunden und Biomasse liefernden Landwirte.

Im Gegensatz zur obigen Definition von Bioenergiedörfern wird in dieser Arbeit nicht verlangt, dass der Strombedarf eines Bioenergiedorfes komplett und der Wärmebedarf zu mindestens 50 % durch Bioenergie gedeckt wird. Da die Strom- und Wärmeversorgung eines Dorfes auch durch eine Kombination unterschiedlicher erneuerbarer Energien (z.B. Windkraft, Photovoltaik, Biogas, Geothermie und Solarthermie) erfolgen kann, wird auf die Vorgabe eines Mindestdeckungsgrades der Energieversorgung durch Bioenergie verzichtet.

Das zu entwickelnde Optimierungsmodell soll auf Basis der vorhandenen Menge an Biomasse und unter Berücksichtigung der Anschlusswünsche der Dorfbewohner die Anlagen-



und Netzkonfiguration ermitteln können. Mindestgrenzen hinsichtlich der Bioenergieversorgung des Dorfes können problemspezifisch und unter den gegebenen Rahmenbedingungen über zusätzliche Nebenbedingungen im Modell berücksichtigt werden, bleiben im Folgenden aber grundsätzlich unberücksichtigt.

Das südlich von Göttingen angesiedelte Bioenergiedorf Jühnde ist eines der ersten Bioenergiedörfer und gilt als Pilotprojekt. In Jühnde wird im Blockheizkraftwerk einer Biogasanlage durch Kraft-Wärme-Kopplung Strom und Wärme für die Dorfbewohner erzeugt. Der Strom wird in das bestehende Stromnetz eingespeist und die Wärme wird mit Hilfe eines Wärmenetzes zu den Häusern transportiert. Im September des Jahres 2005 wurden die ersten Häuser mit Wärme versorgt. Heute sind ca. 70 % aller Häuser im Ort an das Wärmenetz angeschlossen (FNR, 2008).¹ In der Biogasanlage wird mehr als doppelt so viel Strom produziert, wie in Jühnde tatsächlich verbraucht wird (FNR, 2008). Da nach dem EEG die insgesamt eingespeiste Menge an Strom aus erneuerbaren Energien vergütet wird, stellt dies kein Problem dar. Für die Energieerzeugung werden auf ca. 320 Hektar Energiepflanzen (Weizen, Roggen, Triticale, Mais, Sonnenblumen) angebaut, was ungefähr einem Drittel der Jühnder Feldmark entspricht. Zusätzlich werden jährlich ca. 9.000 m³ Gülle und 1.000 t (Schüttraummeter) Holzhackschnitzel zur Energieerzeugung eingesetzt. Mit den Holzhackschnitzeln wird ein zusätzlich zur Biogasanlage installiertes Holzheizwerk mit einer thermischen Leistung in Höhe von 550 kW_{th} betrieben. Das Holzheizwerk wird zusätzlich zur Biogasanlage betrieben, wenn die Leistung der Biogasanlage nicht ausreicht, um die Wärmenachfrage im Wärmenetz zu decken. Damit die Wärmeversorgung zu jedem Zeitpunkt sichergestellt werden kann, auch bei technischen Problemen der Biogasanlage oder des Holzheizwerkes, wurde zusätzlich ein Heizölspitzenlastkessel mit einer thermischen Leistung von 1,6 MW_{th} installiert. Als Rechtsform für die Betreibergesellschaft, die die Bioenergieanlage und das Wärmenetz betreibt, wurde in Jühnde die Genossenschaft gewählt. Alle Wärmeabnehmer und Biomasse liefernden Landwirte sind an der Genossenschaft beteiligt. Der Anteil nicht ortsansässiger Personen an der Genossenschaft ist auf 25 % begrenzt. Im Leitfadens Wege zum Bioenergiedorf (FNR, 2008) sind weitere Details zur Rechtsformwahl für Bioenergiedörfer beschrieben.

Laut (BMELV, 2012) ist die Anzahl sogenannter Bioenergiedörfer in Deutschland von ca. 100 im Jahr 2010 auf jetzt ca. 250 gestiegen (Stand: Februar 2012). Das mit Beteiligung der Dorfbevölkerung in einer Genossenschaft betriebene Bioenergiekonzept in Jühnde bildet den Ausgangspunkt für das in dieser Arbeit zu entwickelnde ökonomische Optimierungsmodell. Bei der Modellierung bildet eine Biogasanlage mit Kraft-Wärme-Kopplung die zentrale Anlage zur Erzeugung von Strom und Wärme. Zur Spitzenlastabdeckung wird eine Holzhackschnitzelanlage verwendet. Der Strom wird in das bestehende Stromnetz eingespeist und nach dem EEG vergütet. Die im Blockheizkraftwerk der Biogasanlage entstehende Wärme wird über ein Nahwärmenetz zu den Gebäuden im Dorf transportiert.

Die Anzahl der in Deutschland im Betrieb befindlichen Biogasanlagen und die insgesamt installierte Leistung ist in den letzten zehn Jahren stark gestiegen. Abbildung 2.1 zeigt diese Entwicklung.

¹http://www.bioenergiedorf.de/con/cms/front_content.php?idcat=13, Zugriff 03.03.2012

Von den insgesamt ca. 5.905 im Jahr 2010 betriebenen Anlagen wurden 45 als Biomethan-Einspeiseanlagen geführt (FBioGas, 2011).

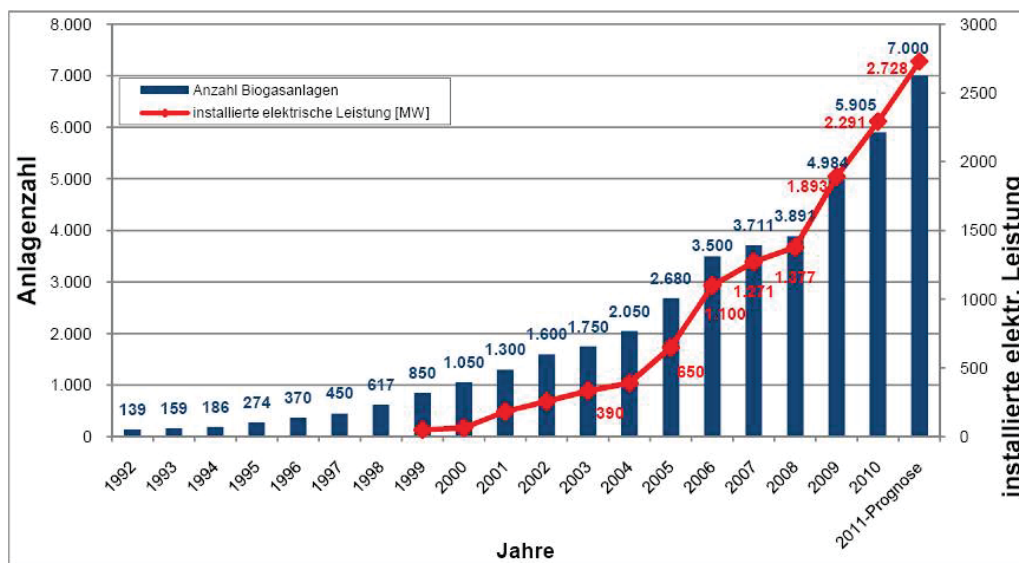


Abbildung 2.1.: Biogasanlagen - Anlagenzahl und installierte elektrische Leistung in Deutschland (FBioGas, 2011)

In den meisten bestehenden Anlagen in Deutschland werden überwiegend Energiepflanzen als Substrate verwendet. Gemäß den Ergebnissen des Biogas-Messprogramms II der Jahre 2006 bis 2008, lag der mittlere Masseanteil der nachwachsenden Rohstoffe an den eingesetzten Substraten bei ca. 63 % (FNR, 2010a; Weiland, 2009). Wirtschaftsdünger machten in etwa 37 % der Substrate aus. In Deutschland werden auf ca. 1,7 Mio. Hektar Energiepflanzen für die Treibstoff- und Biogasproduktion angebaut, was ca. 10 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche entspricht. Für Biodiesel wird auf ca. 942.000 Hektar Raps und für die Ethanolproduktion auf ca. 226.000 Hektar Getreide angebaut. Nachwachsende Rohstoffe für die Biogaserzeugung werden auf ca. 530.000 Hektar angebaut (Schütte, 2010). Den größten Anteil an den verwendeten nachwachsenden Rohstoffen besitzt Silomais mit ca. 80 %. Darauf folgt Grassilage mit etwa 9 % und Ganzpflanzensilage (GPS) mit ca. 8 % (BMU, 2008a). Aufgrund der veränderten Vorgaben in der neuen Fassung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes, die zum 1. Januar 2012 in Kraft trat, kann die zukünftige Entwicklung des Substrateinsatzes nur schwer vorhergesagt werden. Der Einsatz von Gülle bei der Biogaserzeugung wird im Vergleich zum Energiepflanzenanbau über höhere Vergütungssätze und einer besonderen Förderung von kleinen Gülleanlagen unterstützt (§27b Absatz 1 EEG 2012). Diese kleinen Gülleanlagen dürfen eine elektrische Leistung von maximal 75 kW aufweisen und der Anteil von Gülle im Substrat muss mindestens bei 80 % liegen. Grundsätzlich darf bei allen Anlagen der Anteil von Mais (Ganzpflanze) und Getreidekorn einschließlich Corn-Cob-Mix und Körnermais sowie Lieschkolbenschrot einen Masseanteil im Substrat von 60 % nicht übersteigen (§27 Absatz 5 EEG).

In modernen Blockheizkraftwerken von Biogasanlagen können Wirkungsgrade von bis zu 85 % erreicht werden, wenn die bei der Stromerzeugung anfallende Wärme durch



Kraft-Wärme-Kopplung ideal genutzt wird (Mühlenhoff und Dittrich, 2011). Während der Strom komplett in das bestehende Stromnetz eingespeist und nach dem EEG vergütet werden kann, muss die im Blockheizkraftwerk entstehende thermische Energie über ein zu installierendes Wärmenetz zu den Wärmeabnehmern transportiert werden. Eine Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität und Einspeisung in ein vorhandenes Erdgasnetz wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Ist in einem potenziellen Bioenergiedorf ein Anschluss an das Erdgasnetz möglich, stellt die Aufbereitung und Einspeisung des Biogases durchaus eine Option dar. Die Biogasaufbereitung ist jedoch immer noch mit hohen Kosten verbunden, wodurch aus wirtschaftlichen Gründen bzw. zur Nutzung von Größendegressionseffekten große Anlagenleistungen notwendig werden (Urban u. a., 2009). Nach (Urban, 2009) ist die dezentrale Verstromung von Biogas, wie sie in dieser Arbeit betrachtet wird, vor allem dann interessanter, wenn vor Ort eine Wärmenutzung und Verwendung von Wirtschaftsdüngern (Gülle oder Festmist) möglich ist. Demzufolge soll in dieser Arbeit auf Basis der zur Verfügung stehenden Menge an Biomasse ein Optimierungsmodell entwickelt werden, das die Leistung der Energieerzeugungsanlage und gleichzeitig den Umfang der lokalen Wärmeversorgung bzw. die Länge des Nahwärmenetzes ermittelt. Die Dorfbewohner stellen die potenziellen Wärmekunden der Bioenergieanlage dar und die Landwirte des Dorfes beliefern die Anlage mit Energiepflanzen und Gülle.

Prinzipiell kann man unterscheiden, ob die nachgefragte Wärmemenge oder die nachgefragte Strommenge die Anlagenleistung des Blockheizkraftwerkes in der Biogasanlage vorrangig bestimmt. Die Stromerzeugung tangiert die Haushalte nur indirekt, da die erzeugte Elektrizität in das Stromnetz eingespeist wird. Dadurch steigt zwar die Menge des auf Basis des erneuerbaren Energieträgers Biomasse erzeugten Stromes bei der Stromversorgung in Deutschland, ansonsten ändert sich für die Haushalte des Bioenergiedorfes allerdings nichts. Sie beziehen ihre Elektrizität wie bisher. Bei der Wärmeversorgung der Haushalte hingegen ist die Verlegung eines Rohrleitungssystems für den Wärmetransport notwendig und die Wärmeabnehmer verzichten zukünftig auf ihre bisher verwendete Heizanlage. Aufgrund der Tatsache, dass die Haushalte für die Wärmeversorgung des Dorfes weitreichende Entscheidungen hinsichtlich ihrer zukünftigen Art der Wärmeversorgung, der Verlegung des Rohrleitungssystems und der vertraglichen Gestaltung der Wärmeabnahme zu treffen haben, muss ein Optimierungsmodell für Bioenergiedörfer in der Lage sein, neben einer stromgeführten Anlage auch eine wärmegeführte Anlage zu optimieren. Würde bei der Projektplanung beispielsweise vorgegeben werden, dass alle oder zumindest alle anschlussbereiten Haushalte von der Bioenergieanlage mit Wärme versorgt werden sollen, dann könnte man von einer wärmegeführten Anlage sprechen. Bei einer stromgeführten Anlage muss das Modell ohne Berücksichtigung der Anschlusswünsche die ökonomisch optimale Anlagenleistung und Wärmenetzstruktur ermitteln können.

2.2. Bioenergie

Bioenergie entsteht auf Basis des Energieträgers Biomasse. Biomasse kann als gespeicherte Sonnenenergie bezeichnet werden, da mit Hilfe der Photosynthese die solare Strahlung in organische Materie umgewandelt wird. Nach (Kaltschmitt u. a., 2009) bezeichnet der Begriff Biomasse alle Stoffe organischer Herkunft (kohlenstoffhaltige Materie) und beinhaltet demzufolge



- die Phyto- und Zoomasse (Pflanzen und Tiere),
- die damit verbundenen Reststoffe (z.B. tierische Exkreme),
- abgestorbene (noch nicht fossile) Phyto- und Zoomasse (z.B. Stroh) und
- alle Stoffe, die z.B. durch eine technische Umwandlung und/oder eine stoffliche Nutzung entstehen (z.B. Schlachthofabfälle, organischer Hausmüll, Pflanzenöl, Papier, Alkohol).

Biomasse kann in Primär- und Sekundärprodukte eingeteilt werden (Kaltschmitt u. a., 2009).

- Primärprodukte beinhalten die gesamte Pflanzenmasse. Sie entstehen durch die direkte Nutzung der Sonnenenergie (Photosynthese).
- Sekundärprodukte entstehen durch den Umbau organischer Substanz in höheren Organismen (z.B. Tiere). Beispiele sind die gesamte Zoomasse, Klärschlamm und Exkreme (z.B. Gülle und Festmist).

In Anlehnung an (Kaltschmitt u. a., 2009) sind in Abbildung 2.2 typische Bereitstellungsketten für Energie aus Biomasse (Bioenergie) dargestellt.

Die fett markierten Pfeile und Kästchen zeigen die in dieser Arbeit näher betrachtete Bereitstellungskette für die Strom- und Wärmeerzeugung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung. In Kapitel 5 wird neben der Biogasanlage zusätzlich ein Holzheizwerk als Spitzenlastanlage betrachtet, bei dem Holz als fester Brennstoff zur Wärmeerzeugung eingesetzt wird. Da die Biogasgewinnung und -nutzung in Bioenergie-dörfern im Fokus dieser Arbeit steht, ist der Pfad für die energetische Nutzung von Holz in Abbildung 2.2 nicht explizit hervorgehoben. Eine ökobilanzielle Bewertung von Biogasanlagen unter Berücksichtigung der niedersächsischen Verhältnisse ist in (Schmehl u. a., 2012) dargestellt. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass alle fünf untersuchten landwirtschaftlichen Biogasanlagen hinsichtlich der Kategorien Treibhausgaspotenzial, fossiler Ressourcenverbrauch und kumulierter Energieaufwand (Primärenergieverbrauch der Biogasanlagensysteme) günstiger abschneiden als das Vergleichssystem, das Strom mit fossilen Energieträgern erzeugt. Bei den Kategorien Versauerung und Eutrophierung schneiden die betrachteten Biogasanlagen allerdings ungünstiger ab als das Vergleichssystem.

Bei der Verbrennung von Biomasse werden biogene Festbrennstoffe (z.B. Holz und Stroh) verbrannt und damit Wärme und Strom erzeugt. Strom kann in Biomasseheizkraftwerken durch konventionelle Dampfprozesse erzeugt werden (Kaltschmitt u. a., 2008). Alternative Technologien sind der Organic-Rankine-Cycle-Prozess (ORC) oder Stirling-Motoren (FNR, 2007). In thermochemischen Verfahren wird Biomasse mit Hilfe von thermischer Energie umgewandelt (Kaltschmitt und Thrän, 2007). Dabei werden biogene Festbrennstoffe unter bestimmten Bedingungen (Temperatur und Druck) mit Oxidationsmitteln

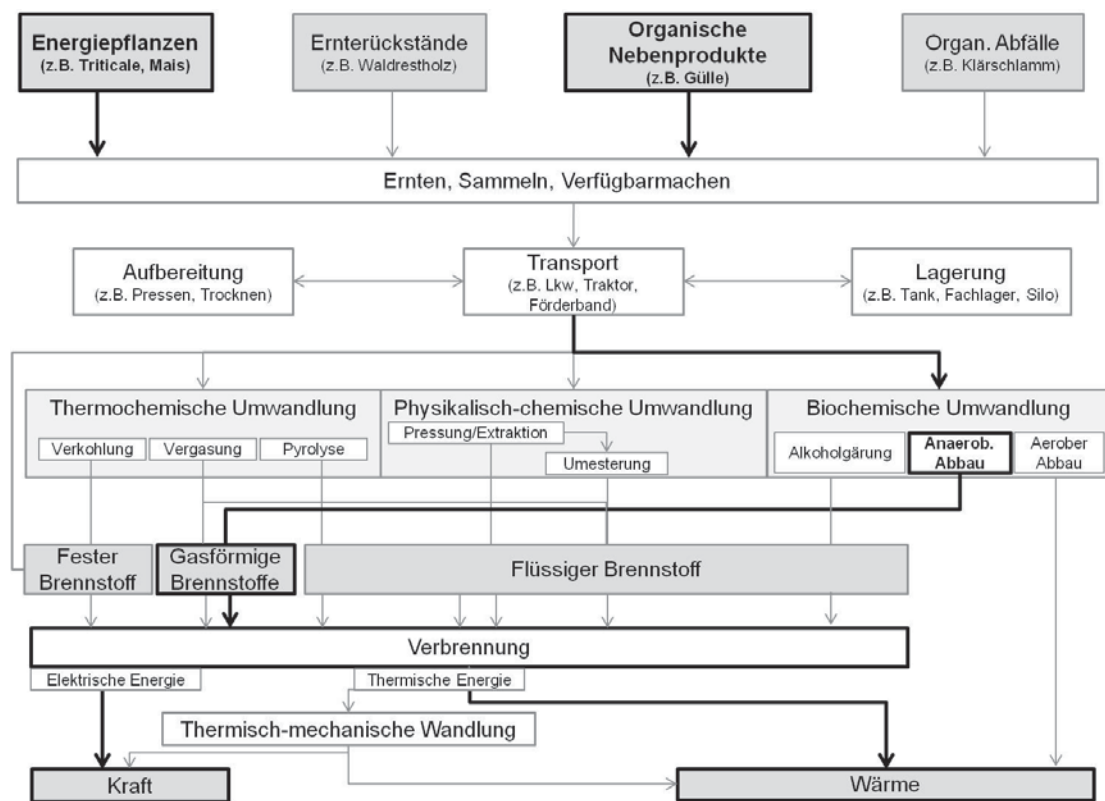


Abbildung 2.2.: Typische Energiebereitstellungskette von Biomasse (Kaltschmitt u. a., 2009)

(z.B. Wasser und Luft) versetzt und dadurch in feste, flüssige und gasförmige Energieträger umgewandelt. Das bei der Vergasung entstehende Gas kann als Brenngas genutzt oder durch Synthese beispielsweise in Fischer-Tropsch-Diesel oder Synthetic Natural Gas (SNG) umgewandelt werden. Bei physikalisch-chemischen Verfahren wird aus ölhaltiger Biomasse, wie z.B. Raps, Pflanzenöl erzeugt. Dieses Öl kann entweder als Öl verwendet oder durch Umesterung als Biodiesel energetisch genutzt werden. Bei biochemischen Verfahren wird Biomasse in biologischen Prozessen mit Hilfe von bestimmten Mikroorganismen abgebaut. Bei der Alkoholgärung wird Biomasse zu Ethanol umgewandelt, welches nach weiteren Verarbeitungsschritten als Alkohol verwendet oder konventionellem Otto-Kraftstoff beigemischt werden kann. Ein aerober Abbau von Biomasse findet bei der Kompostierung statt. Die in dieser Arbeit betrachtete anaerobe Vergärung von Biomasse wird in Kapitel 4 beschrieben. Im Folgenden wird dargestellt, wie die festen, flüssigen und gasförmigen biogenen Brennstoffe aus Biomasse zur Energiebereitstellung in Deutschland beitragen.

Wärme aus erneuerbaren Energien wird überwiegend durch Bioenergie gedeckt. Im Jahr 2011 lag der Anteil von Energie aus Biomasse an der insgesamt erzeugten Wärme aus erneuerbaren Energien in etwa bei 91 % (BMU, 2012b). Ungefähr 67 % der Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien entstand auf Basis von biogenen Festbrennstoffen (z.B. Holz, Getreide, Stroh). Biogas und flüssige biogene Brennstoffe (z.B. Pflanzenöl, Biodiesel) ka-

men auf Anteile von 11,9 und 5,6 %. Der biogene Anteil des Abfalls machte ca. 5,7 % aus. Klär- und Deponiegas kamen zusammen auf ca. 1 %. Die restlichen 8 % teilen sich in die Bereiche Solarthermie und Geothermie auf.

Mit Biogas, biogenen Festbrennstoffen, biogenen flüssigen Brennstoffen und dem biogenen Teil des Abfalls wurden in Deutschland im Jahr 2011 ca. 29 % des Stromes aus erneuerbaren Energien erzeugt (BMU, 2012b). Biogas kam auf einen Anteil von 14,4 %, gefolgt von biogenen Festbrennstoffen und flüssigen biogenen Brennstoffen mit Anteilen von 9,3 bzw. 1,1 %. Der biogene Anteil des Abfalls kam auf einen Anteil von ca. 4,1 %. Der Anteil von Bioenergie am Strom aus erneuerbaren Energien lag in etwa bei 28,9 %. Klär- und Deponiegas kamen zusammen auf etwa 1,4 %. Die restlichen ungefähr 71 % des Stromes aus erneuerbaren Energien teilen sich auf in die Bereiche Windenergie mit ca. 38,1 %, Wasserkraft mit ca. 16 % und Photovoltaik mit etwa 15,6 %.

In Deutschland lag der Anteil von Strom aus erneuerbaren Energien am gesamten Bruttostromverbrauch im Jahr 2010 bei ca. 17,1 % (BMU, 2011c). Der Bruttostromverbrauch besteht aus der gesamten national produzierten Strommenge abzüglich der Ausfuhren und zuzüglich der Einfuhren. Im selben Jahr wurden ungefähr 10,2 % des Endenergieverbrauchs an Wärme durch erneuerbare Energiequellen gedeckt. Der Anteil erneuerbarer Energien am Kraftstoffverbrauch lag bei etwa 5,8 %. Insgesamt wurden damit ca. 11,3 % des gesamten Endenergieverbrauchs (Strom, Wärme, Mobilität) durch erneuerbare Energien gedeckt. Strom aus erneuerbaren Energien wurde in erster Linie durch Windenergie erzeugt. Der Anteil von Windenergie am Bruttostromverbrauch lag im Jahr 2010 bei etwa 6,2 %, gefolgt von Wasserkraft und Biogas mit ca. 3,4 und 2,4 %. Photovoltaik und biogene Festbrennstoffe kamen auf Anteile von jeweils ungefähr 1,9 %. Wärme aus erneuerbaren Energien wurde in erster Linie durch den Einsatz von Festbrennstoffen erzeugt. Durch den Einsatz von Festbrennstoffen in privaten Haushalten wurden ca. 5,1 % des Endenergieverbrauchs an Wärme in Deutschland gedeckt. Biogas kam auf einen Anteil von ca. 0,5 % an der gesamten Wärmeerzeugung. Solarthermie und Geothermie kamen auf Anteile von jeweils ca. 0,4 %. Der biogene Anteil des Abfalls machte etwa 0,8 % der gesamten Wärmeerzeugung aus.

2.3. Gesetze und Verordnungen

Da mit Hilfe des Energieträgers Biomasse sowohl Kraftstoffe hergestellt als auch Energie erzeugt werden kann, existiert im Zusammenhang mit Bioenergie eine Vielzahl an Gesetzen und Verordnungen. Aus diesem Grund wird nachfolgend eine Auswahl an wichtigen gesetzlichen Bestimmungen zusammengefasst beschrieben, die insbesondere die Verbrennung von Festbrennstoffen und die Erzeugung von Biogas betreffen. Gesetze und Verordnungen im Bereich Biokraftstoffe und Gasversorgung werden nicht weiter betrachtet. Weitergehende Beschreibungen gesetzlicher Bestimmungen für den Bereich Bioenergie sind beispielsweise in (FNR, 2011, 2010c; Schneichel, 2009; FNR, 2010b) oder im Internet auf der Homepage der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) zu finden.²

²<http://www.bioenergie.de/rahmenbedingungen/gesetzeslage/>, Zugriff am 20.03.2012



Im Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) und den mit diesem Gesetz verbundenen Verordnungen (BImSchV) werden unter anderem Umweltwirkungen durch die Verbrennung von fester Biomasse geregelt. Im BImSchG werden für unterschiedliche Brennstoffe bestimmte Anlagenmindestgrößen vorgegeben, durch die möglichst wenig Schadstoffe in die Umwelt gelangen sollen (FNR, 2007). Bei der Biogaserzeugung sind beim Anlagenbau und vor allem beim Umgang mit dem Gärrest zahlreiche weitere rechtliche Rahmenbedingungen zu beachten.

Der Bau einer Biogasanlage wird entweder nach dem Baurecht BauGB (BauGB, 2004) und den Bauordnungen der Länder oder dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) genehmigt (BImSchG, 2011). In der vierten Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) sind Auswahlkriterien bestimmt, welches Genehmigungsverfahren zum Tragen kommt (BImSchV, 2010). Vereinfacht gesprochen kann man sagen, dass “kleinere” Anlagen nach dem Baurecht und “größere” Anlagen nach dem BImSchG genehmigt werden. Ein Unterscheidungsmerkmal bezieht sich auf die täglich eingesetzte Abfallmenge in der Anlage. Beträgt die täglich eingesetzte Menge an Abfällen nach dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz KrWAbfG (KrWAbfG, 1986) mehr als zehn Tonnen, dann ist zur Genehmigung der Anlage das Verfahren nach dem BImSchG anzuwenden. Ob Gülle als Abfall gilt, wird in den Bundesländern unterschiedlich ausgelegt (FNR, 2004). Teilweise wird bei landwirtschaftlichen Kofermentationsanlagen für die Zuordnung zu einem Genehmigungsverfahren auch das insgesamt eingesetzte Substrat (Abfall, Wirtschaftsdünger und nachwachsende Rohstoffe) als Bemessungsgröße herangezogen, da durch die Verwendung von Gülle im Substrat die gesamte Substratmenge als Abfall zu behandeln sei. Die abweichende Auslegung der rechtlichen Rahmenbedingungen kann zu einer Ungleichbehandlung von Biogasanlagen im Genehmigungsverfahren führen (FNR, 2004). Im Wesentlichen sind die Güllelagerkapazität, die Wärmeleistung des BHKW, die Art und der Umfang von verwendeten Abfällen und eine mögliche Kopplung der Biogasanlage an die Errichtung einer genehmigungspflichtigen Tierhaltungsanlage Kriterien für eine Zuordnung zum Baurecht oder Bundesimmissionsschutzgesetz. In (FNR, 2011) sind die Unterscheidungsmerkmale und die Grenzwerte übersichtlich dargestellt und zusammengefasst. Zur Veranschaulichung der beschriebenen rechtlichen Rahmenbedingungen für den Bau und Betrieb von Biogasanlagen bietet (Schneichel, 2009) eine exemplarische Zuordnung der erforderlichen Genehmigungen zu fünf ausgewählten Modellanlagen.

In Abhängigkeit der bei der Biogaserzeugung eingesetzten Substrate existieren unterschiedliche rechtliche Rahmenbedingungen für den Gärrest. Das Düngemittel-, Hygiene- und Abfallrecht liefern die rechtliche Grundlage der Gärrestverwendung. Wie alle Düngemittel sind Gärreste der Düngeverordnung (DüV) unterstellt und dürfen nach der DüV nur dann ausgebracht werden, wenn sie die Anforderungen der Düngemittelverordnung (DüMV) erfüllen. Das Hygienerecht kommt zum Tragen, falls der Gärrest tierische Nebenprodukte oder Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft beinhaltet. Die Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 (EU, 2009b), die Hygienevorschriften für tierische Nebenprodukte beinhaltet, die nicht für den menschlichen Verzehr bestimmt sind, das Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz TierNebG (TierNebG, 2004) und die Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsverordnung TierNebV (TierNebV, 2006) bilden zusammen das zu beachtende Hygiene-

recht. Werden Bioabfälle in einer Biogasanlage verwendet, unterliegt der Gärrest der Bioabfallverordnung BioAbfV (BioAbfV, 1998; E-BioAbfV, 2011). Abfälle mit tierischen Bestandteilen unterliegen in erster Linie dem Hygienerecht. In (FNR, 2010c) ist eine Auflistung der Schadstoffgrenzwerte und der Hygienevorschriften der oben genannten Verordnungen dargestellt.

Gesetzliche Rahmenbedingungen zur Förderung von Energie aus Biomasse sind im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), im Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (EEWärmeG) und im Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) festgeschrieben. Das erklärte Ziel des EEG ist die Ermöglichung einer nachhaltigen Energieversorgung im Interesse des Klima- und Umweltschutzes (EEG, 2012). Es regelt den vorrangigen Anschluss von Anlagen aus erneuerbaren Energien und Grubengas an die Elektrizitätsversorgungsnetze und legt Vergütungssätze für die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien fest (§2 EEG 2012). Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung soll in Deutschland bis zum Jahr 2020 auf mindestens 35 % und danach stufenweise auf mindestens 80 % bis zum Jahr 2050 erhöht werden (§2 EEG 2012). In der Biomasseverordnung (BiomasseV) wird unter anderem geregelt, welche Stoffe im Erneuerbare-Energien-Gesetz EEG als Biomasse gelten, welche energetischen Referenzwerte für die darin aufgeführte Biomasse existieren und welche Umweltauflagen bei der Erzeugung von Strom aus Biomasse einzuhalten sind (§1 BiomasseV).

Das Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (EEWärmeG) hat das Ziel, den Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte bis zum Jahr 2020 auf 14 % zu erhöhen (EEWärmeG, 2008). Das EEWärmeG schreibt eine anteilige Deckung des Wärme- und Kältebedarfes von Gebäuden durch erneuerbare Energien vor (§3 EEWärmeG). Der Prozentsatz der notwendigen Deckung hängt von der eingesetzten Energieform ab. Bei der Verwendung von solarer Strahlungsenergie muss der Wärme- und Kältebedarf mindestens zu 15 % aus Sonnenenergie gedeckt werden (§5 EEWärmeG). Bei gasförmiger Biomasse beträgt der Mindestanteil 30 %, bei flüssiger und fester Biomasse liegt die Mindestgrenze bei 50 %. Bei der Verwendung von Geothermie bzw. Umweltwärme aus Luft und Wasser liegt der Mindestanteil ebenfalls bei 50 % (§5 EEWärmeG). Der Einsatz von Anlagen zur Nutzung von Abwärme bzw. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen), Maßnahmen zur Energieeinsparung und eine Nutzung von Fernwärme oder Fernkälte sind sogenannte Ersatzmaßnahmen, die nach §7 EEWärmeG zur Erfüllung der Nutzungspflicht von erneuerbaren Energien angerechnet werden. Eine Kombination unterschiedlicher erneuerbarer Energien und Ersatzmaßnahmen ist möglich (§8 EEWärmeG). Das EEWärmeG gilt für Gebäude mit einer Nutzfläche von mehr als 50 Quadratmetern, für die der Bauantrag bzw. die Bauanzeige nach dem 1. Januar 2009 eingereicht wurden.

Das Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz, KWKG) regelt die Abnahme und Vergütung von Kraft-Wärme-Kopplungsstrom und verfolgt das Ziel, die Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland auf 25 % der Gesamtstromerzeugung zu erhöhen (§1,2 KWKG). Mit dem Gesetz sollen KWK-Anlagen, Wärmenetze und die Einführung von

Brennstoffzellen-Anlagen gefördert werden. Das KWKG bezieht sich auf Wärmenetze und KWK-Anlagen, die auf Basis von Steinkohle, Braunkohle, Abfall, Abwärme, Biomasse, gasförmigen oder flüssigen Brennstoffen betrieben werden (§2 KWKG). Strom, der nach §16 des EEG vergütet oder auf Basis von §33 des EEG direkt vermarktet wird, fällt nicht in den Anwendungsbereich des KWKG.

Nachdem in diesem Kapitel das Konzept von Bioenergiedörfern beschrieben, Bioenergie im Kontext der Energieversorgung in Deutschland betrachtet und die gesetzlichen Rahmenbedingungen der Bioenergieerzeugung in Deutschland erläutert wurden, werden im nachfolgenden Kapitel Nahwärmenetze für Bioenergiedörfer näher betrachtet. Dabei werden die technischen Grundlagen von Nahwärmenetzen beschrieben und ein mathematisches Optimierungsmodell entwickelt und angewendet.