

# Optimale Standorte von Biogasanlagen – eine Multikriterienanalyse mit GIS

Diplomarbeit

Institut für Geographie, Gießen 2008

Vorgelegt von:  
Adam Plata  
Diezstr. 7  
35390 Gießen



**Justus-Liebig-Universität  
Fachbereich 07 Mathematik und Informatik, Physik, Geographie  
Institut für Geographie**

Senckenbergstraße 1  
35390 Gießen

---

Erstgutachter: Prof. Dr. Christian Diller

Zweitgutachter: Dr. Wolf-Dieter Erb

## **Danksagung**

Die Diplomarbeit ist der „krönende Abschluss“ meines Geographiestudiums. Sie stellte mich vor eine Menge interessanter Herausforderungen.

In allen Phasen haben mich Menschen mit ihrem Engagement und ihrem Fachwissen unterstützt. Von daher gilt mein Dank all denen, die zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr. Diller, danke ich an dieser Stelle für seine fachliche Unterstützung während des gesamten Zeitraums der Arbeit.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Sheridan und Herrn Dr. Toews für ihre tatkräftige Unterstützung nicht nur in Form von fachlichen Anregungen. Beide waren inspirierende Ideengebern. Insbesondere Herrn Sheridan verdanke ich zudem, dass die Arbeit im Rahmen des Transferbereichs geschrieben werden konnte. Herzlichen Dank!

Ein weiterer Dank geht an Herrn Prof. em. Dr. Dr. h.c. Kuhlmann, der sowohl fachliche als auch organisatorische Impulse gesetzt hat.

Auch Herrn Reiher vom Transferbereich des Sonderforschungsbereichs 299 der Justus-Liebig-Universität Gießen sei an dieser Stelle für sein organisatorisches Engagement sehr gedankt.

Ein großes Dankeschön geht an meinen Ansprechpartner von der HSE Herrn Böss, der nicht nur ein kompetenter Interviewpartner war, sondern auch bei der Datenbeschaffung geholfen hat. Ohne Herrn Böss wäre die Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

In besonderer Weise danke ich Herrn Dr. Christiansen und Herrn Dr. Erb, die mir sowohl meinen Hochschulortswechsel erleichtert, zahlreiche berufliche Perspektiven eröffnet als auch viele nützliche Lehrinhalte auf sehr einprägsame Art und Weise vermittelt haben.

Zu größtem Dank bin ich meiner Freundin Maren Zabel verpflichtet. Sie war mir während der gesamten Zeit der Diplomarbeit in organisatorischer Hinsicht, aber auch emotional eine große Stütze.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern Barbara und Georg Plata, die mir das Studium ermöglicht und mich in meinen Bestrebungen während des Studiums zu jeder Zeit unterstützt haben.

---

II. Abbildungsverzeichnis .....	iii
III. Tabellenverzeichnis .....	v
IV. Abkürzungsverzeichnis.....	vi
Vorwort.....	1
1 Einleitung.....	2
1.1 Problemstellung und Zielsetzung.....	3
1.2 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit .....	4
2 Grundlagen der Biogaserzeugung .....	5
2.1 Biogasanlagen.....	6
2.2 Substrate der Biogaserzeugung .....	8
2.3 Verfahrensabläufe und Funktionsweise von Biogasanlagen.....	11
2.4 Gasverwertung.....	13
2.5 Vor- und Nachteile der Biogasnutzung .....	16
2.6 Rahmenbedingungen der Biogaserzeugung.....	20
2.7 Aktuelle Entwicklungen auf dem Biogasmarkt .....	26
3. Theoretischer Hintergrund: Industrielle Standortlehre und optimale Standortwahl .....	29
3.2 Optimale Standortwahl von Biogasanlagen .....	33
3.3 GIS und Multikriterienanalysen .....	34
4 Methodik und Softwareeinsatz .....	41
4.1 Kriterienfestlegung .....	42
4.2 Methodenentwicklung.....	43
5 Analyse und Berechnungen .....	55
5.1 Beschreibung der Untersuchungsregion.....	55
5.2 Datengrundlage.....	57
5.3 Multikriterienanalysen.....	69
5.3.1 Restriktive Faktoren .....	71
5.3.2 Szenario „verschärfte Rahmenbedingungen Bioerdgas“ .....	73
5.3.3 Szenariovariation „verschärfte Rahmenbedingungen Bioerdgas“ .....	81
5.3.4 Szenario „verschärfte Rahmenbedingungen konventionelle BGA“ .....	84

---

5.3.5 Szenario „verbesserte Rahmenbedingungen konventionelle BGA“ .....	87
6 Bewertung .....	89
6.1 Regionalplanung und Klimaschutz.....	90
6.2 Ausblick.....	91
7 Literaturverzeichnis.....	94
7.1 Internetquellen.....	98
7.2 Rechtsquellen .....	100
Anhang .....	102
Eidesstattliche Erklärung .....	107

## II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema des anaeroben Abbaus .....	6
Abbildung 2: Anzahl und Verteilung von Biogasanlagen in der BRD .....	7
Abbildung 3: Biogaserträge ausgewählter Substrate.....	9
Abbildung 4: Verfahrensschema einer landwirtschaftlichen Biogasanlage .....	13
Abbildung 5: Verwertung von Biogas .....	15
Abbildung 6: Beispielhafte Projekte der Bioerdgaseinspeisung.....	16
Abbildung 7: Wertschöpfungskette von Biogas aus NawaRo .....	18
Abbildung 8: Entwicklung des Anlagenbestands der BRD von 1992 bis Sept. 2007 .....	27
Abbildung 9: Standortdreieck und Transportkostenminimalpunkt.....	30
Abbildung 10: Schema des Varignon'schen Apparats.....	31
Abbildung 11: Multikriterienanalyse zur Bestimmung möglicher Deponiestandorte .....	38
Abbildung 12: Beispiele arithmetischer Operationen im Rastermodell .....	40
Abbildung 13: Modellregion.....	44
Abbildung 14: Konversion und Reklassifizierung einer Datenebene.....	46
Abbildung 15: Multiplikation restriktiver Datenlayer .....	47
Abbildung 16: Addition gewichteter selektiver Faktoren .....	50
Abbildung 17: Multiplikation restriktiver und selektiver Endlayer .....	50
Abbildung 18: Standorte von BGA mit NawaRo- und Gülleeinsatz zur Stromproduktion ..	51
Abbildung 19: Standorte von BGA mit NawaRo- und Gülleeinsatz zur Methaneinspeisung .....	52
Abbildung 20: Optimaler Standort einer BGA in der Modellregion.....	53
Abbildung 21: Einzugsgebiet für Silomais .....	54
Abbildung 22: Untersuchungsregion .....	57
Abbildung 23: Steigungskarte des Untersuchungsgebiets .....	59
Abbildung 24: Typische Lage von Gehölzflächen.....	61
Abbildung 25: Restriktive Faktoren aus ATKIS.....	63
Abbildung 26: Selektive Faktoren aus ATKIS.....	65
Abbildung 27: Standorte von rindviehhaltenden Betrieben.....	67
Abbildung 28: Ferngasleitungen und 20-kV-Transformatorstationen .....	69
Abbildung 29: Restriktionenkarte .....	73
Abbildung 30: Selektionsflächenkarte .....	76
Abbildung 31: Standorteignungskarte .....	77
Abbildung 32: Optimaler Standort einer BGA.....	78
Abbildung 33: Einzugsgebiet von Silomais.....	80
Abbildung 34: Standorteignungskarte der Szenariovariation .....	82
Abbildung 35: Optimale Standorte der Szenariovariation .....	83

---

Abbildung 36: Bestimmung von Anbauflächen .....	84
Abbildung 37: Standorteignungskarte des Szenarios „verschärfte Rahmenbedingungen konventionelle BGA“ .....	86
Abbildung 38: Standorteignungskarte des Szenarios „verbesserte Rahmenbedingungen konventionelle BGA“ .....	88

### III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Inhaltsstoffe von Biogas .....	5
Tabelle 2: Vor- und Nachteile ausgewählter nachwachsender Rohstoffe .....	10
Tabelle 3: Biokraftstoffe im Vergleich .....	19
Tabelle 4: Vergütungssätze für Strom aus Biogas .....	21
Tabelle 5: Rechtliche Rahmenbedingungen für Errichtung und Betrieb einer Biogasanlage .....	24
Tabelle 6: Einfluss von WEBERs Rohstoffarten auf den Produktionsstandort.....	31
Tabelle 7: Restriktive und selektive Faktoren .....	42
Tabelle 8: Beispielhafte Entfernungsklassen für Energiemais .....	49
Tabelle 9: Restriktive Faktoren im Untersuchungsgebiet .....	58
Tabelle 10: Selektive Faktoren im Untersuchungsgebiet.....	64
Tabelle 11: Rindviehhaltende Betriebe und Bestandszahlen im Untersuchungsgebiet.....	66
Tabelle 12: Restriktive Faktoren und Mindestabstände .....	72
Tabelle 13: Selektive Faktoren des Szenarios „verschärfte Rahmenbedingungen“ .....	75
Tabelle 14: Selektive Faktoren der Szenariovariation .....	81
Tabelle 15: Selektive Faktoren des Szenarios "verschärfte Rahmenbedingungen konventionelle BGA“ .....	85
Tabelle 16: Selektive Faktoren des Szenarios "verbesserte Rahmenbedingungen konventionelle BGA“ .....	87

## IV. Abkürzungsverzeichnis

ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DGfG	Deutsche Gesellschaft für Geographie
DGK 5	Deutsche Grundkarte 1:5000
DGM	Digitales Geländemodell
dt	Dezitonne
DTK 25	Digitale Topographische Karte 1:25.000
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ESRI	Environmental Systems Research Institute Incorporated
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GIS	Geographisches Informationssystem
GPS	Ganzpflanzensilage
GVE	Großvieheinheiten
HIT	Herkunftssicherungs- und Informationssystem für Tiere
HLBG	Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation
HSE	HEAG Süd Hessische Energie AG
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
kW <sub>el</sub>	Kilowatt elektrisch
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MW	Megawatt
MW <sub>el</sub>	Megawatt elektrisch
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
Nm <sup>3</sup>	Normkubikmeter
OK	Objektartenkatalog

---

PEV	Primärenergieverbrauch
StMLF	Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten
TA	Technische Anleitung
TK 25	Topographischen Karte 1:25.000
TM	Trockenmasse
TWh	Terrawattstunde

## **Vorwort**

Die vorliegende Diplomarbeit ist in Kooperation mit dem Transferbereich „Energiepflanzen, Wirtschaft und Umwelt“ des Sonderforschungsbereichs 299 „Landnutzungskonzepte für periphere Regionen“ der Justus-Liebig-Universität Gießen entstanden. Im Hinblick auf das Mitwirken des Autors im Arbeitsbereich T1 „Entscheidungsunterstützungssystem Pro-Land“ leistet diese Diplomarbeit erste Erkenntnisse zur Identifizierung optimaler Standorte von Biogasanlagen mit Hilfe des Geographischen Informationssystems „ArcView 9.2“ der Firma „Environmental Systems Research Institute Incorporated“ (ESRI).

Der Kooperationspartner des Transferbereichs „Energiepflanzen, Wirtschaft und Umwelt“ ist die HEAG Süd Hessische Energie AG (HSE). Die HSE ist bestrebt den Ausbau erneuerbarer Energiequellen zu fördern und plant unter anderem den Bau von Biogasanlagen zur Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz in der Region Starkenburg in Südhessen.

## 1 Einleitung

Die Bereitstellung von Energie im Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit stellt eine der großen globalen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Ressourcenverknappung und globaler Klimawandel sind Argumente, die gegen die Nutzung fossiler Energieträger sprechen. Die Bundesregierung hat durch die Ratifizierung des Kyoto-Protokolls und die Einführung des Nationalen Klimaschutzprogramms Zielvorgaben für den Klimaschutz festgelegt. Der Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch soll von derzeit 5,8 % auf mindestens 10 % im Jahr 2020 steigen (BMU 2007a: 8). Im Jahr 2050 soll mindestens die Hälfte des Energieverbrauchs durch erneuerbare Energien gedeckt werden (BMU 2005: 11). Um dieses Ziel zu erreichen, wurden zahlreiche legislative Maßnahmen getroffen. Im Jahr 2000 wurde das Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) eingeführt. 2001 wurde die Biomasse-Verordnung verabschiedet. Das EEG wurde 2004 novelliert. Die Intention der EEG-Novelle ist „insbesondere im Interesse des Klima-, Natur- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen, die volkswirtschaftlichen Kosten der Energieversorgung auch durch die Einbeziehung langfristiger externer Effekte zu verringern, Natur und Umwelt zu schützen, einen Beitrag zur Vermeidung von Konflikten um fossile Energieressourcen zu leisten und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien zu fördern“ (§1 EEG). Das Gesetz definiert Wasserkraft, Windenergie, solare Strahlungsenergie, Geothermie sowie Energie aus Biomasse als regenerative Energien.

Neben der Wasser- und Windkraft ist Energie aus Biomasse der wichtigste regenerative Energieträger in Deutschland. In etwa 71 % der Endenergie aus erneuerbaren Energiequellen wurde aus Biomasse gewonnen. Dies entspricht ca. 4,1 % des gesamten Primärenergieverbrauchs (PEV) der BRD des Jahres 2006 (BMU 2007a: 10 ff.).

Bei der Wärmeenergiebereitstellung spielt Holz mit rund 1,9 % des gesamten PEV eine entscheidende Rolle. Der Beitrag zur Wärmeerzeugung auf der Grundlage von biogenen gasförmigen Brennstoffen (Biogas, Klärgas, Deponiegas) beträgt hingegen nur ca. 0,1 % des PEV. Zur Stromerzeugung tragen biogene Festbrennstoffe zu 0,4 % und Biogas zu 0,3 % vom gesamten PEV bei. Als Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sind Biodiesel mit 0,7%, Pflanzenöl mit 0,2 % sowie Bioethanol mit 0,1 % des PEV zu nennen (ebd.: 11).

Es wird deutlich, dass Energie aus Biomasse relativ geringe Beiträge zur Deckung des Energieverbrauchs leistet. Jedoch sind die Potenziale der Biomassennutzung in Deutschland bei weitem nicht ausgeschöpft. STEIN prognostiziert (2005: 7): „Biomasse ist

eine Energiequelle mit großer Zukunft und hat ein gewaltiges Entwicklungspotenzial aufzuweisen.“ So können 2020 jeweils rund 10 % der Strom- und Wärmeerzeugung sowie 10 % der PKW-Treibstoffe aus Biomasse stammen. 2030 kann Biomasse genauso viel an Primärenergie wie Braun- und Steinkohle zusammen liefern. Folglich „[...] wird Biomasse damit die nächste Sparte der erneuerbaren Energien sein, die in großem Umfang erschlossen wird.“ (STEIN 2005: 7).

Die Nutzung von Biogas trägt zur Erschließung dieses Biomassepotentials bei. Das gesamte technische Potential der Biogaserzeugung der BRD beträgt 72 TWh/a (FNR 2007b: 99). Mit dem Biogasanlagenbestand von Ende 2006 wurden rund 12,5 TWh produziert. Folglich ist das Potential bisher zu rund 17 % ausgeschöpft und es würden bei gleichbleibender durchschnittlicher Anlagengröße rund 16.600 weitere Anlagen zur Potentialauserschöpfung benötigt. Um die Hälfte des europäischen Erdgasbedarfs durch Biogas abzudecken, müssten im Jahr 2020 25.000 bis 50.000 Biogasanlagen in Betrieb sein (BENSMANN 2007b).

Die Substitution des Erdgases durch Biogas ist allerdings nur möglich wenn der Betrieb von Biogasanlagen wirtschaftlich ist. Eine Voraussetzung dafür ist neben der hohen Energieeffizienz bei der Umwandlung der Biomasse in die entsprechenden Energieträger auch der optimale Standort der Anlage. Unter den aktuellen Marktbedingungen können Biogasanlagen nur dann im Konkurrenzkampf um die Gärsubstrate bestehen, wenn optimale Standortbedingungen gegeben sind (BERG 2007a: 27).

Die Bestimmung von optimalen Betriebsstandorten ist ein klassisches Gebiet der Geographie und ein Paradebeispiel für die Einsatzmöglichkeiten moderner Geographischer Informationssysteme als methodische Werkzeuge. Gleichzeitig ist das Thema Energie ein vernachlässigtes Themenfeld der geographischen Forschung, wie BRÜCHER bereits 1997 mit seiner Abhandlung „Mehr Energie“ konstatiert. Erste Bestrebungen sich dieser für Geographen prädestinierten, da interdisziplinären Thematik zu nähern sind im neu verankerten „Arbeitskreis Geographische Energieforschung“ der DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR GEOGRAPHIE (DGfG) zu erkennen.

## **1.1 Problemstellung und Zielsetzung**

Die Forderung des Ausbaus erneuerbarer Energien ist u.a. verbunden mit der verstärkten Nutzung von Biomassepotentialen. Es ist absehbar, dass in naher Zukunft mit einer Zunahme von Biogasanlagen zu rechnen ist und das sowohl in Deutschland als auch europaweit. Gleichzeitig ist der Betrieb einer Biogasanlage an das Vorkommen bestimmter Rohstoffe gebunden und muss möglichst kosten- und energieeffizient erfolgen. Darüber-

hinaus stehen einem unkontrollierten Anlagenzuwachs Belange der Freiraumgestaltung und des Natur- und Landschaftsschutzes entgegen.

Das Ziel der vorliegenden Diplomarbeit besteht deshalb darin, eine Methode zu entwickeln mit der Standorteignungskarten generiert werden, die optimale Standorte für Biogasanlagen ausweisen. Dabei sollen möglichst vielseitige Standortanforderungen erfüllt werden, wobei der Aufwand der Datenerhebung und -implementierung möglichst gering ausfallen soll. Die entwickelte Methode soll in einer Beispielregion praktisch zum Einsatz kommen, um die resultierenden Ergebnisse validieren und damit die Eignung der Methodik bewerten zu können.

## **1.2 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit**

Zum Erreichen des Arbeitsziels liefert das Grundlagenkapitel (Kapitel 2) einen Überblick über zahlreiche Aspekte der Biogaserzeugung. Es dient zur Einführung in die Thematik und zur Schaffung einer Wissensbasis, die für weitere Arbeitsschritte relevant ist.

Den theoretischen Teil der Arbeit bildet Kapitel 3, welches die optimale Standortwahl nach WEBER und die Relevanz dieser Theorie für die Fragestellung der Diplomarbeit erläutert. Zudem gibt das Kapitel einen theoretischen Einstieg in die Thematik Geographische Informationssysteme und Multikriterienanalysen.

Das vierte Kapitel beschreibt die Entwicklung einer Analysemethodik anhand einer Modellregion. Unter Berücksichtigung der Regionsgegebenheiten werden grobe Kriterien festgelegt, die zur Erprobung des ausgearbeiteten Modellbildungsverfahrens dienen.

Die erprobte Methodik wird im fünften Kapitel zur Gestaltung der Modelle verwendet, auf deren Grundlage optimale Standorte von Biogasanlagen identifiziert werden. Die Berechnungen finden exemplarisch für ein Untersuchungsgebiet statt, welches sich auf Teile des hessischen Odenwaldkreises ausdehnt. Zudem werden Szenarien erstellt sowie ihre Auswirkungen auf die Ergebnisse dokumentiert.

Das letzte Kapitel bewertet die Ergebnisse der Standortmodelle und beleuchtet mögliche Auswirkungen sowie weiteren Handlungsbedarf.

## 2 Grundlagen der Biogaserzeugung

Biogas ist ein mit Wasserdampf gesättigtes Mischgas. Es besteht zu 50 bis 75 % aus Methan, zu 25 bis 45 % aus Kohlenstoffdioxid, zu 2 bis 7 % aus Wasser, jeweils bis zu 2 % aus Stickstoff, Sauerstoff und Schwefelwasserstoff und bis zu 2 % aus Wasserstoff (EDELMANN 2001: 676). Die Inhaltsstoffe von Biogas sowie ihre Anteile sind in Tabelle 1 aufgeführt.

**Tabelle 1: Inhaltsstoffe von Biogas**

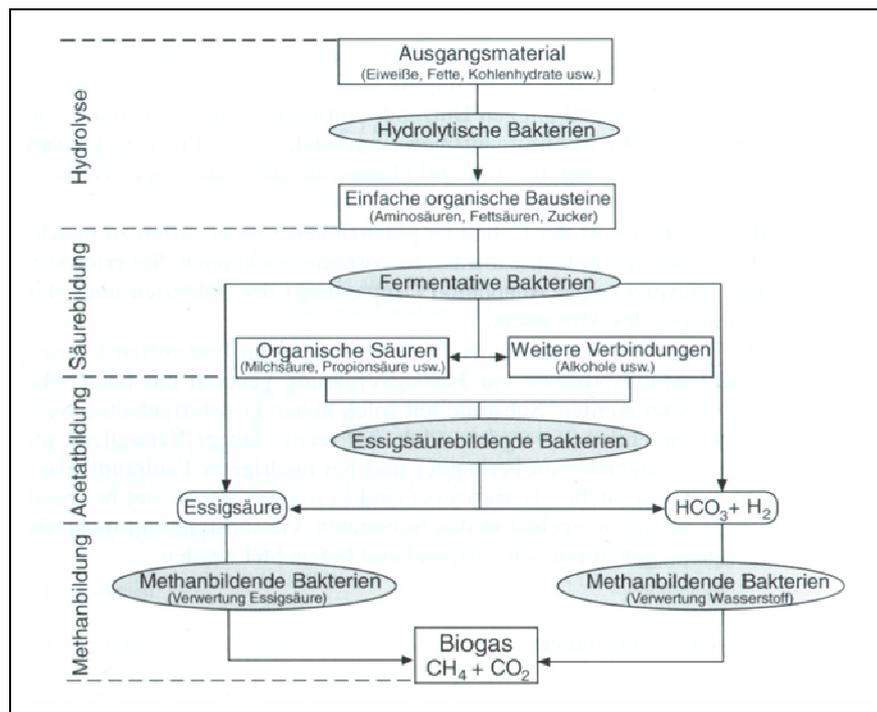
<b>Bestandteil</b>	<b>Konzentration</b>
Methan	50 bis 75 Vol.-%
Kohlenstoffdioxid	25 bis 45 Vol.-%
Wasser	2 bis 7 Vol.-%
Schwefelwasserstoff	0,0002 bis 2 Vol.-%
Stickstoff	< 2 Vol.-%
Sauerstoff	< 2 Vol.-%
Wasserstoff	< 1 Vol.-%

Quelle: Eigene Darstellung vereinfacht nach EDELMANN 2001: 676.

Der Energiewert von einem Kubikmeter Biogas entspricht je nach Methangehalt 5 bis 7,5 kWh (FNR 2007a: 6).

Biogas entsteht unter anaeroben Bedingungen durch Fermentation organischer Masse. An diesem Vergärungsprozess sind fünf Bakteriengruppen beteiligt. Sie bauen das Ausgangsmaterial in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten erst zu einfacheren organischen Verbindungen, dann zu niederen organischen Fettsäuren und schließlich zu Biogas ab (EDELMANN 2001: 641). Abbildung 1 stellt den anaeroben Abbau schematisch dar.

Abbildung 1: Schema des anaeroben Abbaus



Quelle: EDELMANN 2001: 646.

Mit Hilfe des anaeroben Abbaus kann ein sehr weites Spektrum von Verbindungen zerlegt werden. Neben Kohlenhydraten, Eiweißen und Fetten werden auch komplexe organische und selbst giftige Verbindungen abgebaut. Der anaerobe Abbau eignet sich besonders für die Verwertung von heterogen zusammengesetzten, feuchten organischen Materialien. Dabei fällt neben dem energetisch verwertbaren Biogas noch ein Gärrückstand an. Er besteht aus schwer abbaubaren Kohlenstoffverbindungen (EDELMANN 2001: 683). In der Natur findet anaerobe Fermentation beispielsweise in Mooren, auf dem Grund von Seen und in Pansen von Wiederkäuern statt (SCHATTAUER u. WEILAND 2006: 25).

Biogas, das Produkt der anaeroben Fermentation, wird als Energieträger bereits seit dem 10. Jahrhundert v. Chr. genutzt. Im assyrischen Reich wurde es zur Erwärmung von Badewasser verwendet (LUSK 1998: 2-2). Heutzutage wird Biogas in speziell für diesen Zweck errichteten Vergärungsanlagen, den sog. Biogasanlagen produziert.

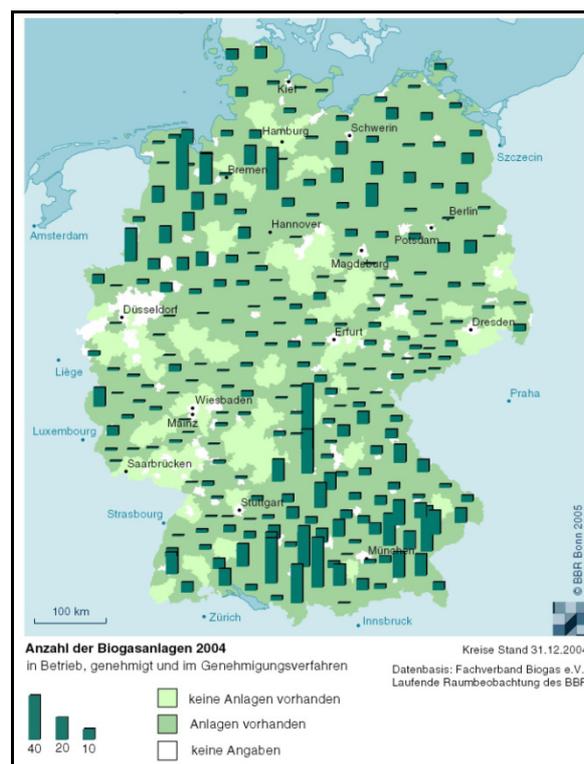
## 2.1 Biogasanlagen

Eine Biogasanlage (BGA) ist eine „Anlage zur Erzeugung, Lagerung und Verwertung von Biogas unter Einschluss aller dem Betrieb dienenden Einrichtungen und Bauten. Die Erzeugung erfolgt aus der Vergärung organischer Stoffe“ (BLB 2002: 5). Diese Definition sagt wenig über die verschiedenen Anlagentypen aus. So unterscheiden sich BGA nicht nur hinsichtlich der Dimensionierung und Anlagentechnik voneinander. Auch die Art, Her-

kunft und Zusammensetzung der verwendeten organischen Rohstoffe stellt ein bedeutendes Unterscheidungskriterium dar. Die FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR 2007a: 15) geht davon aus, dass rund 85 % des zukünftigen Biogasaufkommens aus Anlagen stammen wird, die ihre Vergärungsstoffe aus der landwirtschaftlichen Urproduktion erhalten. Daher sind diese Anlagen Hauptuntersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit. Anlagen, die Rohstoffe aus dem kommunalen und agrarindustriellen Bereich beziehen, werden nur am Rand erwähnt.

Betrachtet man die räumliche Verteilung von BGA in Deutschland, so erscheint die Prognose der FNR plausibel. Typische Standorte von BGA sind meist im ländlichen Raum angesiedelt, wie Abbildung 2 zeigt. Gebiete mit hoher Anlagendichte befinden sich im Nordwesten der BRD sowie im südlichen Baden-Württemberg und Bayern. In stark besiedelten Gebieten, wie z.B. in den Agglomerationsräumen Rhein-Ruhr oder Rhein-Main sind keine oder nur wenige BGA vorhanden.

**Abbildung 2: Anzahl und Verteilung von Biogasanlagen in der BRD**



Quelle: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung 2007a.

Auffällig ist, dass die ländlichen Räume in den östlichen Bundesländern weniger hohe Anlagendichten aufweisen. Diese Auffälligkeit lässt sich dadurch erklären, dass in den neuen Bundesländern aufgrund der Größe der Landwirtschaftsbetriebe auch große BGA mit einer Leistung über 500 kW<sub>el</sub> rentabel betrieben werden können. Daher befinden sich im Osten relative wenige, jedoch leistungsstarke BGA (BECKMANN 2006: 31).

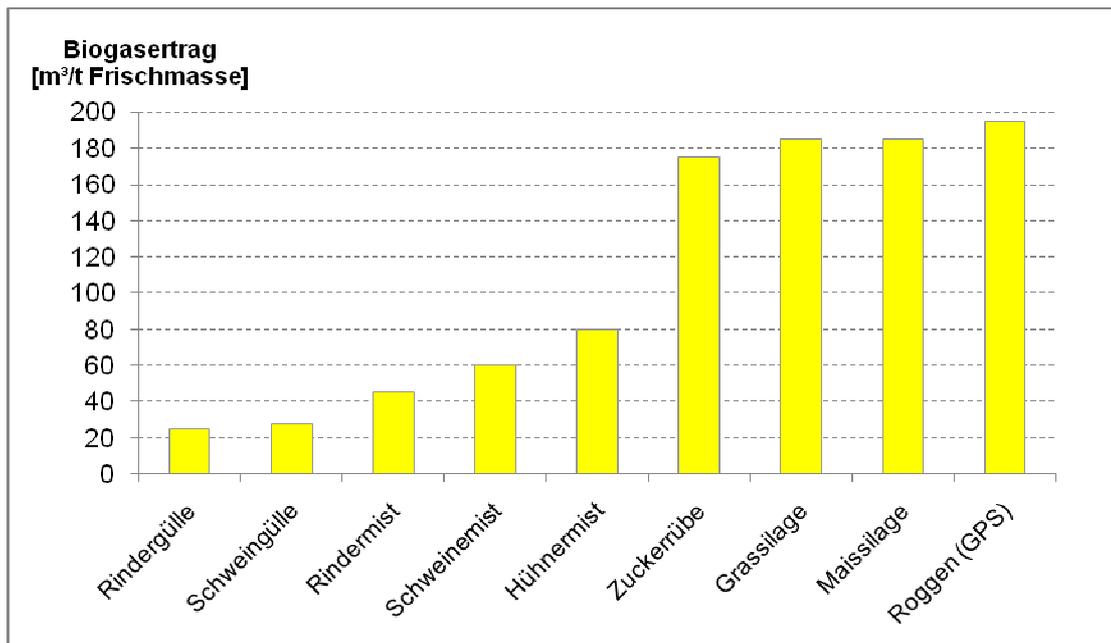
## 2.2 Substrate der Biogaserzeugung

Die zur Biogaserzeugung benötigten organischen Stoffe nennt man Substrate. Der Substratanteil in deutschen BGA verteilt sich zu 48 % auf tierische Exkremente, zu 26 % auf Bioabfälle und Reststoffe aus Industrie und Landwirtschaft sowie zu 26 % auf nachwachsende Rohstoffe (FNR 2007a: 7 f).

In landwirtschaftlichen BGA dienen tierische Exkremente wie Rinder-, Schweine- und Hühnergülle, Rinder-, Schweine- und Hühnerfestmist, Putenmist oder Hühnertrockenkot als Basissubstrate. Gülle, auch Flüssigmist genannt, ist ein Gemisch aus Kot und Harn von Tieren, die ohne oder mit nur sehr wenig Einstreu auf Spaltböden oder Gitterrosten gehalten werden. Aus arbeitswirtschaftlichen Gründen haben sich diese Aufstallungsformen vor allem bei der Milchkuh-, Mastrind-, Mastschwein- und Hühnerhaltung etabliert (EDER u. SCHULZ 2006: 45). Gülle trägt durch die darin enthaltenen Mikroorganismen zur Prozessstabilisierung während der anaeroben Fermentation bei und sie wird benötigt um Substratgemische in einen pumpfähigen Zustand zu versetzen. Je nach Tierhaltungform kommen meist Rinder- und Schweinegülle oder Rinder- und Schweinemist zur Anwendung. Gülle lässt sich, anders als Festmist, gut mit anderen Substraten kombinieren. Zudem ist Gülle im Umgang und in der Lagerung unproblematisch, da sie normalerweise direkt oder über eine Vorgrube der BGA zugeführt werden kann (SCHATTAUER u. WEILAND 2006: 86 f). Rindergülle kommt in rund 75 % der BGA zum Einsatz (FNR 2005: 77 ff).

Außer den genannten organischen Nebenprodukten werden in BGA auch Energiepflanzen, Ernterückstände und organische Abfälle eingesetzt. Eines der am häufigsten eingesetzten pflanzlichen Substrate ist Silomais. Beim Silomais handelt es sich um ganze Maispflanzen, die gehäckselt und anschließend durch Milchsäuregärung konserviert werden. Silomais macht etwa 70 % am Gesamtenergieinput aller BGA in Deutschland aus (TOEWS 2007: 34). Mais eignet sich besonders wegen seiner hohen Energieerträge und dem einfachen Handling als Substrat zur Biogasproduktion. Aus Sicht der Gaserträge kommen neben Silomais z.B. auch Roggen-Ganzpflanzensilage (GPS), Grassilage oder Rüben zur Biogasgewinnung in Frage (SCHATTAUER u. WEILAND 2006: 87 ff). Abbildung 3 zeigt die Biogaserträge einiger Substrate im Vergleich.

Abbildung 3: Biogaserträge ausgewählter Substrate



Quelle: Eigene Darstellung nach SCHATTAUER u. WEILAND 2006: 95.

Deutlich wird, dass die tierischen Produkte deutlich geringere Gaserträge haben, als die energiereichen pflanzlichen Substrate. Während aus Rindergülle knapp über 20 m<sup>3</sup> Gas pro Tonne Frischmasse gewonnen werden kann, beträgt der Biogasertrag aus einer Tonne Maissilage über 180 m<sup>3</sup>.

Der Gasertrag ist allerdings nicht der einzige Indikator für die Eignung von Substraten zur Biogaserzeugung. So gilt es bei der Substratwahl ebenfalls Aspekte einer einfachen und technisch gut umsetzbaren Handhabung zu berücksichtigen. So haben zum Beispiel Zuckerrüben mit ca. 175 m<sup>3</sup>/t einen relativ hohen Biogasertrag, die Frucht stellt jedoch spezielle Ansprüche an Boden und Klima und kann wegen der breiigen Konsistenz nicht als Fahrsilo gelagert werden (SCHATTAUER u. WEILAND 2006: 88 f.). Soll die Qualität der Rüben während der Lagerung erhalten bleiben, müssen sie im gemusterten Zustand gelagert werden, was hohe Lagerkosten verursacht. Zudem wirken sich dem Rübenkörper anhaftende Bodenpartikel negativ auf Verfahrensabläufe in der BGA aus und es wird eine Einrichtung zum Sedimentaustrag erforderlich (EDER u. SCHULZ 2006: 41). Eine Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen einiger nachwachsender Rohstoffe liefert Tabelle 2 auf der nächsten Seite.

**Tabelle 2: Vor- und Nachteile ausgewählter nachwachsender Rohstoffe**

<b>Substrat</b>	<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
Kartoffeln	gute Aufbereitung möglich	Sinkschichten u. Verklebungen
Mais	hohe Energiekonzentration, problemlose, verschmutzungsfreie Ernte mit hoher Flächenleistung, kostengünstige Lagerung	
Rüben	hohe Energiekonzentration (Gehalts- und Zuckerrüben)	hoher Aufwand bei Ernte, Aufbereitung und Lagerung
Getreide	gute Lagerfähigkeit, Einsatz zur gezielten Anlagensteuerung	Holzanteil der Halme führt zu Schwimmschichten
Gras	hohe Energiekonzentration	Verschmutzung u. Schwimmschicht im Fermenter
Zwischenfrüchte (z.B. Raps)	mittlere bis hohe Energiekonzentration	Verschmutzung, Bildung von Schwimm- und Sinkschichten im Fermenter

Quelle: Eigene Darstellung nach JACOBS 2001: 64.

Es wird deutlich, dass trotz ähnlich hoher Gasausbeuten (siehe Abb. 3) Gras, Getreide und Zuckerrüben wegen der Tendenz zur Bildung von Schwimmschichten und Verschmutzungen und wegen aufwändiger Aufbereitung und Lagerung als Substrate zur Biogaserzeugung weniger gut geeignet sind als Mais, der aus technischer Sicht keine Nachteile aufweist.

Neben nachwachsenden Rohstoffen werden auch Rohstoffe aus der weiterverarbeitenden Agroindustrie sowie organische Reststoffe aus Kommunen und Haushalten in BGA eingesetzt. Im Einzelnen sind dies z.B. Alkoholschlempen, Nebenprodukte aus Stärkeherstellung und Obstverarbeitung, Abfälle organischer Herkunft sowie Grünschnitt (SCHATTAUER u. WEILAND 2006: 90 ff). Diese Materialien fallen punktuell und nicht über die Fläche verteilt an. Zudem unterliegt der Betrieb von Fermentationsanlagen, die Rest- und Abfallstoffe vergären dem Abfallrecht und erweist sich wegen der rechtlichen Auflagen als kompliziert. Mit der Erhöhung der Einspeisevergütung zur Erzeugung von Strom aus nachwachsenden Rohstoffen und tierischen Wirtschaftsdüngern hat der Einsatz nicht-landwirtschaftlicher Substrate an Bedeutung verloren (MATTHIAS et al 2006: 139). Jedoch bleibt zu beachten, dass eine Nutzung von kommunalen und agroindustriellen Abfallmaterialien zur Biogaserzeugung aus ökologischer Sicht durchaus sinnvoll sein kann. Sie sollte allerdings aus Gründen der ökonomischen Tragfähigkeit im Einzelfall detailliert analysiert werden.

Außer der technischen Seite muss auch die ökonomische Seite bei der Substratwahl berücksichtigt werden. Die relative Vorzüglichkeit der angebauten Substrate gegenüber op-

tionalen Feldfrüchten ist hierbei entscheidend. Sie ist abhängig vom Ertrag, von den Kosten und von den Opportunitätskosten gegenüber anderen, verdrängten Feldfrüchten. An einem Standort, an dem die relative Vorzüglichkeit von z.B. Energiemais gegenüber optionalen Marktfrüchten nicht gegeben ist, wird der Landwirt als homo oeconomicus keinen Energiemais anbauen. Diese Annahme gilt es bei der beabsichtigten Standortanalyse zu beachten.

Es bleibt festzuhalten, dass bei Berücksichtigung aller ökonomischer, technischer und prozessbedingter Aspekte die Substratgruppen Wirtschaftsdünger und nachwachsende Rohstoffe zum Einsatz in BGA bevorzugt werden (EDER u. SCHULZ 2006: 41). Auch aufgrund der Gesetzeslage ist die Vergärung von Wirtschaftsdüngern und Energiepflanzen unkompliziert, da sich der Betreiber im landwirtschaftlichen Rechts- und Tätigkeitsbereich bewegt (ebd.: 67). Die Ergebnisse einer Untersuchung von 438 in der BRD betriebenen Anlagen bestätigt die Dominanz der Substrate Mais und Rindergülle. Durchschnittlich wurden in den Anlagen pro Tag 11,3 Tonnen Mais und 9,1 Tonnen Gülle eingesetzt, gefolgt von Schweinegülle mit 4,0 und Grassilage mit 1,9 Tonnen täglich (NEUMANN 2007: 105).

### **2.3 Verfahrensabläufe und Funktionsweise von Biogasanlagen**

Die FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (2007a: 9) beziffert rund 70 % der BGA in Deutschland als Durchflussanlagen. Dabei handelt es sich um Anlagen, denen die Substrate kontinuierlich oder in kurzen Intervallen zu- und abgeführt werden. Nachfolgende Erläuterungen beschränken sich vorerst auf diesen Anlagentyp. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass eine Vielzahl von Anlagenvarianten existiert, die sich aufgrund zahlreicher Faktoren wie z.B. Bauart, Anzahl der Prozessstufen, Prozesstemperatur, Art der Beschickung sowie Trockensubstanzgehalt der Substrate voneinander unterscheiden. Abgesehen von dieser Variantenvielfalt kann der Betrieb einer BGA grundsätzlich in vier Verfahrensschritte einteilt werden:

1. Substratanlieferung, -lagerung, -aufbereitung und -einbringung
2. Biogasgewinnung
3. Gärrestlagerung, -aufbereitung und -ausbringung
4. Biogasspeicherung, -aufbereitung und -verwertung.

Nach der Ernte bzw. dem Sammeln werden die Substrate meist in unmittelbarer Nähe der BGA gelagert und je nach Zusammensetzung von Störstoffen getrennt. Sollen seuchen- und phytohygienisch bedenkliche Stoffe vergoren werden, so ist eine Vorbehandlung die-

ser Stoffe durch Erhitzen auf 70 °C für mindestens eine Stunde notwendig. Einen beschleunigten biologischen Abbau sowie eine vereinfachte Einbringung und Beförderung innerhalb der einzelnen Komponenten der BGA bewirkt die mechanische Zerkleinerung der Substrate (SCHOLWIN et al. 2006: 45 ff.).

Die aufbereiteten Substrate werden anschließend in den Fermenter eingebracht. Dort findet die anaerobe Fermentation statt und es bildet sich das Biogas. Damit das Biogas leichter und schneller aus dem Substratgemisch ausgasen kann, sind Rührwerke im Fermenter installiert und der Faulraum wird, abhängig von Anlagentyp und Bakterienart, auf Temperaturen zwischen 32 und 55 °C erwärmt (ebd.: 37).

Nach einer Verweilzeit von ca. 50 Tagen gelangt das fermentierte Substrat in das Gärrestlager, auch Endlager genannt, wo es bis zur Ausbringung auf die landwirtschaftlichen Flächen sechs bis sieben Monate verbleibt. Im Endlager gärt das Substrat nach und es fällt dadurch zusätzliches Biogas an. Der Lagerbehälter ist ebenso wie der Fermenter geschlossen, um Stickstoffverluste zu vermeiden und das bei der Nachgärung entstehende Biogas aufzufangen, das bis zu 20 % der Gesamtgasausbeute betragen kann (ebd.: 74).

Die Speicherung des gewonnenen Biogases erfolgt entweder direkt über dem Fermenter oder in separaten Lagern. Bevor das Biogas verwertet wird, muss es entwässert und entschwefelt werden (EDER u. SCHULZ 2006: 96).

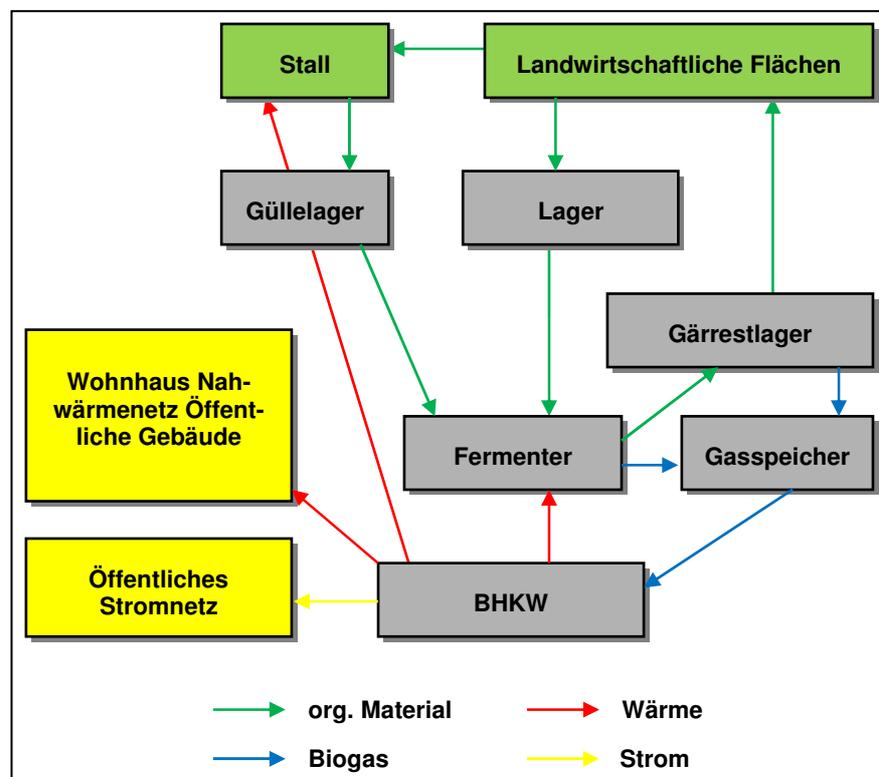
Bei konventionellen Anlagen wird das Biogas nach der Aufbereitung in Gasmotoren verstromt oder im Blockheizkraftwerk zur gekoppelten Produktion von Strom und Wärme, auch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) genannt, genutzt. Der Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist. Die Wärme kann vor Ort zur Bereitstellung von Prozesswärme im Fermenter, zur Beheizung von Wohngebäuden und Stallanlagen oder zur Trocknung von Getreide oder Holzhackschnitzeln verwendet werden. Sind zusätzliche Wärmeabnehmer in der Nähe der BGA vorhanden, was eher selten der Fall ist, kann eine externe Wärmebereitstellung für industrielle Prozesse, z.B. in Molkereien, Brennereien usw. erfolgen. Ferner kann die Wärme über ein Nah- oder Fernwärmenetz zu Abnehmern, wie z.B. öffentlichen und privaten Gebäuden transportiert werden (FNR 2007a: 13 u. IE 2007: 54 f.). Aufgrund der dezentralen Lage der Anlagen sind ausreichende Wärmekonzepte jedoch nicht immer gegeben.

Das vorgestellte Verfahren der Biogaserzeugung ist das sogenannte Nassfermentationsverfahren, bei dem der Trockenmassegehalt im Fermentationsraum weniger als 15 % beträgt. Liegt der Anteil des Trockensubstanzgehalts im Fermenter zwischen 20 und 40 %, so handelt es sich um die sog. Trockenfermentation. Zum Einsatz kommen hierbei stapelbare Substrate, die weder pump- noch fließfähig sind (SCHATTAUER u. WEILAND 2006:

26). Die eingesetzten organischen Stoffe haben dabei in der Regel einen Wassergehalt von unter 70 Prozent. Zwar kommt in landwirtschaftlichen BGA fast ausschließlich die Nassvergärung zur Anwendung, jedoch stellt das Trockenfermentationsverfahren eine Alternative für landwirtschaftliche Betriebe dar, die nicht über das Basissubstrat Gülle verfügen (SCHOLWIN et al.: 2006: 39ff).

Abbildung 4 stellt das Verfahrensschema einer BGA bei Verwendung von Substraten aus landwirtschaftlichen Quellen dar. Grün unterlegte Felder deuten auf die Substratproduktion hin. Grau unterlegte Felder sind Bestandteile der BGA und gelbe Felder verweisen auf die Energienutzung, die im folgenden Abschnitt näher betrachtet wird.

**Abbildung 4: Verfahrensschema einer landwirtschaftlichen Biogasanlage**



Quelle: Eigene Darstellung, vereinfacht nach FNR 2007a: 9.

## 2.4 Gasverwertung

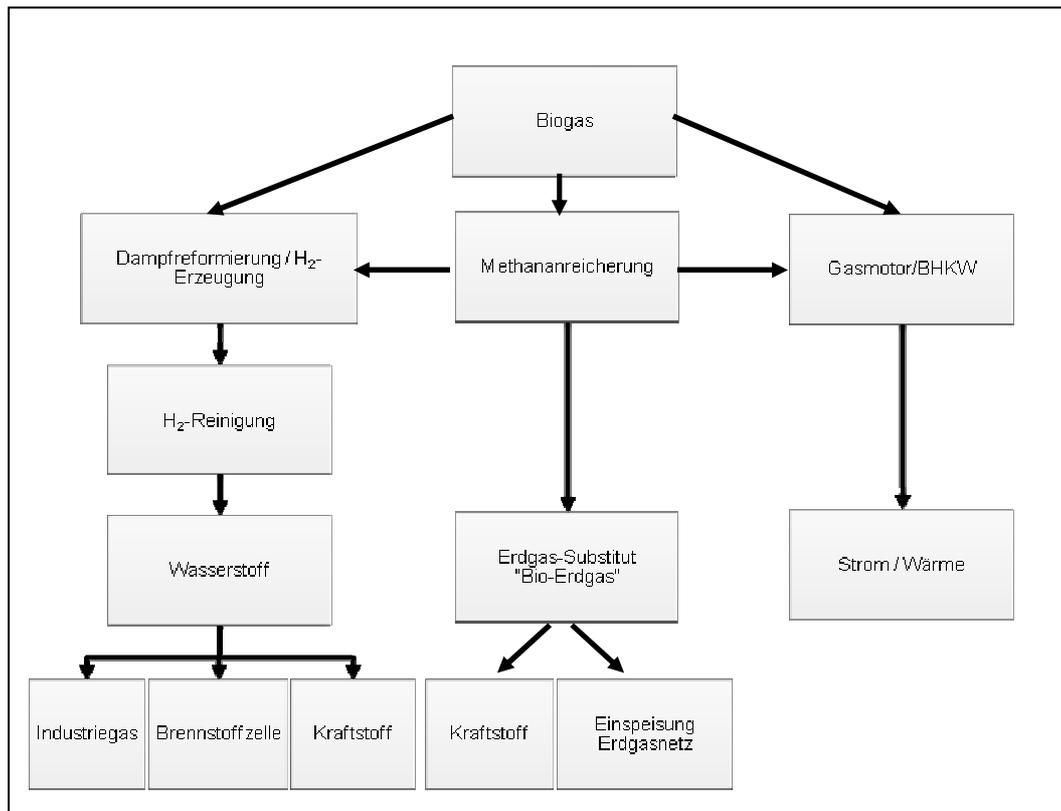
Die häufigste Form der Nutzung von Biogas ist die Erzeugung von Strom und Wärme in Blockheizkraftwerken (BHKW), bzw. in Gasmotoren zur ausschließlichen Stromerzeugung (SCHULTE-SCHULZE-BERNDT 2001: 181). Nachteilig wirkt sich bei dieser Nutzungsart die geringe Ausschöpfung des Energiepotentials des Biogases aus. Gasmotoren weisen einen energetischen Nutzungsgrad von lediglich 35 bis 40 % auf und die beim Umwandlungsprozess entstehende Abwärme geht verloren. Bei BHKWs, die mittels KWK auch die Motorenabwärme nutzen, kann aufgrund der dezentralen Standorte der BGA keine komplette Nutzung der Abwärme erfolgen (ebd.: 182). Eine vom INSTITUT FÜR ENERGETIK

UND UMWELT (IE 2007: 54 f.) durchgeführte Umfrage verdeutlicht die Problematik. Rund 42% von 452 befragten BGA-Betreibern trafen keine Angaben zur Wärmenutzung. Bei der Betrachtung von 261 Anlagen mit KWK wurde deutlich, dass durchschnittlich nur rund die Hälfte der anfallenden Wärmemenge genutzt werden konnte.

Die Erzeugung von Wasserstoff über einen Reformer mit Wasserstoffreinigung stellt eine weitere Möglichkeit der Biogasnutzung dar. Der auf diese Art gewonnene Wasserstoff kann als Industriegas, Kraftstoff oder Stromlieferant mittels Brennstoffzelle verwertet werden. Diese Variante der Biogasnutzung hat sich aufgrund zahlreicher, im Laufe der Prozesswandlungskette auftretender Probleme und wegen fehlender Infrastruktur zur Versorgung der Endverbraucher mit Wasserstoff bisher nicht auf dem Markt durchgesetzt (SCHULTE-SCHULZE-BERNDT 2001: 182).

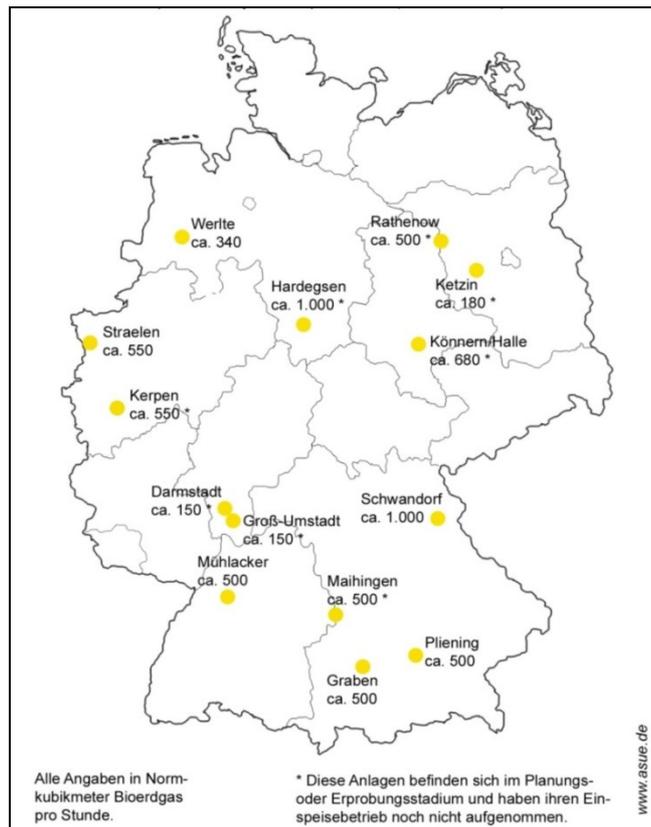
Als erfolgsversprechende Alternative hat sich die Biogasaufbereitung auf Erdgasqualität mit anschließender Einspeisung in das Erdgasnetz erwiesen. Dadurch ist es möglich das produzierte „Bioerdgas“ an dem Ort zu verstromen, an dem auch eine Wärmenutzung gegeben ist. Die Verluste durch fehlende Wärmenutzung können so reduziert und der Gesamtwirkungsgrad der Energieerzeugung erhöht werden (EDER u. SCHULZ 2006: 128). Voraussetzung für eine Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz ist allerdings eine Reinigung und Aufbereitung auf Erdgasqualität durch Methananreicherung. Zudem muss eine Druckerhöhung des Biogases auf den in der Erdgasleitung vorhandenen Druck stattfinden (SCHOLWIN, WEIDELE u. GATTERMANN 2006: 114). Wie Abbildung 5 auf der nächsten Seite verdeutlicht, existieren zahlreiche Möglichkeiten der energetischen Nutzung von Biogas, insbesondere wenn das Gas auf Erdgasqualität aufbereitet wird.

Abbildung 5: Verwertung von Biogas



Quelle: Eigene Darstellung nach SCHULTE-SCHULZE-BERNDT 2001: 181.

Die Einspeisung ins Gasnetz zur dezentralen Strom- und Wärmeerzeugung gewinnt an Bedeutung (WEILAND 2006). Zahlreiche Anlagen mit Erdgaseinspeisung sind seit 2006 in Betrieb. Die erste hessische Biogasanlage mit Einspeisung in das Erdgasnetz läuft bis Ende März im Probetrieb und wird ab April Bioerdgas ins Netz einspeisen. Sie befindet sich in der Nähe der Gemeinde Wixhausen bei Darmstadt (BÖSS 2008). Eine Übersicht der Standorte beispielhafter Projekte inkl. der Leistung der Anlagen zeigt Abbildung 6 auf der folgenden Seite.

**Abbildung 6: Beispielhafte Projekte der Bioerdgaseinspeisung**

Quelle: ASUE e.V. 2008.

Rund die Hälfte der Anlagen befindet sich noch im Planungs- oder Versuchsstadium. Mit einem Anstieg dieser Anlagenvariante ist in absehbarer Zeit zu rechnen, da zahlreiche Argumente für eine Bioerdgas-Einspeisung sprechen.

## 2.5 Vor- und Nachteile der Biogasnutzung

Bevor die Vorteile der Einspeisung von Bioerdgas in das Gasnetz aufgezeigt werden, wird zuerst allgemein auf die Vorteile der Biogasnutzung eingegangen.

Generell spricht für die Nutzung von Biogas, dass bei dieser Art der Energieerzeugung kaum zusätzliches fossiles Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird. Das während der Verbrennung in BGA entstehende Kohlenstoffdioxid bewegt sich teilweise im natürlichen Kohlenstoffkreislauf, da es von den Energiepflanzen in der Wachstumsphase assimiliert wird (EDER u. SCHULZ 2006: 9). Die Biogaserzeugung kann aufgrund des Einsatzes fossiler Brennstoffe bei Anbau, Ernte, Transport und Ausbringung der Gärrückstände und insbesondere wegen der ressourcenintensiven Kunstdüngerproduktion jedoch nicht völlig CO<sub>2</sub>-neutral erfolgen.

Fakt ist dennoch, dass BGA im Jahr 2006 ca. fünf Mio. Tonnen klimaschädlicher Kohlenstoffdioxidemissionen eingespart haben (FACHVERBAND BIOGAS 2007b: 1 f.). Aus

der Landwirtschaft stammende Methan- und Lachgasemissionen werden durch das Biogasverfahren ebenfalls reduziert (EDER u. SCHULZ 2006: 182).

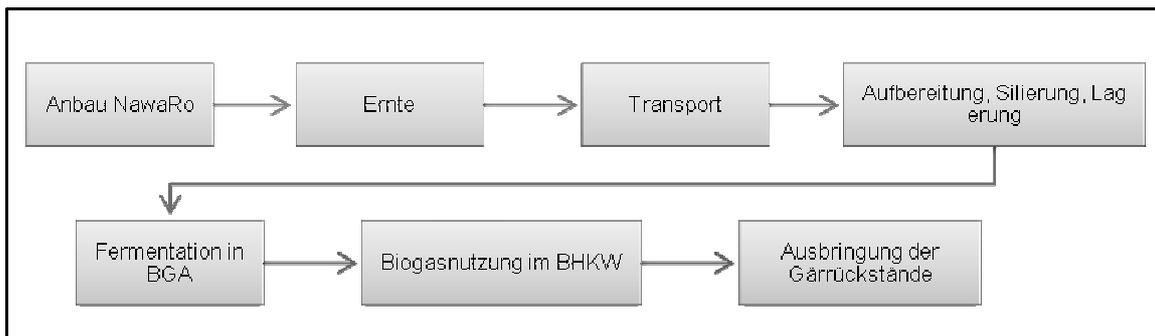
Im Vergleich mit anderen erneuerbaren Energiequellen wie Solarthermie, Photovoltaik und Windkraft hat Biogas den Vorteil, dass seine Nutzung für alle Sekundärenergieträger, d.h. in Form von Wärme, Strom und Kraftstoff erfolgen kann. Windkraft und Sonnenenergie unterliegen natürlichen Schwankungen. Biogas hingegen kann kontinuierlich erzeugt werden. Es dient als Erdgasersatz und kann in gewissem Maße zur Unabhängigkeit von Energieimporten beitragen (NOTTINGER 2007).

Die Biogastechnologie entspricht darüberhinaus einer umweltgerechten Kreislaufwirtschaft, da sie neben Energiepflanzen auch Gülle, Pflanzenreste, Abfälle und Zwischenfrüchte zur Energieerzeugung nutzt. Ohne die Biogastechnologie würden Energie und Nährstoffe dieser Nebenprodukte nur zu einem Bruchteil genutzt. Zudem werden z.B. beim Einsatz von Gülle unkontrollierte Emissionen hochklimarelevanter Gase vermieden. Die übliche Lagerung von Gülle und Mist unter freiem Himmel und die damit entstehenden Methanemissionen werden durch den Einsatz der Biogastechnik vermieden. (FACHVERBAND BIOGAS 2007b: 1 f.). Der Gärrückstand einer Biogasanlage ist ein hochwertiger Dünger, der bei fachgerechter Anwendung bis zu 36 % energie- und ressourcenintensiv produzierten Mineraldünger ersetzt (EDER u. SCHULZ 2006: 183).

Außer den umweltschonenden energetischen Vorteilen spielen güllverbessernde Aspekte der Biogastechnik eine umweltrelevante und zunehmend wichtige Rolle (ebd.: 180). BGA tragen zur Verringerung der Geruchsintensität während der Düngung bei. Diese Geruchsminderung ist meist ein entscheidender Gesichtspunkt für Landwirte sich der Biogastechnologie zu bedienen, um Flächen in dichter besiedelten Gebieten düngen zu können (ebd.: 16). Vergorene Gülle aus einer BGA ist zwar nicht geruchslos, aber in der Regel so geruchsarm, dass gerade die nicht-landwirtschaftliche Bevölkerung sich weniger belästigt fühlt. Zusätzlich hat vergorene Gülle den Vorteil, dass sie pflanzenverträglicher, weniger ätzend und leichter zu verarbeiten als herkömmliche Gülle ist. Bei der Vergärung der Substrate treten keine Nährstoffverluste auf, da der Gärprozess unter Luftabschluss erfolgt (siehe Kapitel 2.1). Im Gegensatz zur offenen Lagerung von Gülle und Mist finden außerdem keine Nährstoffverluste durch Verdunstung oder Auswaschung statt (ebd.: 180 f.). Die Keimfähigkeit von Unkrautsamen, die in den Substraten enthalten sind, wird durch die in BGA stattfindenden Vorgänge reduziert, so dass die Biogastechnik zur Unkrautbekämpfung beiträgt und dabei ohne chemische Mittel auskommt. Zusätzlich geht von BGA eine Hygienisierungswirkung aus, da sich bei der Vergärung die in der Gülle enthaltene Anzahl pathogener Erreger und mit ihr das Übertragungsrisiko verringert (ebd.: 182 f.).

Das Stichwort „Landwirt zu Energiewirt“ beleuchtet einen weiteren Pluspunkt der Biogastechnologie. Der Großteil der BGA ist im ländlichen Raum angesiedelt (vgl. Kapitel 2.1). Betreiber der Anlagen sind üblicherweise Landwirte. Somit können BGA dazu beitragen den Strukturwandel in der Landwirtschaft zu fördern und schaffen unter bestimmten Bedingungen eine zusätzliche Einkommensquelle für die Landwirtschaft sowie Arbeitsplätze im peripheren Raum (EDER u. SCHULZ 2006: 16). Die Landwirte können, besonders auf ertragsschwachen Böden, eine höhere Wertschöpfung als bei herkömmlicher Wirtschaftsweise erzielen (JACOBS 2001: 63). Strom und Wärme sind hoch veredelte Produkte. Im Gegensatz zur reinen Rohstoffproduktion, wie z.B. beim Verkauf von Getreide an eine Mühle, vermarkten die Landwirte bei der Biogaserzeugung höherwertige Produkte. Dabei verbleiben große Teile der Wertschöpfung im landwirtschaftlichen Betrieb, der unter Umständen vom Anbau der Rohstoffe bis zur Produktion von Strom und Wärme vollständig am Wertschöpfungsprozess beteiligt ist, wie anhand von Abbildung 7 zu erkennen ist.

**Abbildung 7: Wertschöpfungskette von Biogas aus NawaRo**



Quelle: Eigene Darstellung nach FNR 2006: 42.

Zusätzlich zu den aufgezählten positiven Seiten der konventionellen Biogaserzeugung weist die Biogaseinspeisung in das Erdgasnetz folgende Vorteile auf.

Bei der Biomethaneinspeisung findet eine Entkoppelung örtlicher Nachfragedisparitäten statt. Das Biogas wird nicht am Produktionsort verstromt, wo oftmals keine ausreichende Wärmenutzung gegeben ist (vgl. Kapitel 2.4), sondern dort wo eine energetische Umwandlung mit hoher Energieeffizienz in KWK-Anlagen mit Gesamtwirkungsgraden von bis zu 80 % und vollständiger Wärmenutzung gegeben ist. Konventionelle Aggregate weisen energetische Wirkungsgrade von maximal 50 bis 55 % auf. Als wesentlicher Vorteil erweist sich der Transport der Biomethans in einer bereits bestehenden Infrastruktur, so dass keine neuen Distributions- und Vermarktungsstrukturen geschaffen werden müssen. Ferner werden Schwankungen zwischen Produktion und Bedarf über das Gasnetz abgedeckt oder in Form von Gasspeichern kompensiert. Das Gas ist räumlich und zeitlich flexibel einsetzbar und kann, wie normales Erdgas auch, unproblematisch als Energieträger

für Kraftwerke, Industriebetriebe und Haushalte und darüberhinaus auch als Kraftstoff für Erdgasfahrzeuge genutzt werden (NOTTINGER 2007).

Als Kraftstoff ist Biomethan hinsichtlich des Nettoenergieertrags allen anderen Biokraftstoffen überlegen. Beim Anbau von Energiemais können pro Hektar etwa 4000 Liter Dieselmotorkraftstoff durch Biomethan substituiert werden (WEILAND 2006). Aufgrund der hohen Flächeneffizienz kann ein Erdgasfahrzeug mit dem aus einem Hektar Mais gewonnenen Biomethan über 67.000 Kilometer zurücklegen. Im Vergleich zu anderen alternativen Kraftstoffen wie Biodiesel und Bioethanol ist dies ein Spitzenwert, wie Tabelle 3 zeigt.

**Tabelle 3: Biokraftstoffe im Vergleich**

Energieträger	Ertrag / Hektar	Kilometerleistung* / Hektar
Bioerdgas	3.560 kg	67.600 km
Biodiesel	1.550 l	23.300 km
Bioethanol	2.560 l	22.400 km

\* PKW-Kraftstoffverbrauch: Ottomotor 7,4 l / 100 km; Dieselmotor 6,1 l / 100 km.

Quelle: FNR 2008.

Der Vielzahl von Vorteilen stehen allerdings auch einige Nachteile der Biogasnutzung gegenüber. Als besonders öffentlichkeitswirksam stellt sich die Geruchsproblematik heraus. Zwar werden Geruchsemissionen tendenziell durch den anaeroben Abbau reduziert, sie können aber durch den Einsatz von Substraten aus Biotonne oder Agroindustrie, mangelnder Anlagentechnik, Undichtigkeiten oder Betriebsstörungen zunehmen. Dieser Umstand hat mancherorts bereits zu Demonstrationen und sogar zur Schließung einer Anlage geführt (EDER u. SCHULZ 2006: 180 f.). Bürgerinitiativen befürchten Biogasunfälle sowie unsachgemäß betriebene Gärkraftwerke und damit verbunden erhöhte Geruchsemissionen. Zudem argumentieren die Gegner, dass aufgrund der BGA mit einer starken Zunahme des Fahrzeugverkehrs mit entsprechendem Lärm und einem erhöhten Sicherheitsrisiko auf den Verkehrswegen zu rechnen ist. Auch Wertverluste bei Immobilien und ein durch großflächigen Energiepflanzenanbau negativ beeinflusstes Landschaftsbild werden mit einer BGA in Verbindung gebracht (BENSMANN 2007a).

Neben dieser „not-in-my-backyard“-Problematik steht der Anbau von Energiepflanzen auch global betrachtet in der Kritik, da die Anbauflächen in direkter Konkurrenz zum Anbau von Nahrungsmitteln und zum Erhalt naturnaher Landschaften stehen. In der Presse sind immer öfter kritische Schlagzeilen wie „Essen statt fahren“ oder „Erst Teller, dann Tank“ zu lesen.

Als größter Nachteil gegenüber fossilen Energieträgern gelten hohe Stromgestehungskosten. Aktuell erhält der Betreiber einer BGA, die im Jahr 2004 in Betrieb ging, nachwachsende Rohstoffe vergärt und eine elektrische Leistung von 150 kW hat pro Kilowatt-

stunde eingespeisten Stroms 17,5 Eurocent, während die Erzeugerpreise aus fossilen Quellen bei zwei bis fünf Cent pro kWh liegen (EDER u SCHULZ 2006: 131). Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Nutzung fossiler Energieträger externe Kosten verursacht, die der Strompreis nicht vollständig abbildet.

Es ist daher fraglich, ob regenerative Energie wesentlich teurer als fossile Energie ist. Die begrenzte Verfügbarkeit fossiler Energieträger ist ein gravierender Nachteil, der sich früher oder später sehr deutlich auf den Preis niederschlagen wird. Daher ist es nur noch eine Frage der Zeit, bis sich Stromgestehungskosten alternativer und fossiler Energieträger angleichen. Als erstes Anzeichen dieser Entwicklung kann exemplarisch der stark gestiegene Preis für Spitzenlaststrom angesehen werden, der am 27. Juli 2006 infolge von Kühlwasserproblemen bei Atom- und Kohlekraftwerken auf 54 Cent je Kilowattstunde gestiegen ist (RENTZING 2006: 38).

Zusammenfassend kann man festhalten, dass BGA dazu beitragen negative Umweltwirkungen der Energieerzeugung zu vermeiden. So verringern BGA klimarelevante Emissionen aus fossilen Quellen, liefern einen erneubaren und vielseitig einsetzbaren Energieträger, reduzieren die Keim- und Unkrautbelastung von Gülle und können Dünger und Herbizide einsparen. Durch Biomethaneinspeisung kann eine effiziente und vielfältige Nutzung der Energie erfolgen. Nachteilig wirken sich unter Umständen auftretende Geruchsemissionen, die Konkurrenz zur Nahrungsmittelversorgung sowie die gängige Ansicht, dass regenerative Energie teurer als fossile Energie ist, aus. Die aktuelle Konkurrenzfähigkeit alternativer Energiequellen beruht auf einigen rechtlichen Rahmenbedingungen, die im folgenden Kapitel am Beispiel der Biogaserzeugung näher dargestellt werden.

## **2.6 Rahmenbedingungen der Biogaserzeugung**

Die Energie- und Kraftstofferzeugung aus regenerativen Quellen stellt aufgrund der zahlreichen Vorteile erneuerbarer Energien einen globalen Trend dar, der in vielen Staaten durch Förderprogramme unterstützt wird. Die Förderung umfasst dabei neben der Realisierung von Pilotprojekten auch Investitionen in Forschung und Entwicklung, Steuerbefreiungen und -ermäßigungen, Investitionsförderungen für Produktionsanlagen sowie Subventionen der Landwirtschaft (HENKE: 2005: 9). Dieser Abschnitt beschreibt die in Deutschland geltenden energie- und agrarpolitischen sowie bauplanungsrechtlichen Rahmenbedingungen, die für den Anbau von Energiepflanzen und den Betrieb von BGA gelten.

Als bedeutendes Instrumentarium zur Förderung des Ausbaus regenerativer Energien hat sich das Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (EEG) erwiesen. Das Gesetz

verkörpert die wichtigsten energiepolitischen Rahmenbedingungen der Biogaserzeugung. Es regelt Anwendungsbereiche sowie Rechte und Pflichten von Anlagen- und Netzbetreibern. So sind z.B. Netzbetreiber verpflichtet den aus einer BGA stammenden Strom in ihr Netz aufzunehmen und weiterzuleiten (§ 4 EEG). Zudem sind im EEG die Vergütungshöhen für erneuerbaren Strom aus unterschiedlichen Quellen festgesetzt (siehe § 6 bis 11). Die nach § 3 EEG geförderten Anlagen zur Energieerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern sind im einzelnen Solar-, Wasserkraft-, Geothermie-, Windkraft-, Biomasse- und Biogasanlagen.

Die Vergütungssätze für Strom aus Biomasse und Biogas regelt § 8 des EEG. Sie sind nach Anlagenleistung gestaffelt, wie Tabelle 4 verdeutlicht.

**Tabelle 4: Vergütungssätze für Strom aus Biogas**

Anlagenleistung bis einschließlich	Vergütung in Cent pro kWh
150 kW <sub>el</sub>	11,50
500 kW <sub>el</sub>	9,90
5 MW <sub>el</sub>	8,90
20 MW <sub>el</sub>	8,40

Quelle: eigene Darstellung nach § 8 EEG.

Die Vergütungssätze für Strom werden für neu in Betrieb genommene Anlagen für die Dauer von 20 Jahren garantiert. Für Anlagen, die den Betrieb nach dem 01.01.2005 aufgenommen haben, gilt eine jährliche Vergütungsdegression in Höhe von 1,5 %. Errichtet ein Betreiber im Jahr 2008 eine Anlage mit 150 kW elektrischer Leistung, so beträgt die Grundvergütung 10,83 Cent pro kWh bis zum Jahr 2028. Außer der Grundvergütung garantiert das EEG mit dem NawaRo-, KWK- und Technologie-Bonus zusätzliche Anreize. Diese Boni sind nicht von der Degression betroffen und wie die Grundvergütung auf 20 Jahre festgesetzt (§ 8 EEG).

Der NawaRo-Bonus gewährt Anlagen mit einer Leistung bis 500 kW<sub>el</sub> sechs Cent pro kWh und Anlagen mit einer Leistung bis 5 MW<sub>el</sub> vier Cent pro kWh, aber nur wenn die Stromgewinnung ausschließlich aus Pflanzen- und Pflanzenbestandteilen und Gülle erfolgt (ebd.).

Anlagen mit einer maximalen Leistung von 20 MW<sub>el</sub>, die zusätzlich zur Stromerzeugung auch Nutzwärme produzieren, erhalten den KWK-Bonus in Höhe von zwei Cent pro kWh (ebd.).

Der Technologie-Bonus beträgt zwei Cent pro kWh und gilt für Anlagen mit einer Leistung bis 5 MW<sub>el</sub>, die zusätzlich zur Kraft-Wärme-Kopplung Biomasse mittels thermochemischer Vergasung oder Trockenfermentation umwandeln, das zur Stromerzeugung eingesetzte

Gas aus Biomasse auf Erdgasqualität aufbereiten oder Strom mittels Brennstoffzellen, Gasturbinen, Dampfmotoren, Organic-Rankine-Anlagen, Mehrstoffgemisch-Anlagen oder Stirling-Motoren erzeugen (§ 8 EEG).

Insbesondere durch den NawaRo-Bonus war zwischenzeitlich der Anbau von Energiepflanzen für die Verwendung in BGA so lukrativ, dass teilweise eine ökonomische Vorzüglichkeit von Energiemais gegenüber der Nahrungs- und Futtermittelproduktion, aber auch gegenüber der Non-Food-Produktion, wie z.B. der Produktion flüssiger Kraftstoffe, gegeben war (BREUER u. HOLM-MÜLLER 2006: 56; siehe auch Kapitel 2.7).

Der Anwendungsbereich des § 8 des EEG gilt ebenfalls für Biogas, das in ein Gasnetz eingespeist und an einem anderen Ort, als dem Produktionsort der energetischen Nutzung zugeführt wird. Es muss hierbei ein rechnerischer Nachweis geführt werden, der sicherstellt, dass die entnommene Energiemenge dem Energiegehalt des vorher eingespeisten Biogases entspricht (MATTHIAS et al 2006: 138).

Die agrarpolitischen Rahmenbedingungen setzen im Gegensatz zu den energiepolitischen Rahmenbedingungen am Anfang der Produktionskette der Biogaserzeugung an. Im Zuge der McSharry-Agrarreform der Gemeinsamen Europäischen Agrarpolitik (GAP) wurde 1992 die obligatorische Flächenstilllegung festgelegt, um die Überproduktion im Agrarsektor zu reduzieren. Auf stillgelegten Flächen durften keine Nahrungs- oder Futtermittel angebaut werden. Der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen war allerdings gestattet. Dies führte zu geringeren Opportunitätskosten gegenüber den Marktfrüchten und folglich auch zu niedrigeren Biomassepreisen. Auf diese Weise unterstützte die GAP Reform den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen (BREUER u. HOLM-MÜLLER 2006: 56). Ab 2008 gilt jedoch EG-VERORDNUNG NR. 1107/2007, mit der die Stilllegungspflicht aufgehoben ist. Dies bringt auch Konsequenzen für den Anbau nachwachsender Rohstoffe mit sich (siehe Kapitel 2.7).

Seit 2004 können Landwirte eine Prämie in Höhe von 45 Euro pro Hektar für den Anbau von Energiepflanzen auf nicht stillgelegten Flächen erhalten. Diese Prämie ist jedoch auf 1,5 Mio. Hektar in der EU begrenzt (BMVEL 2005: 64). Die Energiepflanzenprämie erhöht die Konkurrenzfähigkeit des Energiepflanzenanbaus gegenüber dem Anbau von Marktfrüchten.

Die „Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und des Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) gewährleistete Zuschüsse, zinsvergünstigte Darlehen sowie Teilschuldenerlässe für

Biomasseanlagen zur Wärme- und Stromgewinnung, ist allerdings zum Ende des Jahres 2007 ausgelaufen (FNR 2007c: 63).

Mit der Gemeinschaftsaufgabe zur „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ fördern EU, BMELV und die Länder Investitionen zur Schaffung von Infrastrukturmaßnahmen zur dezentralen Versorgung mit erneuerbaren Energien. Dabei handelt es sich um Förderungen zur Errichtung von Nahwärme- und Biogasleitungen. Gemeinden und Landkreise bekommen bis zu 45 % und private Träger bis zu 25 % der förderfähigen Kosten erstattet (BMELV 2007: 12).

Ebenfalls im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe werden Investitionen zur Diversifizierung von Einkommensquellen in der Landwirtschaft gefördert. Investitionen in Anlagen zur Stromerzeugung die bereits eine Förderung nach dem EEG erhalten, werden mit bis zu 10 % des Investitionsvolumens, maximal jedoch mit 200.000 Euro bezuschusst. Zusätzlich wird die Restfinanzierung durch eine Ausfallbürgschaft in Höhe von 70 % der für die Gesamtfinanzierung notwendigen Darlehen abgesichert (ebd.: 20).

Die Vergabe von Sonderkrediten durch die landwirtschaftliche Rentenbank stellt eine weitere Fördermaßnahme dar. In ihrem Programm „Umweltschutz und Nachhaltigkeit“ gewährt die Bank zinsgünstige Darlehen zur Errichtung von BGA (LANDWIRTSCHAFTLICHE RENTENBANK 2008).

All diese finanziellen Anreize erhöhen direkt die finanzielle Konkurrenzfähigkeit der Energieerzeugung auf der Grundlage von Biogas gegenüber fossilen Energieträgern. Nicht minder bedeutsam sind die für Errichtung und Betrieb einer Anlage relevanten bauplanungsrechtlichen Vorgaben anzusehen.

Außer den genannten energie- und agrarpolitischen Voraussetzungen unterliegen Errichtung und Betrieb einer BGA in der BRD nämlich zahlreichen rechtlichen Vorgaben, wie Tabelle 5 auf der folgenden Seite belegt.

**Tabelle 5: Rechtliche Rahmenbedingungen für Errichtung und Betrieb einer Biogasanlage**

Baugesetzbuch (BauGB) Verordnungen über die bauliche Nutzung der Grundstücke (Baunutzungsverordnung – BauNV der Länder) Bauordnung der einzelnen Bundesländer (Landesbauordnung – BauO) Verordnungen über bautechnische Prüfungen (BauPrüfV der Länder)
Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) Gesetz zur Umsetzung der UVP-Änderungsrichtlinie, der IVU-Richtlinie und weiterer EG-Richtlinien zum Umweltschutz Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV) Feuerungsverordnungen der Länder
Verordnung EG Nr. 1774/2002 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte (EG-HygieneVO) Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz (TierNebG)
Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW- / AbfG) Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Flächen (Bioabfallverordnung – BioAbfV)
EG-Wasserrahmenrichtlinie Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushaltes (Wasserhaushaltsgesetz – WHG) Landeswassergesetze Landesverordnungen zur Umsetzung der Anhänge II und V der WRR
Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz – BNatSchG) Ländergesetze zum BNatSchG

Quelle: Eigene Darstellung nach MATTHIAS et al 2006: 139.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit kann an dieser Stelle nicht auf alle Rechtsvorschriften eingegangen werden. Es werden lediglich die für den weiteren Verlauf der Arbeit relevanten rechtlichen Rahmenbedingungen exemplarisch näher erläutert.

Maßgeblich auf Fragestellungen bezüglich der Planung und Genehmigung einer BGA wirkt sich die Zusammenstellung der Substrate aus, die in einer Anlage vergärt werden. Die Substratmenge und die daraus zu erwartende energetische Ausbeute lassen Rückschlüsse auf die Standortanforderungen der Anlage zu. Art, Menge und Herkunft der Substrate sowie die Feuerungswärmeleistung des BHKW sind entscheidende Kriterien zur Klärung der Frage nach welchem Verfahren eine Anlage genehmigt wird, d.h. ob die Anlage nach Baurecht oder nach Bundes-Immissionsschutzgesetz genehmigt wird. (MATTHIAS et al 2006: 140 u. KLINSKI 2005: 93).

Die zur Stromerzeugung aus Biogas erforderlichen Einrichtungen sind aus bauplanungsrechtlicher Sicht als gewerbliche Anlagen einzustufen, die in Gewerbe- und Dorfgebieten grundsätzlich zulässig sind (KLINSKI 2005: 95 u. §§ 5 u. 8 BauNVO). Im Außenbereich kann eine BGA als privilegierte Anlage behandelt und genehmigt werden, wenn die Vor-

aussetzungen nach § 35 Abs.1 Nr. 6 Baugesetzbuch (BauGB) vollständig gegeben sind. Hiernach muss ein räumlich-funktionaler Zusammenhang mit einem Landwirtschaftsbetrieb bestehen, die Biomasse muss überwiegend aus diesem oder aus nahe gelegenen Betrieben stammen, es darf je Betriebsstandort nur eine Anlage betrieben werden und die vorgegebene Leistungsgrenze von 500 kW<sub>el</sub> darf nicht überschritten werden. Zudem ist die Genehmigung an eine Rückbauverpflichtung gekoppelt.

Das Verfahren, nach welchem BGA zuzulassen sind, ergibt sich aus den in der vierten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes festgelegten Kriterien (4. BImSchV). Handelt es sich bei der zu genehmigenden BGA um eine Anlage, in der mehr als zehn Tonnen Abfall pro Tag eingesetzt werden, die in Zusammenhang mit einer genehmigungsbedürftigen Tierhaltungsanlage errichtet wird, die eine Güllekapazität von mehr als 2500 m<sup>3</sup> aufweist, die über eine Gesamtfeuerungswärmeleistung von mehr als einem MW verfügt oder werden dort mehr als zehn Tonnen nicht besonders überwachungsbedürftiger Abfälle gelagert, so greift das Genehmigungsverfahren nach Bundes-Immissionsschutzgesetz, ansonsten erfolgt eine Baugenehmigung nach geltendem Baurecht. Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft sind nicht dem Abfallrecht unterworfen, so dass BGA, die ausschließlich Gülle und nachwachsende Rohstoffe vergären, von Vorgaben bzgl. der Abfallgrenzen nicht betroffen sind (MATTHIAS et al. 2006: 143). Vielmehr greift hier die Gesamtfeuerungswärmeleistung der Anlage. Sie ergibt sich aus der Summe der erzeugten Energie aus Strom und Wärme. Ein MW Gesamtfeuerungswärmeleistung eines BHKW entspricht bei einem elektrischen Wirkungsgrad des Aggregats von 35 % einer elektrischen Leistung von 350 kW (ebd.: 144). Die typischerweise vorkommenden BGA zur Stromerzeugung mittels Verbrennungsmotoren sind nach dem vereinfachten Verfahren immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig, wenn die Feuerungswärmeleistung mehr als 1 MW beträgt. Dies hat auch eine standortbezogene Vorprüfung über die Bedürftigkeit einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) als Konsequenz. In der Regel ist nach den Feststellungen der UVP-Vorprüfung keine UVP erforderlich (KLINSKI 2005: 96).

Weitere immissionsschutzrechtliche Anforderungen an genehmigungsbedürftige BGA beinhaltet die Technische Anleitung Luft (TA Luft). Unter Nr. 5.4.8.6 findet sich eine wichtige Regelung bzgl. des Mindestabstands zur nächsten vorhandenen oder in einem Bebauungsplan festgesetzten Wohnbebauung, die 300 Meter nicht unterschreiten soll.

Für die Ausbringung der Gärreste ist die Düngerverordnung (DüV), sowie die Düngemittelverordnung (DüMV), jedoch nur beim Inverkehrbringen der Substrate, zu beachten. Die Düngerverordnung regelt wie Düngemittel zeitlich und mengenmäßig auszubringen sind und legt Obergrenzen für den Nährstoffeintrag fest. So dürfen Wirtschaftsdünger vom 15.

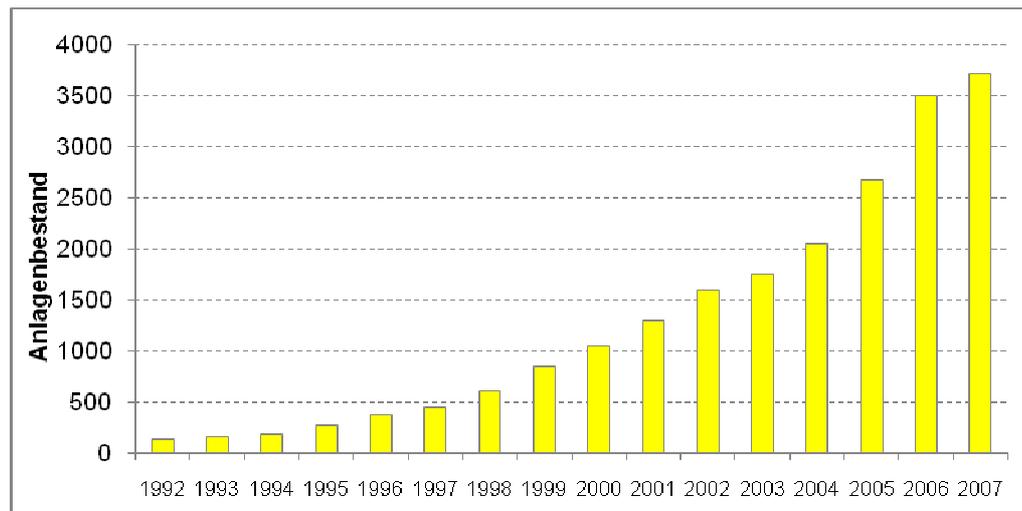
November bis zum 15. Januar nicht ausgebracht werden. Dabei dürfen die Gesamtstickstoffmengen in Höhe von durchschnittlich 170 kg je Hektar auf Ackerland bzw. durchschnittlich 230 kg je Hektar auf Grünland nicht überschritten werden (§ 4 DüV). Durch diese Obergrenzen kann bereits beim Einsatz ausschließlich betriebsinterner Substrate die Flächenverfügbarkeit des landwirtschaftlichen Betriebs limitierend auf die Verarbeitungskapazität der BGA wirken (MATTHIAS et al: 2006: 146). Wird zur Umgehung dieses Problems der Gärrest in Verkehr gebracht, d.h. findet eine Abgabe an Dritte statt, so müssen Vorschriften für die Düngemittelzulassung laut Düngemittelverordnung (DüMV) eingehalten werden.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Energieerzeugung auf Grundlage von Biogas als eine Möglichkeit der regenerativen Energieerzeugung zahlreichen Voraussetzungen unterliegt, ohne die die nachfolgend beschriebene Entwicklung des Biogasmarkts sicherlich nicht möglich gewesen wäre.

## **2.7 Aktuelle Entwicklungen auf dem Biogasmarkt**

Als Abschluss des Grundlagenkapitels sollen die aktuelle Situation des Biogasmarkts dargestellt werden, die gleichzeitig einen Hinweis auf die Relevanz der Ergebnisse dieser Diplomarbeit liefert.

In der BRD haben die erwähnten energie- und agrarpolitischen Rahmenbedingungen dazu geführt, dass die Potentiale der Biogaserzeugung verstärkt genutzt werden. Seit dem Inkrafttreten der Biomasse-Verordnung, der Einführung der Energiepflanzenprämie im Zuge der GAP-Reform, der Verabschiedung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und insbesondere durch die Novellierung des EEG im Jahr 2004 hat die Nutzung von Biogas stark zugenommen. Besonders deutlich werden die Auswirkungen der Rahmenbedingungen bei der Betrachtung des Biogasanlagenbestands. 1992 waren laut FACHVERBAND BIOGAS (2007a) in der BRD 139 Biogasanlagen in Betrieb. Zehn Jahre später betrug die Anzahl der Anlagen rund 1600. Deutliche Anstiege sind in den Jahren nach der Novellierung des EEG zu verzeichnen, was mit einer Vergütungserhöhung je eingespeister Kilowattstunde sowie der Einführung der in Kapitel 2.6 genannten Boni zusammenhängt. Waren im Jahr 2004 rund 2050 Biogasanlagen installiert, so stieg die Anzahl der Anlagen im Jahr 2005 auf 2680. Im Jahr 2006 erhöhte sich die Anzahl der Anlagen um 820 auf 3500! In diesem Zusammenhang wird oftmals vom Boom-Jahr 2006 gesprochen. Abbildung 8 stellt auf der nächsten Seite die Zuwächse im Anlagenbestand von 1992 bis Ende September 2007 dar.

**Abbildung 8: Entwicklung des Anlagenbestands der BRD von 1992 bis Sept. 2007**

Quelle: Eigene Darstellung nach Fachverband Biogas e.V. 2007a.

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, konnte 2007 die Anzahl der neuinstallierten Anlagen nur um 211 auf 3711 Anlagen steigen (Stand: 30.09.07). Dies ist eine Folge der gestiegenen Getreidepreise, die aufgrund der schlechten Ernte sowie gleichzeitig gestiegener Nachfrage im Jahr 2007 teilweise um 100 % höher ausfielen als im Vorjahr.

Der FACHVERBAND BIOGAS (2007b: 1) sieht die Biogasbranche „[...] aufgrund der massiv gestiegenen Preise für nachwachsende Rohstoffe [...] in einer schweren Krise“. Die Nachfrage nach landwirtschaftlichen BGA ist nahezu vollständig zum Erliegen gekommen, der Umsatz im Inlandsgeschäft um 50 % zurückgegangen. Nur in seltenen Fällen ist ein kostendeckender Betrieb möglich, Betreiber müssten die Leistung der Anlagen drosseln oder den Betrieb einstellen (FACHVERBAND BIOGAS 2007b: 1).

Erschwerend kommt hinzu, dass die Investitionskosten von Biogasanlagen entgegen allen Erwartungen gestiegen sind. Maßnahmen zu Wirkungsgradsteigerungen der Anlagen und Preisanstiege am Rohstoffmarkt, insbesondere bei den Stahlpreisen, sind hierfür als Hauptursachen zu nennen. Die Serieneffekte beim Komponentenbau konnten diesen Anstieg nicht aufwiegen, zumal ein großer Teil der Errichtungskosten von BGA standortspezifisch ist und daher nicht reduziert werden kann (IE 2007: 142).

Die aktuelle Situation des Biogasanlagenmarkts lässt sich wie folgt zusammenfassen. Der Betrieb von Biogasanlagen ist politisch erwünscht. Gleichzeitig führen gestiegene Rohstoffpreise zu hohen Opportunitätskosten gegenüber der Nahrungs- und Futtermittelproduktion in der Landwirtschaft. Somit sind Anbauflächen, die für nachwachsende Rohstoffe genutzt werden, einem hohen Konkurrenzdruck ausgesetzt und werden in Zukunft, bei gleich bleibenden Marktbedingungen, abnehmen. Folglich kann es zur Verknappung der zur Biogaserzeugung benötigten Rohstoffe, insbesondere der Energiepflanzen kommen.

Dies zieht Preiserhöhungen für Energiepflanzen nach sich, da das Angebot abnimmt, die Nachfrage jedoch nicht. Gleichzeitig sind die Erlöse von Biogasanlagen an feste Einspeisevergütungen gebunden, so dass der Betrieb von Biogasanlagen bei steigenden Produktionskosten schnell unrentabel werden kann. Zusätzlich dazu sind Baukosten von BGA gestiegen, so dass in Kombination mit den hohen Energiepflanzenpreisen für Betreiber von BGA ein hohes finanzielles Risiko gegeben ist.

Als Lösung der Problematik sind zwei Ansätze denkbar. Erstens, die Einspeisevergütung sowie weitere finanzielle Anreize, wie etwa Technologieboni, werden erhöht. Diese Lösung ist Gegenstand der Politik. Sie wird in Form einer erneuten EEG-Novelle voraussichtlich im Jahr 2009 in Kraft treten. Der Entwurf der Novelle wurde bereits der Öffentlichkeit präsentiert. Er sieht generell erhöhte Einspeisevergütungen vor. Hinzukommen soll ein Gülle-Bonus für Anlagen mit einer Leistung bis 150 kW. Zudem erhöht sich der Kraft-Wärme-Kopplungsbonus um 1 cent/kWh (BMU 2007b: 14 f.). Der FACHVERBAND BIOGAS (2007b: 1) betont, dass die Betreiber von Biogasanlagen dringend auf eine Anpassung des EEG an die veränderten Agrarmarktbedingungen angewiesen sind und dass das Gesetz schnellstmöglich in Kraft treten muss.

Der zweite Lösungsansatz besteht darin, Biogasanlagen möglichst groß zu dimensionieren, so dass durch economies of scale die spezifischen Kosten je installierter Leistung sinken. Jedoch steigt mit zunehmender Anlagengröße der Bedarf an Substraten und mit ihm die Größe der Einzugsradien. Häufig verwendete Substrate wie z.B. Gülle sind jedoch transportunwürdige Güter, da sie in der Frischmasse geringe Energiedichten und hohe Wassergehalte aufweisen. Hohe Transportkosten bewirken einen überproportionalen Anstieg der Substratkosten, die wiederum wesentlich zur ökonomischen Unrentabilität des Anlagenbetriebs beitragen (TOEWS 2007: 34). Folglich ist in diesem Lösungsansatz die richtige Standortwahl von hoher Bedeutung. Ein gut geplanter Standort wirkt transportkostenminimierend und erhöht somit die Rentabilität der Anlage. Die Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz ist eine sinnvolle Maßnahme zur Erhöhung der energetischen Wirkungsgrade und trägt dadurch zur Rentabilität des Betriebs bei. Für zukünftige Entwicklungen auf dem Biogasmarkt wird die novellierte Gasnetzzugangsverordnung im Rahmen des integrierten Energie- und Klimaprogramms von Bedeutung sein. Sie soll dafür sorgen, dass Biogas verstärkt in das Erdgasnetz eingespeist werden kann (BMU 2007c: 4). Auch für diese Anlagenart ist die richtige Standortwahl entscheidend, da sowohl die unmittelbare Nähe zur Erdgasleitung als auch die Nähe zu den Substraten gegeben sein muss.

Die Bestimmung von Produktionsstandorten ist ein klassisches Untersuchungsgebiet der Wirtschaftsgeographie (BATHELT u. GLÜCKLER 2003: 54). Sie bildet den theoretischen Hintergrund der vorliegenden Arbeit.

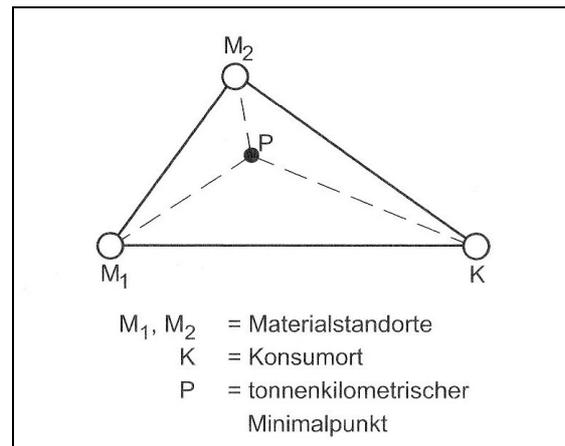
### 3. Theoretischer Hintergrund: Industrielle Standortlehre und optimale Standortwahl

Die kostenminimale Standortwahl nach WEBER (1922) bildet die theoretische Basis dieser Diplomarbeit. Abgesehen von der Kritik, die auf der ausschließlich kostenorientierten Betrachtungsweise sowie der reduzierten Grundannahmen basiert, stellt das Standortfaktorenmodell von WEBER ein Basismodell der Wirtschaftsgeographie dar, welches einen Erklärungsansatz für die räumliche Verteilung von Standorten von Industriebetrieben liefert (DICKEN u. LLOYD 1999: 77 u. BATHELT u. GLÜCKLER 2003: 125).

In seinem Werk „Über den Standort der Industrien“ definiert A. WEBER (1922: 16) den Begriff „Standortfaktor“ als „einen seiner Art nach scharf abgegrenzten Vorteil, der für eine wirtschaftliche Tätigkeit dann eintritt, wenn sie sich an einem bestimmten Ort [...] vollzieht.“ Dieser Vorteil ermöglicht es an einem Ort „ein bestimmtes Produkt mit weniger Kostenaufwand als an anderen Plätzen herzustellen“ und darüberhinaus den „Absatzprozeß eines bestimmten industriellen Produkts nach irgend einer Richtung billiger durchzuführen als anderswo“ (ebd.: 16). In seinem Modell identifiziert WEBER (1922: 34 f.) Transportkosten, Arbeitskosten und Agglomerationswirkungen als Standortfaktoren.

Die Transportkosten hängen wesentlich vom Gewicht der Güter und von der zu überwindenden Entfernung ab (ebd.: 40). Aus dem Produkt beider Elemente errechnet WEBER den Tonnenkilometer. Die Bestimmung des gewinnmaximalen Unternehmensstandorts hängt in erster Linie von der mathematischen Ermittlung des Produktionsstandorts ab, an dem „die geringsten verfahrenen Tonnenkilometer im Produktions- und Absatzprozeß als Ganzem entstehen“ (ebd.: 49). Diesen Punkt nennt WEBER den tonnenkilometrischen Minimalpunkt. Er befindet sich nicht nur in optimaler Entfernung zu den Materialstandorten, sondern auch in optimaler Entfernung zu den Konsumorten (ebd.: 54).

Angenommen für einen Produktionsprozess werden zwei verschiedene Materialien „M<sub>1</sub>“ und „M<sub>2</sub>“ benötigt und für das Produkt existiert nur ein Konsumort „K“, dann befindet sich der optimale Produktionsstandort „P“ innerhalb der Standortsfigur, in diesem Fall innerhalb eines Standortdreiecks, wie Abb. 9 verdeutlicht.

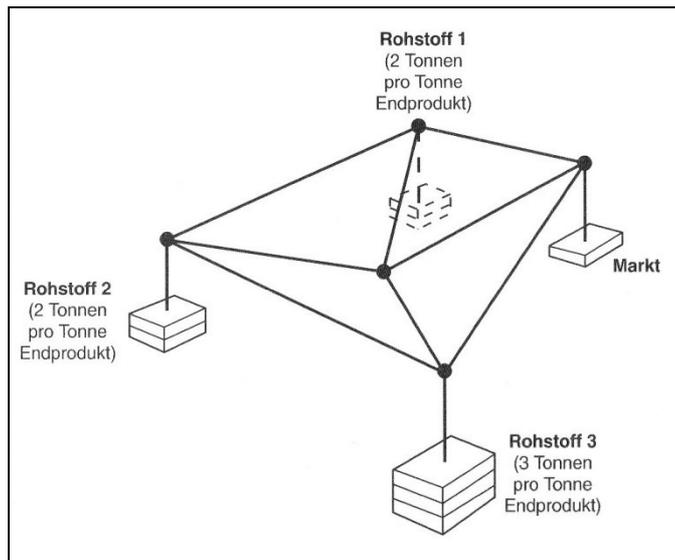
**Abbildung 9: Standortdreieck und Transportkostenminimalpunkt**

Quelle: BATHOLT u. GLÜCKLER 2003: 125.

Die genaue Lage des Produktionsstandorts „P“ ist jedoch nicht nur von der Anzahl der Materialstandorte und der Anzahl der Konsumorte sowie deren Verteilung im Raum abhängig, sondern auch von der Art des Vorkommens und der Art des Eingehendes der Rohstoffe in den Produktionsprozess (WEBER 1922: 51).

Nach WEBERs Theorie existieren ubiquitäre und lokalisierte Materialien. Während Ubiquitäten praktisch überall vorkommen, wie z.B. Luft und Wasser, sind lokalisierte Materialien „nur an geographisch scharf umrissenen ganz bestimmten Stellen“ zu finden oder werden „aus wirtschaftlichen Gründen nur an ganz bestimmten Stellen bergmännisch gehoben oder landwirtschaftlich produziert“ (ebd.: 52). Die lokalisierten Materialien teilt WEBER weiter in „Reinmaterialien“ und „Grobmaterialien“ ein. Reinmaterialien gehen mit ihrem Gesamtgewicht in das Endprodukt ein. Grobmaterialien, auch Gewichtsverlustmaterialien genannt, gehen überhaupt nicht oder nur teilweise in das Gewicht des Endprodukts ein (ebd.: 53). Beispiele für Gewichtsverlustmaterialien sind Brennmaterialien wie Kohle und Holz, anschauliche Reinmaterialien sind Edelmetalle wie Gold und Silber. Entsprechend diesen Überlegungen verschiebt sich der tonnenkilometrische Minimalpunkt, je nach Menge und Art der verwendeten Materialien. Diese Verschiebung hat WEBER (1922: 55) mit Hilfe des Varignon'schen Apparats abgebildet. Der Varignon'sche Apparat ist ein mechanisches Modell, welches die Standorte durch Knotenpunkte von Fäden darstellt, die miteinander verbunden und gewichtet sind (siehe Abbildung 10).

**Abbildung 10: Schema des Varignon'schen Apparats**



Quelle: DICKEN u. LLOYD 1999: 78

Je nach der relativen Gewichtung der Komponenten verlagert sich der tonnenkilometrische Minimalpunkt in Richtung der einzelnen Ecken der Standortfigur (WEBER 1922: 55). Aus diesen Überlegungen heraus kommt WEBER (1922: 61 f.) zu dem Ergebnis, dass Gewichtsverlustmaterialien den Produktionspunkt an sich binden können, wenn ihr Gewicht gleich oder größer als die Summe des Produktgewichts und des Gewichts der übrigen lokalisierten Materialien ist. Reinmaterialien hingegen können den Produktionsstandort nicht an ihre Lagerstätten binden. Abschließend untersucht WEBER (1922: 62 f.) wie sich der Einsatz unterschiedlicher Materialkombinationen auf die Standortbestimmung der Produktion auswirkt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 6 dargestellt.

**Tabelle 6: Einfluss von WEBERs Rohstoffarten auf den Produktionsstandort**

Rohstoffart	Standort*		
	Rohstofffundort	Intermediärer Standort	Markt
Ubiquität(en)			+
Ein Reingewichtsmaterial	=	=	=
Mehrere Reingewichtsmaterialien			+
Reingewichtsmaterial(ien) und Ubiquität(en)			+
Gewichtsverlustmaterial	+		
Gewichtsverlustmaterialien	-	#	
Gewichtsverlustmaterial und Ubiquitäten**	-	#	-
Gewichtsverlust- und Reinmaterialien	-	#	
Ubiquitäten, Gewichtsverlust- und Reinmaterialien**	-	#	-

\*: + steht für einen eindeutig festgelegten Standort, = zeigt gleichermaßen mögliche Standorte an und # deutet auf intermediäre Standorte mit Tendenz zu – an.  
 \*\*: Tendenz abhängig von der Materialmenge.

Quelle: Eigene Darstellung nach WEBER 1922: 62 ff. und DICKEN u. LLOYD 1999: 78.

Es wird deutlich, dass Betriebe, die Gewichtsverlustmaterialien verarbeiten, bei ihrer Standortwahl eher rohstofforientiert sind. Im Gegensatz dazu sind Betriebe, deren Endprodukt im Verhältnis zu den Rohmaterialien einen geringen Gewichtsverlust hat, eher marktorientiert.

Außer den Transportkosten betrachtet WEBER (1922: Kapitel 4 u. 5) in seiner Theorie Arbeitskosten und Agglomerationswirkungen als Standortfaktoren. Die regionale Differenz der Arbeitskosten und Agglomerationstendenzen stellen „ablenkende Attraktionspunkte“, d.h. das Grundnetz der optimalen Transportkostenpunkte verzerrende Faktoren dar (ebd.: 34 f.). Sie können zu einer Verlagerung des transportkostenminimalen Standorts führen.

Die Arbeitskosten werden als Standortfaktor wirksam, wenn sich das Lohnniveau in einer Region so stark unterscheidet, dass die Vorteile des optimalen Transportkostenpunktes durch die Einsparungen am optimalen Arbeitskostenpunkt aufgehoben werden. In diesem Fall werden längere Transportkosten durch niedrige Lohnkosten wettgemacht (WEBER 1922: Kapitel 4).

Agglomerationsfaktoren werden als Standortfaktor wirksam, wenn der Standort eines Unternehmens durch das Vorhandensein von anderen Unternehmen in der Umgebung beeinflusst wird. Übersteigen die Vorteile durch die Nähe zu anderen Unternehmen die negativen Auswirkungen auf Transport- und Lohnkosten, so lohnt sich die Ansiedlung im Agglomerationsraum und es kommt zu einer Konzentration von Produktionsstandorten. Mögliche Lokalisationsvorteile resultieren laut WEBER (1922: 139) aus Kosteneinsparungen aufgrund von gemeinsamen Transporten. Entstehen aus der räumlichen Nähe jedoch Nachteile, z.B. durch Konkurrenz um Rohstoffe oder Verbraucher, dann wirkt der Agglomerationsfaktor deglomerativ, was zur Streuung von Produktionsstandorten führt (WEBER 1922: Kapitel 5).

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass in WEBERs Standortbestimmungsmodell die Transportkosten als zentrale Größe gelten. Arbeitskosten und Agglomerationswirkungen hingegen haben lediglich den Charakter nachgeordneter Korrekturgrößen. Die oftmals kritisierten Ergebnisse WEBERs sind nicht allgemeingültig. Im Zeitalter der Globalisierung sind Transportkosten aufgrund des deutlichen Kostenrückgangs pro transportierter Einheit eine zu vernachlässigende Größe. Daher haben Transportkosten heutzutage eine wesentlich geringere Bedeutung als zu WEBERs Zeiten. Hinsichtlich der Standortwahl von BGA treffen die transportkostenorientierten Resultate WEBERs wegen der geringen Transportwürdigkeit der Substrate jedoch zu, wie im folgenden Kapitel detailliert aufgezeigt wird.

### 3.2 Optimale Standortwahl von Biogasanlagen

Die Theorie der kostenminimalen Standortwahl nach WEBER lässt sich auf die Standortwahl von Biogasanlagen übertragen. Die zur Biogaserzeugung benötigten Substrate sind extreme Gewichtsverlustmaterialien, deren Gewicht nur zu einem sehr geringen Teil in das Endprodukt eingeht. Folglich liegt der optimale Standort für eine Produktionsstätte, die aus Gülle und nachwachsenden Rohstoffen Strom und Wärme produziert, zwischen dem Konsumort und den Rohstofffundorten. Der optimale Standort tendiert dabei laut WEBERs Theorie in Richtung der Rohstoffe. Im Fall von BGA ist der Konsumort jedoch nicht der Ort, an dem die Produkte tatsächlich verbraucht werden, vielmehr sind die Einspeisepunkte in die entsprechenden Netze als Konsumorte zu betrachten. Die Standortwahl von BGA erhält also zusätzlich zur Transportkosten- bzw. Rohstofforientierung eine Verkehrslageorientierung. Der Transport der Produkte Strom, Wärme und Biomethan ist an spezielle Verkehrsträger gebunden. Dies sind Stromnetz sowie Nah- oder Fernwärmenetz. Zur Einspeisung von Biomethan ist die Nähe zum Erdgasnetz bedeutsam.

Bei der praktischen Umsetzung stellt sich die Frage inwiefern sich die Rohstofffundorte und die Konsumorte auf den optimalen Standort auswirken. Die maximal mögliche Transportstrecke zur Beförderung der Gärsubstrate hängt von der Höhe der Einspeisevergütung ab. Einer Studie des WUPPERTAL INSTITUTs (2006: 16 f.) zufolge kann Gülle aufgrund der geringen Energiedichte möglichst nicht, höchstens jedoch fünf bis zehn km weit transportiert werden. Substrate aus NawaRos können aufgrund der höheren Energiedichte 15 bis 20 km weit transportiert werden (WUPPERTAL INSTITUT 2006: 16 f.). Nähe zum Stromnetz und zu Wärmeleitungen bzw. zu Wärmeabnehmern sollte ebenfalls gegeben sein. Der maximale Abstand zur Gasleitung beträgt unter den aktuellen Rahmenbedingungen 800 m. Der Abstand ist wegen der hohen Unterhaltungskosten der Zuleitung zum Gasnetz entsprechend gering (BÖSS 2008). Zur Ermittlung der Gewichtungen der einzelnen Komponenten entsprechend WEBERs Ansatz wird im Analysekapitel (Kapitel 5.3) näher eingegangen.

Vorläufig ist auch ohne Bestimmung der Gewichtungen zu schlussfolgern, dass der optimale Produktionsstandort für Biogas in der Nähe der Materialfundorte, d.h. im ländlichen Raum liegt. Gleichzeitig muss aber die Nähe zu Strom- und Wärmeleitungen gegeben sein. Für den Fall, dass Biomethan produziert und ins Gasnetz eingespeist wird, ist die unmittelbare Nähe zur Gasleitung wichtig.

Der zweite Standortfaktor nach WEBER, die Arbeitskostendifferenzen spielen BGA keine Rolle. Der Betrieb einer BGA ist stark mechanisiert und ein Arbeitsaufwand entsteht lediglich bei Beschickungs-, Wartungs- und Kontrollvorgängen. Dieser Aufwand beträgt z.B. für

eine mittelgroße Anlage mit 300 kW Leistung drei Stunden pro Tag und macht somit rund 4,5 % der Gesamtkosten der Anlage aus (KEYMER u. REINHOLD 2006: 208). Selbst wenn die Arbeitskostenunterschiede regional sehr unterschiedlich wären, ist ihre geringe Bedeutung im Vergleich zur Bedeutung der Transportkosten zu berücksichtigen. Somit sind Arbeitskosten und die darauf basierende Standortorientierung eine zu vernachlässigende Größe.

Agglomerationswirkungen hingegen sind für die Standortwahl von BGA bedeutsam. Durch die Ballung von BGA sind aufgrund von Rohstoffkonkurrenz Agglomerationsnachteile zu erwarten. Befinden sich mehrere Anlagen in unmittelbarer Nähe zueinander, so ist der Substratbedarf in der unmittelbaren Umgebung entsprechend höher. Dies kann dazu führen, dass in der Nähe der Anlagen nicht genügend Flächen zur Energiepflanzenproduktion und Gülle zur Verfügung stehen und aus weiter entfernten Gebieten antransportiert werden müssten. Aufgrund der hohen Transportkostenrelevanz und aus energetischen Gründen ist der Transport von Substraten über längere Distanzen jedoch nicht möglich.

Als Schlussfolgerung und Übertragung der WEBER'schen Theorie auf den Spezialfall der Bestimmung optimaler Standorte für BGA bleibt festzuhalten, dass bei der folgenden Standortbestimmung eine besonders hohe Bedeutung der Transportkosten gegeben ist und das sowohl auf der Input- als auch auf der Outputseite. Somit ist für BGA ein intermediärer Standort zu bevorzugen, der zwischen den Transportleitungen für die Produkte und den Substratfundorten liegen sollte, die gleichzeitig als Ausbringungsflächen für die Gärrückstände dienen. Biomethan-Anlagen sind stärker an die Nähe zum Gasnetz als an die Nähe zu den Substraten gebunden.

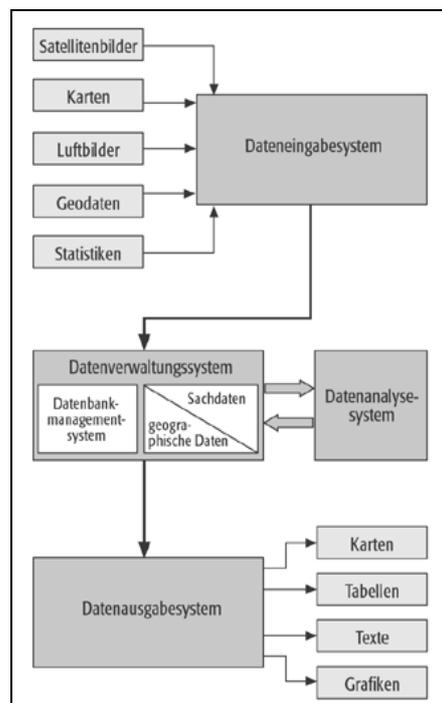
Zur Bestimmung optimaler Standorte von BGA sind zusätzlich zu den Transportkosten auch Agglomerationswirkungen als Standortfaktor relevant. Wegen der Rohstoffkonkurrenz muss auf eine sinnvolle Verteilung der Anlagenstandorte geachtet werden, damit eine vollständige Substratversorgung für jede Anlage gewährleistet ist. Dieses Konkurrenzverhältnis kann insofern beachtet werden, als dass innerhalb der einzelnen Einzugsgebiete nur die vorzüglichen Anbauflächen bzw. die verfügbaren viehhaltenden Betriebe zur Bestimmung der Substratpotentiale berücksichtigt werden.

### **3.3 GIS und Multikriterienanalysen**

Die folgenden Standortanalysen erfolgen unter Zuhilfenahme eines geographischen Informationssystems (GIS). Ein GIS ist ein „rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software, Daten und den Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfasst, gespeichert, verwaltet, aktualisiert, analysiert und modelliert sowie alpha-nummerisch und graphisch präsentiert werden“ (DE LANGE 2002: 310). Laut dieser Defi-

nition besteht ein GIS aus den vier strukturellen Komponenten Hardware, Software, Daten und Anwendungen und es erfüllt vier Funktionen, nämlich die Erfassung, Verwaltung, Analyse und Präsentation von raumbezogenen Daten. Raumbezogene Daten, auch Geodaten genannt, stellen Objekte dar, die geometrische, topologische, thematische und zeitliche Informationen besitzen (DE LANGE 2002: 193). Die Beziehungen zwischen der Funktionsweise und den Komponenten eines GIS lässt sich anhand von Abbildung 9 erläutern, wobei die Abbildung auch die Datenströme innerhalb des Systems, symbolisiert durch Pfeile, illustriert.

**Abbildung 9: Komponenten eines GIS**



Quelle: CHRISTIANSEN u. ERB 2001.

Ausgangspunkt zur Nutzung eines GIS ist die Dateneingabe. Analoge Daten müssen, damit sie maschinenlesbar werden, in digitale Form konvertiert werden. Dieser Digitalisierungsvorgang kann mittels Scanner, Digitalisiertablett, PC-Maus, Tastatur oder sonstigen Eingabegeräten erfolgen. Dabei werden Vorlagen wie z.B. Karten, Luftbilder oder Satellitenbilder, aber auch Sachinformationen wie bspw. Statistiken in maschinenlesbare Form umgewandelt. Digitale Daten können direkt eingelesen werden. Liegen die räumlichen Daten in maschinenlesbarer Form vor, können sie mit Hilfe einer Datenbank und eines Datenbankmanagementsystems abgespeichert und verwaltet werden. An dieser Stelle sei auf die Besonderheit von Geodaten hingewiesen, die neben den reinen „geographischen“ Daten auch „Sachdaten“ enthalten.

Zu den „geographischen“ Daten zählen Informationen über Geometrie und Topologie von Objekten. Angaben über Lage, Form und Ausdehnung der Objekte sind geometrische Informationen, topologische Informationen schließen räumliche Beziehungen von Geoobjekten zueinander ein (DE LANGE 2002: 161). „Sachdaten“ beinhalten thematische Informationen und können außerdem eine zeitliche Variabilität aufweisen (ebd.: 157).

Das Datenverwaltungssystem ermöglicht Such-, Klassifizierungs- und Sortieroperationen sowie die Ableitung neuer Daten aus den vorhandenen Geodaten. Die vom System verwalteten Daten können unter Zuhilfenahme zahlreicher Funktionen analysiert werden. Die Datenanalyse ist das Hauptmerkmal eines GIS. So können mit einem GIS Nachbarschaftsbeziehungen von Geodaten untersucht, Entfernungen berechnet oder Flächen, die eine bestimmte Kombination von Attributwerten aufweisen, abgeleitet werden. Im Endeffekt können diese Verfahren auch in „analoger“ Arbeitsweise durchgeführt werden. Der wesentliche Vorteil eines GIS-Einsatzes liegt jedoch darin, dass die erwähnten Verfahren relativ schnell auf eine große Fläche und somit eine große Datenmenge angewendet werden können. Darüberhinaus folgt die Bearbeitung klar definierter Algorithmen und bietet somit den Vorteil einer leichteren Überprüfbarkeit der erzielten Ergebnisse (SAURER u. BEHR 1997: 137 f.). Zudem ist die Reproduzierbarkeit, z.B. bei der Übertragung einer Analyse auf einen anderen Raumausschnitt, sowie die Modifikation der Analyse, z.B. durch Änderung der Faktoren, im GIS wesentlich schneller und komfortabler realisierbar als „von Hand“.

Ist eine Analyse durchgeführt worden, besteht oftmals die Notwendigkeit die Ergebnisse zu präsentieren. Dazu dient das Datenausgabesystem, welches neben der professionellen Gestaltung von Karten auch die Darstellung von Tabellen, Statistiken, Texten und Grafiken ermöglicht, die anschließend in digitaler Form oder analog als Ausdruck Verwendung finden.

Hat ein Anwender zur Lösung eines Problems alle beschriebenen GIS-Komponenten genutzt, so kann davon ausgegangen werden, dass er eine räumliche Analyse durchgeführt hat. Eine Dateneingabe mit anschließender kartographischer Ausgabe erfüllt hingegen nicht die Bedingungen, die an eine räumliche Analyse gestellt werden.

Hinter dem Stichwort Analyse geographischer Daten stecken jedoch verschiedene Verfahren. Grundsätzlich basieren GIS-Analysen darauf, dass die im Datenbestand nur implizit vorhandenen Informationen durch geeignete Verfahren für die Fragestellung nutzbar zu machen. Dabei dient als zentrale Funktion die Bestimmung von Verteilungsmustern und Beziehungen im Raum (ebd.: 136).

Die Verfahren, die hierfür in Frage kommen, lassen sich laut SAURER u. BEHR (1997: 136) in drei Gruppen einteilen:

- Überlagerungstechniken und geometrisch-topologische Operationen;
- statistische Analysen und Modellierung von Objekten (deskriptive Modellierung);
- Modellierung von Prozessen (prognostische Modellierung).

Zur Standortbestimmung sind insbesondere Überlagerungstechniken geeignet. Bei diesem Overlay-Verfahren kommt es zur Ableitung neuer geometrischer Informationen auf der Grundlage bereits vorhandener Daten. Auf diese Weise entstandene Teilflächen erfüllen gemeinsam mit ihren verknüpften Attributen mehrere Bedingungen gleichzeitig. Die Auswahl und Kombination der Bedingungen bestimmt, ob ein Gebiet für eine bestimmte Nutzung geeignet ist. Diese Art der synchronen Betrachtung zahlreicher Datenebenen nennt man Multikriterienanalyse (ebd.: 143).

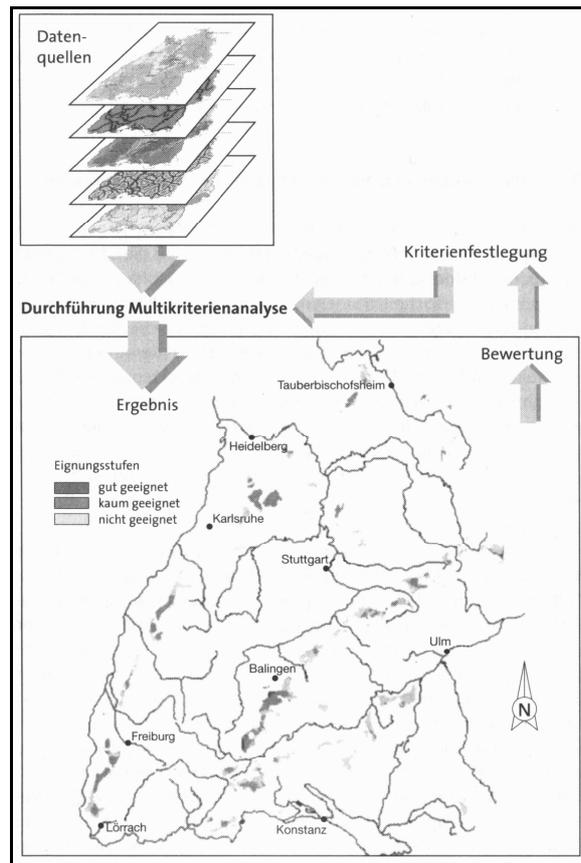
Multikriterienanalysen können zur Klärung zahlreicher Standortfragen herangezogen werden. Sie können Antworten liefern auf Fragen wie z.B.:

- Wo befinden sich geeignete Bereiche zur Ausweisung von Neubaugebieten?
- Welche Landschaftsteile können zu Naturschutzgebieten erklärt werden?
- Welche Standorte sind für eine Deponie geeignet?
- Wo ist es sinnvoll Windkraftanlagen zu errichten?

Multikriterienanalysen erleichtern nicht nur Planern und Unternehmern die Standortsuche. Der Einsatz dieser Analyseverfahren erhöht auch die Transparenz und Plausibilität der getroffenen Standortentscheidung.

Den grundsätzlichen Ablauf einer Multikriterienanalyse am Beispiel der Bestimmung möglicher Deponiestandorte verdeutlicht Abbildung 11 auf der nächsten Seite.

**Abbildung 11: Multikriterienanalyse zur Bestimmung möglicher Deponiestandorte**



Quelle: SAURER u. BEHR 1997: 144.

Ausgangspunkt ist die Klärung der Frage, welche Anforderungen der betrachtete Raum für eine bestimmte Nutzung erfüllen soll. Dazu müssen Kriterien, die für die Fragestellung relevant sind, festgelegt werden. Im Fall des Beispiels wären sinnvolle Kriterien u.a. große Entfernungen zu Gewässern, geringe Entfernungen zu Verkehrswegen und Vermeidung von Natur- und Wasserschutzgebieten. Darüberhinaus müssen konkrete Werte für einige der Kriterien, wie z.B. die genauen Entfernungen bestimmt werden.

Aus der Kriterienauswahl ergibt sich die Notwendigkeit zur Beschaffung der entsprechenden Geodaten, die die identifizierten Informationen enthalten. Sind diese Daten nicht verfügbar, so besteht die Möglichkeit diese selbst zu erheben oder die Kriterienauswahl zu verändern. Sobald alle Kriterienwerte bekannt und alle Daten vorhanden sind, kann die eigentliche Analyse durchgeführt werden.

Bei der Ausführung der Analyse sollte berücksichtigt werden, dass die einzelnen Faktoren unterschiedliche Bedeutungen für die Standortwahl haben und dass sie deshalb unterschiedlich gewichtet werden sollten. So ist möglich, dass in dem genannten Beispiel aus Gewässerschutzgründen die Entfernung zu Gewässern wichtiger ist als die Nähe zu Verkehrswegen. Die einzelnen Kriterien „Nähe zu Verkehrswegen“ bzw. „Entfernung zu Ge-

wässern“ sind entsprechend zu gewichten. Zur Definition der Gewichtungen kann, je nach Komplexität der Fragestellung, Expertenwissen notwendig sein. Nur so ist gewährleistet, dass inhaltlich haltbare Ergebnisse abgeleitet werden. Nachdem die Gewichtungen festgelegt wurden, sind die einzelnen Datenebenen miteinander zu kombinieren. Damit eine Kombination der Daten überhaupt logisch möglich wird, muss auf evtl. auftretende unterschiedliche Datenniveaus geachtet und diese nach dem Prinzip des kleinsten gemeinsamen Nenners auf ein Niveau gebracht werden (siehe auch Kapitel 4.2). Stehen Gewichtungen und Datenniveaus fest, kann die eigentliche Analyse erfolgen. Dabei entstehen neue geometrische Flächen mit neuen Attributwerten. Aus diesen Informationen wird als Ergebnis der Analyse eine Standorteignungskarte erzeugt (SAURER u. BEHR 1997: 143 ff.). Das Ergebnis der Analyse ist jedoch keineswegs als endgültig anzusehen, es muss vielmehr überprüft werden.

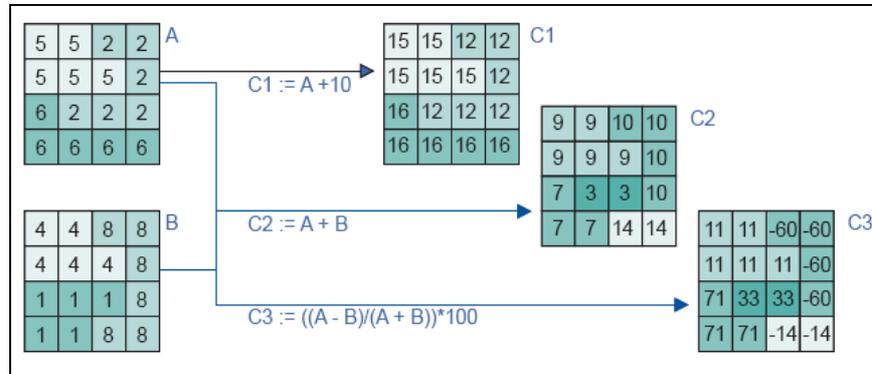
Bei der Bewertung der erzielten Ergebnisse wird deutlich, ob sie der Realität entsprechen und ob die Ergebnisse hinreichend differenziert sind. Die Überprüfung kann sich auf die Kriterienfestlegung auswirken oder zur Modifizierung der Gewichtungsfaktoren führen. Gleichzeitig kann die Veränderung der Kriterien zur Szenariobildung genutzt werden.

Je nach Fragestellung der geplanten Analyse finden im GIS bevorzugt Vektor- oder Rastermodelle Verwendung, was sich auf die verschiedenen Algorithmen dieser beiden Datenmodelle zurückführen lässt. Bestimmte Analyseverfahren können in einem Modell ungenau und von der Rechner- und Speicherleistung her enorm speicherintensiv, komplex und aufwendig sein, im anderen Format hingegen können sie dagegen leicht realisierbar sein. Sollen Netzwerkdaten wie z.B. Verkehrswege dargestellt und analysiert werden, so ist das Vektordatenmodell zu bevorzugen, da z.B. Fließbewegungen oder Routenanalysen in diesem Format leichter zu modellieren sind als im Rasterformat. Das Vektormodell eignet sich aufgrund der hohen Genauigkeit und Eindeutigkeit für das Vermessungs- und Katasterwesen, zur Infrastrukturplanung sowie generell für großmaßstäbige Untersuchungen (DE LANGE 2002: 325 f.). Für die kleinmaßstäbige Bearbeitung flächenhafter Erscheinungen hingegen ist die Rasterdarstellung der Vektordarstellung vorzuziehen. (SAURER u. BEHR 1997: 139 f.).

Grundlage des Rastermodells ist die Rasterung der räumlichen Daten mit fester Rasterweite sowie vereinbarter Orientierung und Lage des Ursprungs (DE LANGE 2002: 322). Jeder Rasterzelle ist dabei ein Datenbankeintrag zugeordnet. Die einfache Datenstruktur des Rastermodells und die Lagegenauigkeit der einzelnen Raster ermöglichen u. a. eine schnelle und einfache Anwendung logischer und algebraischer Operationen. So können mehrere Informationsebenen wie Faktoren einer mathematischen Gleichung logisch mit-

einander verknüpft oder zur arithmetischen Berechnung neuer Attribute herangezogen werden, wie Abbildung 12 veranschaulicht.

**Abbildung 12: Beispiele arithmetischer Operationen im Rastermodell**



Quelle: DE BY et al. 2004: 353.

Somit ermöglicht das Rastermodell eine simultane und schnelle Berechnung von z.B. Entfernungen und Korridoren. Auch Verschneidungen von mehreren Informationsebenen sind problemlos möglich, solange sich die Datenniveaus gleichen. All diese Operationen sind für komplexe Analysemodelle unerlässlich, so dass die folgende Analyse im Rastermodell stattfindet.

## 4 Methodik und Softwareeinsatz

Die Bestimmung optimaler Standorte von BGA ist eine komplexe Aufgabe, bei der es eine Vielzahl von ökologischen, ökonomischen und sozialen Faktoren zu berücksichtigen gilt. Zwar ist die Nutzung von Biogas politisch gewollt und aus Klimaschutzgründen sinnvoller als die Nutzung fossiler Energieträger, dennoch können unter Umständen zahlreiche Hemmnisse die Realisierung eines Bauprojekts verhindern. Anwohner befürchten ein gestiegenes Verkehrsaufkommen, sowie Geruchs- und Lärmemissionen. Die Betreiber von BGA sind Investitions- und Betriebskosten ausgesetzt, die sie durch eine möglichst hohe Auslastung der Anlage erwirtschaften müssen. Gleichzeitig soll der Betrieb keine oder möglichst geringe negative Umweltauswirkungen mit sich bringen. Vor dem Hintergrund dieses Spannungsfeldes soll eine Methode entwickelt werden, um optimale Standorte für die Errichtung und den Betrieb von BGA zu identifizieren. Als Endprodukt soll eine Standorteignungskarte entstehen, auf deren Grundlage weitere Entscheidungsschritte getätigt werden können.

Die Vielzahl der Faktoren sowie die Ausdehnung des Untersuchungsraums bedingt eine Fülle an Daten, die ohne Einsatz eines GIS nicht oder zumindest nicht in dem Umfang und mit der Geschwindigkeit analysiert werden könnte. SAURER und BEHR (1997: 196) betonen: „Mit Hilfe des Werkzeuges GIS sollen [...] Forschungsfragen effizienter untersucht oder überhaupt erst behandelt werden können.“ Die angestrebte Multikriterienanalyse erfolgt daher unter Zuhilfenahme eines GIS. Als Software kommt dabei das inzwischen weit verbreitete „ArcMap 9.2“ mit der Erweiterung „Spatial Analyst“ der Firma Environmental Systems Research Institute Incorporated (ESRI) zum Einsatz. Diese hybride GIS-Software ist in der Lage sowohl Vektor- als auch Rasterdaten zu verarbeiten. Aufgrund der im vorherigen Kapitel genannten Vorteile erfolgt die Analyse im Rasterformat. Außerdem ist mit dem integrierten „ModelBuilder 9.2“ eine Komponente in dieser GIS-Software enthalten, die es ermöglicht einzelne Datenverarbeitungsschritte komfortabel in ein Modell einzubauen. Das Berechnen der optimalen Standorte ist somit beliebig oft reproduzierbar, wobei die Inputvariablen eines einmal errechneten Raummodells recht einfach modifiziert werden können. Dies führt zu alternativen Ergebnissen. Folglich eröffnet sich die Möglichkeit Auswirkungen von veränderten Rahmenbedingungen auf die Eignung von Standorten darzustellen. Diese Möglichkeit soll insofern ausgenutzt werden, als dass in der folgenden Analyse Szenarios erstellt und ihre Folgen für potenzielle Standorte von Biogasanlagen dargestellt werden. So ist es sicherlich von Interesse zu sehen wie sich veränderte agrar- und energiepolitische Rahmenbedingungen auf potentielle Standorte von Biogasanlagen in einer Region auswirken. Bevor die Analysen und Szenarien in einem Untersuchungsgebiet errechnet werden, soll anhand einer vereinfachten Modellregi-

on das methodische Vorgehen erprobt werden. Dazu werden zunächst in Frage kommende Kriterien, die sich auf die Standortwahl von BGA auswirken können, identifiziert. Die Auswahl der Kriterien wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

#### 4.1 Kriterienfestlegung

Die Identifikation unterschiedlicher Kriterien, die einen potentiellen Standort für eine BGA bestimmen, stellt den ersten methodischen Schritt der Analyse dar. Sie erfolgt in Anlehnung an eine ähnliche, von MA et al. (2005: 592 ff.) aufgestellte Kriterienauswahl, wird jedoch um zusätzliche Überlegungen erweitert.

Mögliche Kriterien, die bei der Errichtung und beim Betrieb von BGA in Frage kommen sind in Tabelle 7 aufgeführt. Es wird zwischen restriktiven (harten) Faktoren und selektiven (weichen) Faktoren unterschieden.

**Tabelle 7: Restriktive und selektive Faktoren**

<b>Restriktive Faktoren</b>	<b>Selektive Faktoren</b>
Hangneigung >15 %	Stromleitungen
Wald	Gasleitungen*
Wasserflächen	Verkehrswege
Überschwemmungsgebiete	Betriebe mit Rindvieh*
Wasserschutzgebiete	Ackerland*
Naturschutzgebiete	Landwirtschaftliche Flächen
Verkehrswege	
Bebaute Gebiete	
Stromleitungen	
Gasleitungen	
Die mit * gekennzeichnete Faktoren sind abhängig von der Anlagenart.	

Quelle: eigene Darstellung, verändert und ergänzt nach MA et al 2005: 596 f.

Die restriktiven Faktoren beschränken die Auswahl der Standorte insofern, als dass sie eine Ausschlussfunktion haben. Innerhalb der restriktiven Objekte sollen keine BGA errichtet werden. Dies gilt für Wald- und Wasserflächen, für Schutzgebiete, sowie für Infrastruktur- und Bebauungsflächen. Auch die unmittelbare Bebauung bestehender Leitungen sollen aus Sicherheitsgründen vermieden werden. Steile Hänge stehen wegen hoher Baukosten ebenfalls nicht für die Errichtung einer BGA zur Verfügung.

Selektive Faktoren wirken sich in vielerlei Hinsicht auf die Standortwahl aus. Nähe zu diesen Faktoren wirkt begünstigend auf einen potenziellen Standort. Je näher Strom- und Gasleitung sowie Verkehrswege zum potentiellen Standort liegen, desto geringer sind die Erschließungskosten und im Fall der Gasleitung auch die laufenden Kosten für die Einspeisung des Biomethans.

Die Nähe einer BGA zu rindviehhaltenden Betrieben, zu Ackerflächen auf denen der Anbau von Energiemais gegenüber anderen Marktfrüchten vorzüglich ist, sowie geringe Entfernungen zu landwirtschaftlichen Flächen, die zur Ausbringung der Gärrückstände geeignet sind, wirken sich positiv auf den Standort aus, da Gülle und Mais starken Transportkostenrestriktionen unterliegen.

Zudem ist die Größe der Anbauflächen und der tierhaltenden Betriebe relevant, da aus diesen Kennzahlen die Substraterträge bestimmt und somit auch die Verfügbarkeit der Substrate innerhalb der Einzugsradien der BGA abgeschätzt werden kann. Schließlich sind für den Einsatz in einer BGA Mindestsubstratmengen notwendig, die wiederum von der Leistung der Anlage abhängen. Es macht aus ökonomischer Sicht keinen Sinn eine BGA in einem landwirtschaftlichen Anbaugbiet zu bauen in welchem kaum Flächen für den Anbau von NawaRo verfügbar sind und in dem nur wenige Rinder gehalten werden, da sich die Substratverfügbarkeit direkt auf die Anlagenleistung und somit auch die Größe der Anlage auswirkt. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist insbesondere unter den aktuellen Rahmenbedingungen aber erst ab einer gewissen Anlagengröße gegeben. Daher ist nicht allein die Ermittlung der Substratstandorte, sondern auch die Untersuchung der verfügbaren Stoffmengen für haltbare Analyseaussagen von Bedeutung.

Um die Beschreibung der Analysemethodik anschaulich zu gestalten, werden zunächst keine genauen Entfernungs- und Mengenangaben der einzelnen Kriterien festgelegt. Auch die Gewichtungen sollen vorerst nur grob definiert werden. Diese Arbeitsschritte sollen erst nach der Methodenentwicklung erfolgen, die wegen der vereinfachten räumlichen Gegebenheiten innerhalb einer selbst gestalteten Modellregion als Versuchsdurchlauf angesehen wird.

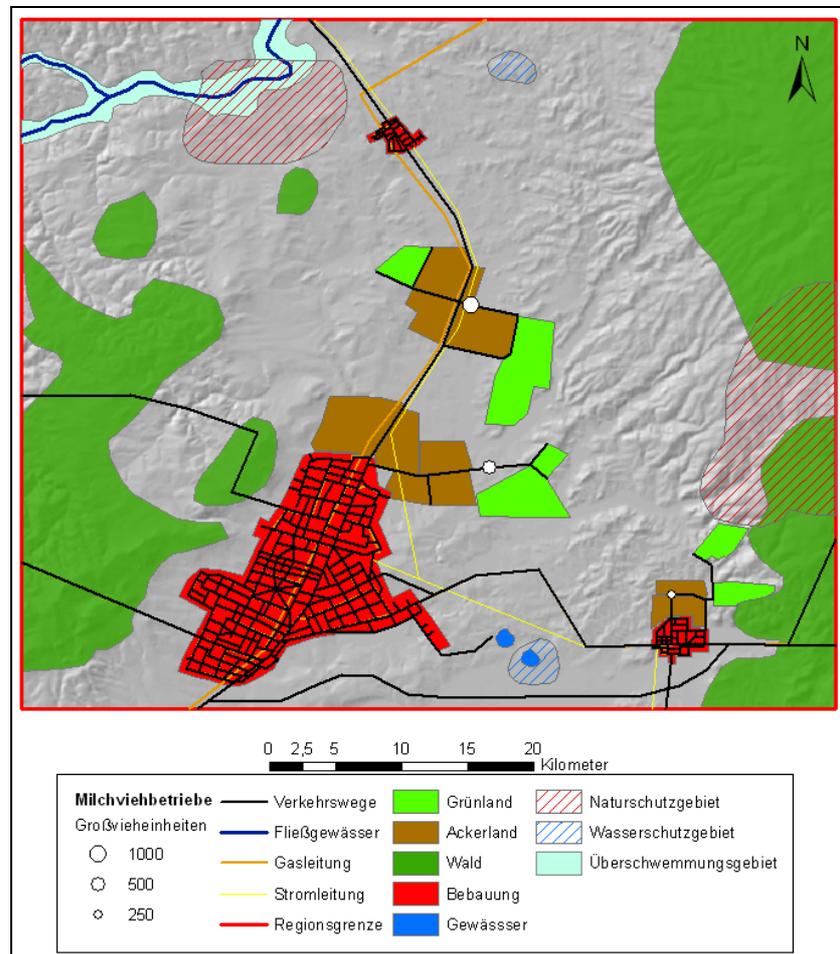
## 4.2 Methodenentwicklung

Nachdem die zur Standortbestimmung relevanten Faktoren feststehen, besteht der nächste methodische Schritt darin diese Faktoren zur Bestimmung von optimalen Standorten zu verwerten. Es gilt eine Methode zu entwickeln, mit deren Hilfe optimale Standorte von BGA ausfindig gemacht werden können. Zudem soll die Methode verschiedenen variablen Anforderungen genügen. Die Methodenentwicklung erfolgt unter vereinfachenden Annahmen anhand einer Modellregion. Die Methodik soll später auf ein real existierendes Untersuchungsgebiets angewendet und anhand der erzielten Berechnungsergebnisse bewertet werden.

Die Entwicklung der Methode zur Bestimmung von optimalen Anlagenstandorten erfolgt der Anschauung halber in einer Modellregion. Die Modellregion ist frei erfunden, wobei die räumlichen Gegebenheiten unter Zuhilfenahme von Editierfunktionen im GIS digitalisiert

wurden. Die Ausdehnung der Region beträgt rund 62 mal 52 km. Die Fläche beträgt 322.400 ha. Abbildung 13 stellt die Gegebenheiten des Modellgebiets dar.

**Abbildung 13: Modellregion**



Quelle: eigene Darstellung.

In der Region befinden sich mehrere Restriktionsflächen wie zum Beispiel bebaute Flächen als auch Schutzgebiete und Infrastruktur. Ein Verkehrsnetz sowie Gas- und Stromleitungen sind ebenfalls vorhanden. Es wird unterstellt, dass die Verkehrswege gleichartig sind und die Einspeisung von Strom und Gas grundsätzlich an jeder Stelle der vorhandenen Leitungen erfolgen kann.

Darüberhinaus existieren in der Modellregion drei Milchviehbetriebe mit unterschiedlichem Viehbestand. Der südlichste Betrieb umfasst 250 Großvieheinheiten (GVE), der nördlichste 1000. Dazwischen befindet sich ein mittelgroßer Betrieb mit 500 GVE. Das rund 10.900 ha umfassende Ackerland steht für den Energiepflanzenanbau zur Verfügung. Zusammen mit dem Grünland dient das Ackerland zur Ausbringung der Gärrückstände. Es befinden sich in der Region weitere Ackerflächen, auf denen der Anbau von Energiemais nicht möglich ist. Daher sind diese Flächen nicht im Gebietsmodell enthalten.

Alle genannten Gegebenheiten sind bis auf das digitale Geländemodell (DGM) frei erfunden. Bei dem Geländemodell handelt es sich um das DGM 25 von Teilen der mittelhessischen Wetterau. Das DGM wurde vom Sonderforschungsbereich 299 „Landnutzungskonzepte für periphere Regionen“ zur Verfügung gestellt. Der Einsatz des vorhandenen DGM erübrigt die aufwendige Generierung eines fiktiven DGM, wobei reales und fiktives DGM für die Erarbeitung der Methode gleiche Aussagekraft haben. Abbildung 13 enthält als Hintergrund eine Schummerung des DGM.

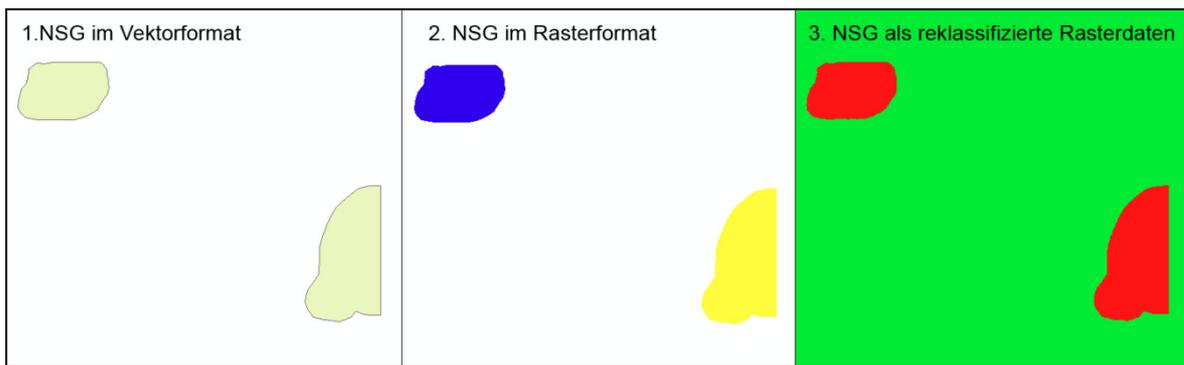
Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die dargestellten Geoobjekte auf vereinfachenden Annahmen basieren, anhand derer lediglich das Vorgehen beim Modellaufbau erprobt werden soll, bevor es mit „realen“ Daten zur Anwendung des so entwickelten Modellierungsvorgangs auf die Wirklichkeit kommt.

Nachdem die Kriterien identifiziert und die entsprechenden Daten ins GIS eingegeben wurden, stellt sich an dieser Stelle die Frage, wie die vorhandenen Informationen zu handhaben sind, um aus ihnen eine Standorteignungskarte zu erstellen. Die zahlreichen Datenebenen müssen so miteinander kombiniert werden, dass als endgültiges Ergebnis nur noch eine Ebene mit sämtlichen relevanten Informationen bestehen bleibt.

Betrachtet man zuerst die restriktiven Faktoren, so wird deutlich, dass BGA nur außerhalb der Restriktionsflächen errichtet werden können. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Datenstruktur nicht kompatibel zueinander ist und einiger Bearbeitung bedarf, bevor sie für die Analyse verwendet werden kann.

Liegen die Daten im Vektorformat vor, wie es in der Modellregion für alle Daten bis auf das DGM der Fall ist, muss eine Konversion in das Rasterformat erfolgen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Rasterweite bei allen Datenebenen einheitlich ist. Entsprechend der Rasterweite des DGM beträgt sie für die Analysen in der Modellregion 20 mal 20 m.

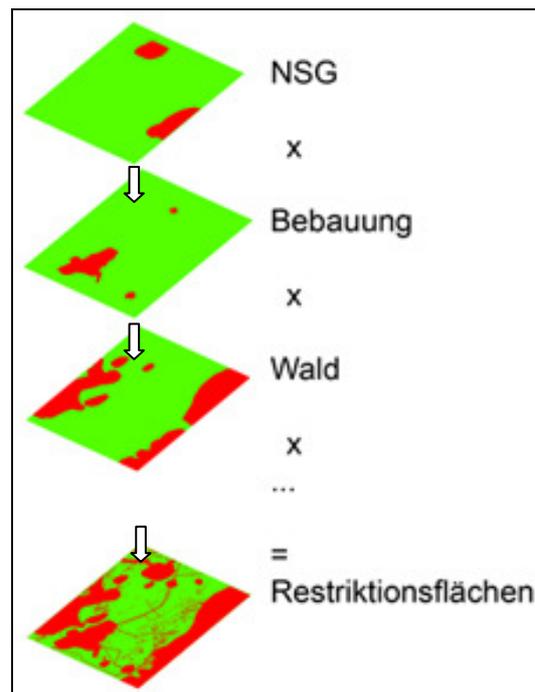
Nach der Konversion findet für jede Datenebene eine Reklassifizierung der Wertebereiche statt, so dass sämtliche Restriktionsflächen den Wert „0“ (ungeeignet) und alle anderen Flächen den Wert „1“ (geeignet) erhalten. Die genannten Vorgänge seien am Beispiel der Naturschutzgebiete (NSG) unter Zuhilfenahme von Abbildung 14 illustriert.

**Abbildung 14: Konversion und Reklassifizierung einer Datenebene**

Quelle: Eigene Darstellung.

Erstens, die NSG liegen als Vektordaten im GIS vor. Zweitens erfolgt die Konversion der Daten ins Rasterformat. Alle Rasterzellen, die sich innerhalb des nördlichen Gebiets (hier blau dargestellt) befinden, erhalten bei der Konversion von der GIS-Software automatisch den Wert 0. Alle Zellen, die innerhalb des östlichen Gebiets (hier gelb gefärbt) liegen, bekommen den Wert 1 zugewiesen. Alle übrigen Rasterzellen (weiße Flächen) enthalten keine Informationen und werden von der GIS-Software als „NoData“ deklariert. Erst der dritte Schritt, die Reklassifizierung der Rasterdaten führt zum gewünschten Ergebnis. Alle Zellen, denen die Information „NoData“ zugewiesen ist, erhalten den neuen Wert „1“ (grün dargestellt), alle Zellen, die einen Wert besitzen, erhalten den neuen Wert „0“ (rote Flächen).

Die Konversion und Reklassifizierung findet für alle Datenlayer, die restriktive Faktoren enthalten, statt. Abschließend werden all diese Layer zu einem „restriktiven Endlayer“ multipliziert (Abbildung 15).

**Abbildung 15: Multiplikation restriktiver Datenlayer**

Quelle: Eigene Darstellung.

Ist in einer Eingangsebene eine Zelle mit dem Wert „0“ enthalten, folgt für den Endlayer, dass an dieser Stelle eine Restriktionsfläche vorliegt, da eine Multiplikation mit „0“ immer „0“ ergibt. Das Ergebnis der Multiplikation aller Datenebenen miteinander ist eine neue Datenebene, deren Rasterzellen nur zwei Werte enthalten: den Wert „1“ für geeignete Flächen und den Wert „0“ für ungeeignete Flächen. Die neue Datenebene enthält somit nur Bool'sche Nominaldaten, deren Merkmalsausprägungen auf lediglich zwei Zustandsstufen reduziert sind. Alle in Abbildung 15 rot dargestellten Flächen sind ungeeignete Restriktionsflächen, während grüne Flächen für die Bebauung potentiell geeignet sind.

Zusätzlich zu den restriktiven Faktoren soll das Modell selektive Faktoren berücksichtigen. Nähe zu diesen weichen Faktoren wirkt sich begünstigend auf die Standortwahl von BGA aus. Bevor diese Faktoren zu Analysezwecken verwendet werden können, sind ebenfalls einige vorbereitende Arbeitsschritte notwendig.

Nach der Dateneingabe und Ermittlung der identifizierten Entfernungen ist analog zum Vorgehen, welches für die Bestimmung der restriktiven Faktoren angewendet wurde, für die selektiven Faktoren eine Konversion in das Rasterformat erforderlich. Anschließend muss eine Klassifizierung der Daten erfolgen. Aufgrund der hier vorliegenden Relevanz von Entfernungen ist absehbar, dass selektive Faktoren metrische Intervalldaten beinhalten.

Dieser Datentyp ist voll quantifizierbar, so dass Aussagen wie „größer als“ und „kleiner als“ getroffen werden können und relative Vergleiche zwischen den Ausprägungen möglich sind. Demgegenüber stehen die restriktiven Faktoren, die als Bool'sche Daten nur zwei Zustandsstufen repräsentieren und zu den Nominaldaten gehören. Nominaldaten sind qualitativ untereinander nicht messbar und können nicht logisch miteinander verglichen werden (BAHRENBERG u. GIESE 1975: 13 f.).

Das Vorhandensein unterschiedlicher Datenniveaus erlaubt keine Vergleiche und mathematischen Operationen miteinander, so dass eine komplexe Analyse auf der Basis von Daten unterschiedlicher Niveaus nicht möglich ist. So ergibt z.B. die Angabe „500 Meter“ multipliziert mit der Information „geeignet“ kein Ergebnis. Daher ist das Niveau der Daten mit der geringsten Aussagekraft bei der simultanen Benutzung ungleicher Datenniveaus insofern ausschlaggebend, als dass alle verwendeten Daten auf dieses Niveau reduziert werden müssen.

Bezogen auf das Untersuchungsbeispiel bedeutet das, dass eine Transformation der Entfernungsangaben, die z.B. in Metern vorliegen, in Entfernungsklassen erfolgen muss. Die Klassengrenzen ergeben sich aus dem Wertebereich der Entfernungsangaben und der gewählten Klassifizierungsmethode. In den folgenden Analysen werden alle Entfernungsangaben in fünf Klassen eingeteilt, die nach dem Schulnotensystem von „1“ bis „5“ abgestuft sind, so dass der Wert „1“ die besten Standorte und der Wert „5“ die schlechtesten Standorte repräsentiert.

Nach der Klassifizierung erfolgt die Gewichtung der einzelnen Faktoren, denn anders als bei den restriktiven Faktoren sind selektive Faktoren untereinander nicht gleichwertig. So ist in Anlehnung an die theoretischen Überlegungen von WEBER (siehe Kapitel 3) zu berücksichtigen, dass einige Faktoren bedeutsamer sind als andere und dementsprechend unterschiedlich zu gewichten sind. Aufgrund ökonomischer Belange kann es durchaus möglich sein, dass z.B. die Nähe zu Substraten wichtiger ist als die Nähe zu Stromleitungen. Ist die Festlegung der Gewichtungswerte erfolgt, werden die Gewichtungen mit den klassifizierten Werten multipliziert.

Die Arbeitsschritte „Klassifizierung“ und „Gewichtung“ erfolgen für alle Datenlayer, die Informationen über selektive Faktoren enthalten. Anschließend werden die gewichteten Datenebenen aufaddiert, so dass ein „selektiver Endlayer“ entsteht. Um erneut die Klassifizierungsabstufungen zu erlangen, werden die Werte des „selektiven Endlayers“ durch die Summe aller Gewichtungsfaktoren dividiert.

Zur Veranschaulichung der beschriebenen Operationen seien diese anhand eines einfachen Beispiels dargestellt. Es wird angenommen, dass nur die zwei selektiven Faktoren „Nähe zu Energiemais“ und „Nähe zur Stromleitung“ relevant sind.

Zuerst erfolgt die Klassifizierung der Wertbereiche. Der Transport von Mais kann aus wirtschaftlichen Gründen nur über Entfernungen bis zehn Kilometer erfolgen und es sollen sechs Klassen gebildet werden. Nach der Klassifizierungsmethode „equal interval“ ergeben sich die in Tabelle 8 dargestellten Klassen für den Faktor „Energiemais“.

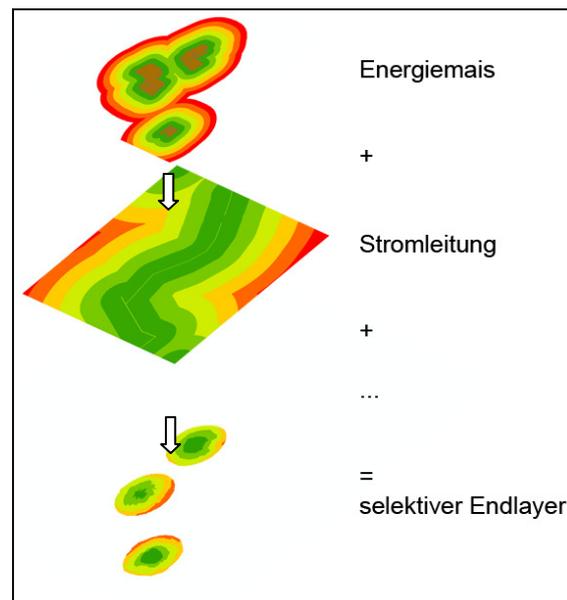
**Tabelle 8: Beispielhafte Entfernungsklassen für Energiemais**

Entfernung in Metern	Klasse
0 – 2.000	1
2.000 – 4.000	2
4.000 – 6.000	3
6.000 – 8.000	4
8.000 – 10.000	5

Quelle: Eigene Darstellung.

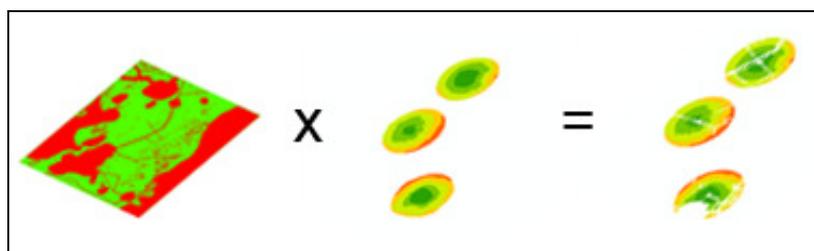
Es wird angenommen, dass die Verfügbarkeit von Energiemais eine hohe Bedeutung für Standorte von BGA hat, so dass Energiemais mit einem dreifachen Gewichtungsfaktor multipliziert wird.

Ähnlich wird beim Faktor „Stromleitung“ vorgegangen. Zuerst erfolgt eine Einteilung der Entfernungsangaben in fünf Klassen. Auch hier gilt, dass Nähe zum Faktor für den Standort einer BGA vorteilhaft ist. Anders als bei Mais ist jedoch keine Beschränkung gegeben, da davon ausgegangen wird, dass es aus wirtschaftlichen Gründen vertretbar ist das vorhandene Leitungsnetz auszubauen. Die Existenz eines geeigneten Stromnetzes ist auch aufgrund der Option das Netz ggf. zu erweitern weniger bedeutsam als die Verfügbarkeit von Energiemais, so dass der Gewichtungsfaktor den Wert „2“ erhält. Addiert man nun alle gewichteten Datenlayer, so ergeben sich für das genannte Beispiel Klassenwerte zwischen „5“ und „25“. Dividiert man nach der Addition der Datenlayer das Ergebnis der Addition mit der Summe der Gewichtungsfaktoren, in dem Fall also mit „5“, so erhält man wieder die vorher gewählten Klassen für den „selektiven Endlayer“ und hat gleichzeitig die Bedingungen aller Datenebenen berücksichtigt. Abbildung 16 stellt die Addition der gewichteten Faktoren schematisch dar.

**Abbildung 16: Addition gewichteter selektiver Faktoren**

Quelle: eigene Darstellung.

Nachdem der „restriktive“ und der „selektive Endlayer“ ermittelt wurden, erfolgt eine Multiplikation beider Datenebenen. Die Rasterzellen des „restriktiven Endlayers“ besitzen die Werte „0“ und „1“, so dass bei einer Multiplikation an den Stellen, an denen eine „0“ eingetragen ist auch als Ergebnis eine „0“ erscheint, während an den Stellen, an denen der Wert „1“ enthalten ist, die Werte des „selektiven Endlayers“ erhalten bleiben. Diese Multiplikation ist im Endeffekt ein Ausschneiden aller nicht zur Bebauung geeigneten Flächen aus der selektiven Datenebene. Abbildung 17 verdeutlicht schematisch die Multiplikation beider Datenlayer.

**Abbildung 17: Multiplikation restriktiver und selektiver Endlayer**

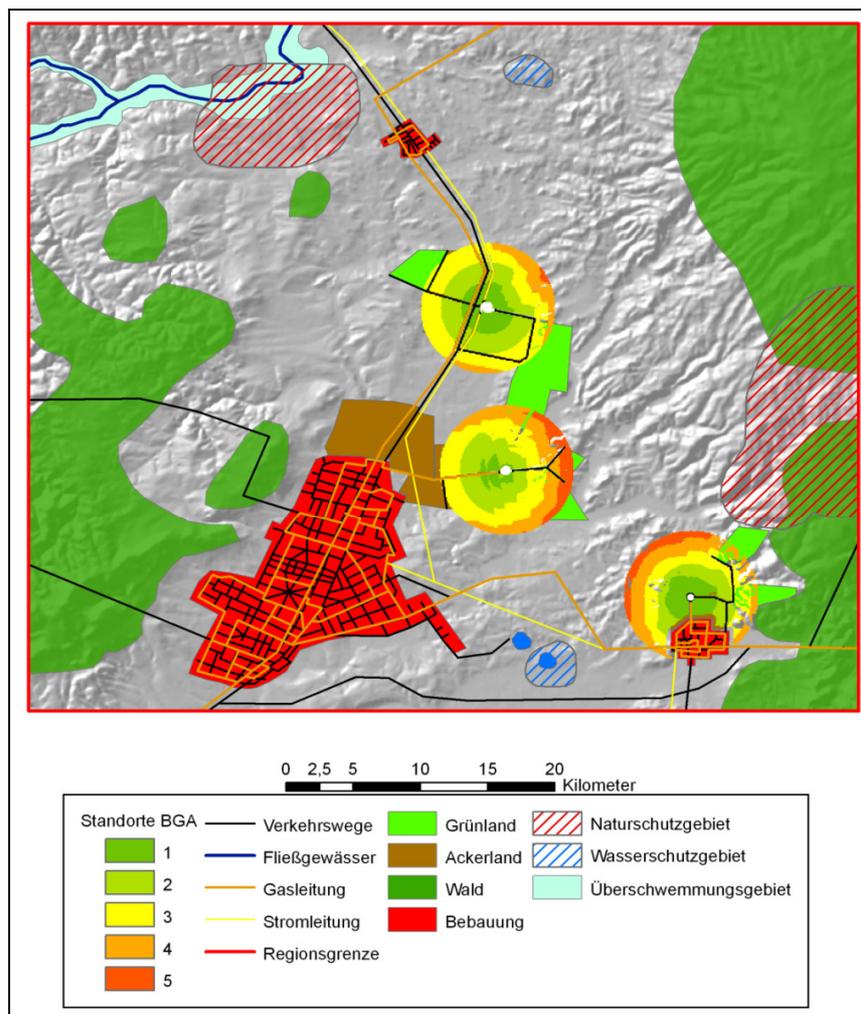
Quelle: eigene Darstellung.

Das Ergebnis der beschriebenen Operationen ist eine Datenebene, die in Frage kommende geeignete Standorte abgestuft darstellt. Anhand der vereinfachten Daten der Modellregion wurden zahlreiche Analysenvariationen betrachtet, um die Vorgänge und Schwierigkeiten der Modellbildung besser zu verstehen und daraus Schlussfolgerungen für die endgültige Analyse zu ziehen.

Die nun beispielhaft vorgestellten Analyseergebnisse der Modellregion unterscheiden sich lediglich in der Kriterienauswahl, die sich am Produktionsverfahren der BGA orientiert. Die Gewichtungen der Faktoren, sowie die Klassengrenzen sind bei allen Analysen identisch. Die Festlegung der Gewichtungs- und Klassenwerte wird nicht näher erläutert, da sie für die Methodenentwicklung nicht von Interesse ist. Vielmehr steht die Ausarbeitung der einzelnen Arbeitsschritte, der Gewinn von Erfahrungswerten sowie die Validierung der Methodik im Vordergrund.

Anhand des ersten Produktionsverfahrens wird Gülle und NawaRo zur Erzeugung von Strom benötigt. Die Nähe zur Erdgasleitung ist für dieses Produktionsverfahren irrelevant. Nach der Auswahl der entsprechenden Kriterien und der Implementierung der Daten und Operationen in das Modell, ergibt sich das folgende, in Abbildung 18 aufgezeigte Zwischenergebnis.

**Abbildung 18: Standorte von BGA mit NawaRo- und Gülleeinsatz zur Stromproduktion**



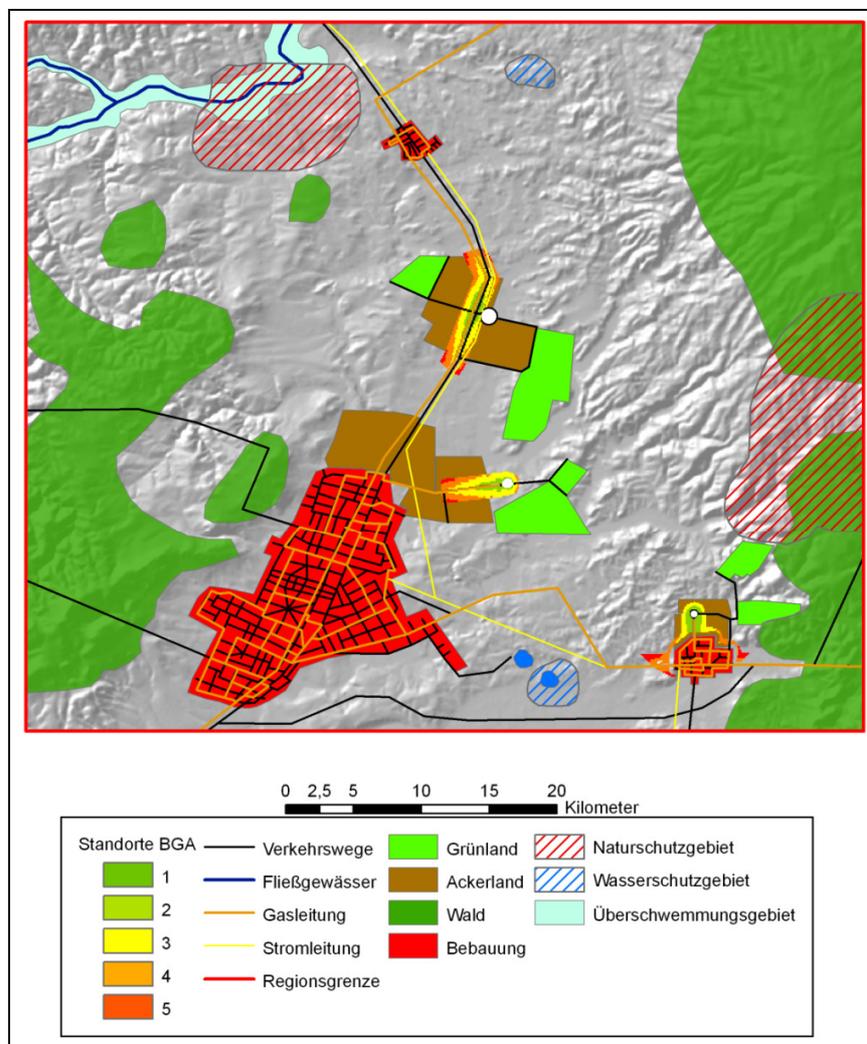
Quelle: Eigene Darstellung.

Die potentiellen Standorte für dieses Produktionsverfahren sind deutlich an die Betriebe gekoppelt, die Gülle als Basissubstrat liefern (in Abbildung 18 durch weiße Punkte symbo-

lisiert). Eine leichte Verschiebung der optimalen Standorte in westliche Richtung, hin zu den Energiemaisflächen und der Stromleitung, ist insbesondere an dem zentralen Standort zu erkennen.

Eine starke Verkehrslageorientierung entlang der Erdgaspipeline ist bei der Biomethanproduktion mit Gaseinspeisung auf der Basis von NawaRo und Gülle zu beobachten (Abbildung 19). Auch in diesem Fall zieht nicht nur die Gülle, sondern in gewissen Umfang auch die Verfügbarkeit von Mais die Standorte an sich, wie am mittleren Standort zu beobachten ist. Auch die Nähe zur Stromleitung wirkt sich auf die Standortbewertung aus, da bei diesem Produktionsverfahren der Strom, der für die innerhalb der BGA stattfindenden Prozesse benötigt wird, aus dem öffentlichen Netz entnommen wird.

**Abbildung 19: Standorte von BGA mit NawaRo- und Gülleeinsatz zur Methaneinspeisung**



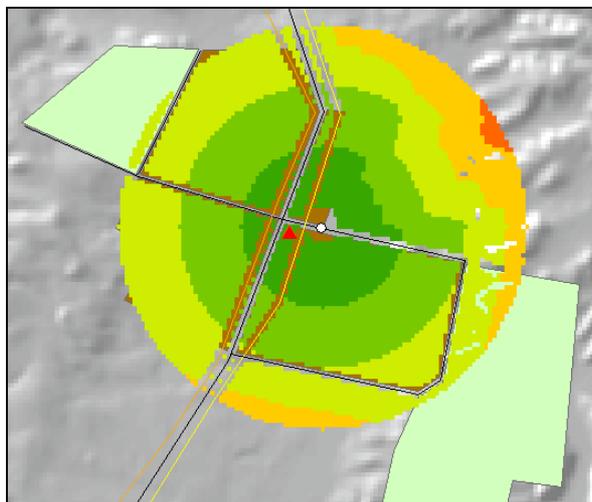
Quelle: Eigene Darstellung.

Anhand der zwei aufgezeigten Beispiele wird offensichtlich, dass es sich lediglich um Zwischenergebnisse handelt. Die selektiven Faktoren beziehen sich zwar auf Entfernungen zu den entsprechenden Geobjekten, sagen aber in keinsten Weise etwas

über vorhandene Substratmengen aus. Die qualitative Aussage, dass an einer bestimmten Stelle Gülle oder Energiemais verfügbar ist, ist sicherlich für die Analyse von Nutzen. Es ist jedoch unbekannt welche Substratmengen vor Ort anfallen. Daher ist auch unklar, ob die Substratmengen im Umkreis des potentiellen Standorts ausreichen, um einen wirtschaftlich sinnvollen Betrieb der BGA zu gewährleisten. Diese Unklarheit muss jedoch behoben werden, damit die Analyse realistische Ergebnisse abbildet.

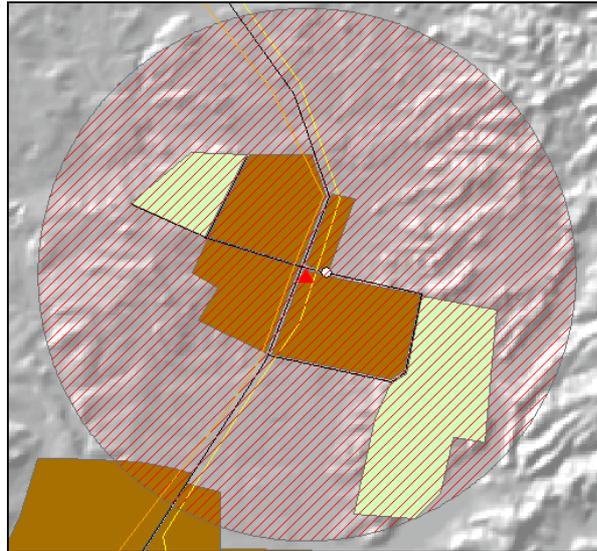
Folglich müssen zur Bestimmung der Substratmengen weitere Arbeitsschritte erfolgen. Innerhalb der ausgewiesenen Gebiete sollen BGA errichtet werden, wobei der Standort in einem Areal liegen soll, welches mit „sehr gut“ bewertet ist. In Abbildung 21 ist ein optimaler Standort in unmittelbarer Nähe zu allen selektiven Faktoren durch ein rotes Dreieck symbolisiert.

**Abbildung 20: Optimaler Standort einer BGA in der Modellregion**



Quelle: eigene Darstellung.

Zur Bestimmung der benötigten Substratmengen müssen die spezifischen Anlagenkenngrößen bekannt sein, da aus diesen Werten der Substratbedarf errechnet werden kann. Steht der Substratbedarf der BGA fest, kann unter Zuhilfenahme von Ertragswerten auch eine Aussage über die notwendigen GVE bzw. den Flächenbedarf für den Anbau von Silomais erfolgen. Eine räumliche Abfrage klärt, ob innerhalb der entsprechenden Einzugsradien genügend Substrate vorhanden sind. Abbildung 22 stellt das Einzugsgebiet für Silomais um den optimalen Standort der Anlage rot schraffiert dar.

**Abbildung 21: Einzugsgebiet für Silomais**

Quelle: eigene Darstellung.

Steht innerhalb des dargestellten Einzugsgebiets genügend Substrat zur Verfügung, so kann an dem betrachteten Standort eine BGA errichtet werden. Die Feststellung der Substratmengenverfügbarkeit muss selbstverständlich für alle Substrate erfolgen. Innerhalb des in Abbildung 22 dargestellten Radius stehen sowohl genügend Silomaisflächen als auch ausreichend viel Gülle zur Verfügung. Für den Fall, dass für einen Standort nicht genügend Substrate zur Verfügung stehen, kann entweder die Leistung der BGA - und mit ihr der Substratbedarf - verringert werden oder es wird ein alternatives Produktionsverfahren, z.B. die Trockenfermentation oder ein ausschließlich auf Gülle basierendes Vergärungsverfahren, betrachtet. Berechnungen sowie die Betrachtung unterschiedlicher Biogas-Produktionsverfahren erfolgen am Beispiel einer real existierenden Untersuchungsregion. Das Untersuchungsgebiet, die verwendeten Geodaten sowie die Ergebnisse der Analysen werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

## 5 Analyse und Berechnungen

Die folgenden Standortanalysen stellen keinen Anspruch auf Vollkommenheit. Vielmehr soll gezeigt werden, dass und wie eine Analyse mit derartiger Komplexität und Vielzahl an unterschiedlichen Faktoren realisierbar ist. Obwohl die Ergebnisse der Analyse Standorte aufzeigen, die besonders zur Erzeugung von Biogas geeignet sind, bedeutet dies nicht, dass lediglich an diesen Standorten Biogasanlagen errichtet werden können. Andererseits müssen nicht alle durch das Modell identifizierte Standorte auch in Realität potentielle Standorte für Biogasanlagen sein. So ist zu bedenken, dass nicht alle Gegebenheiten modellierbar sind und Entscheidungen für oder gegen den Bau einer Anlage nicht immer rational erklärbar sind. Auch die Aufstellung der Bebauungspläne der einzelnen Gemeinden kann im Widerspruch zu den Modellergebnissen stehen.

Es muss betont werden, dass viele der in die Analyse einfließenden Faktoren aus gesetzlichen Vorlagen oder aus wissenschaftlichen Beiträgen mit ähnlicher Fragestellung entnommen sind. Einige Faktoren und Gewichtungen sind jedoch aus Expertenbefragungen abgeleitet oder vom Autor selbst bestimmt. Beide Faktorenquellen haben keinen endgültigen Charakter und können entsprechend sich ändernden Rahmenbedingungen modifiziert werden. Diese Flexibilität ermöglicht nicht nur eine Anpassung des Modells an veränderte Rahmenbedingungen, sondern sie erlaubt auch die Bildung von Szenarien. Szenarien werden am Ende des Kapitels 5.3 vorgestellt.

Sämtliche für die Analyse benötigten Geodaten wurden vom Transferbereich „Energiepflanzen, Wirtschaft und Umwelt“ des Sonderforschungsbereichs 299 „Landnutzungskonzepte für periphere Regionen“ der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Verfügung gestellt. Sie werden ausführlich in Kapitel 5.2 vorgestellt, nachdem die Wahl der Untersuchungsregion mit der Beschreibung der Region im folgenden Abschnitt begründet wird.

### 5.1 Beschreibung der Untersuchungsregion

Die Untersuchungsregion beschränkt sich auf Teile des Odenwaldkreises. Der Odenwaldkreis ist ein südhessischer Landkreis, der zum Regierungsbezirk Darmstadt gehört.

Hessische Nachbarkreise des Odenwaldkreises sind im Norden der Landkreis Darmstadt-Dieburg sowie im Südwesten und Westen der Kreis Bergstraße. Im Osten grenzt an den Odenwaldkreis der bayerische Landkreis Miltenberg und im Südosten und Süden die baden-württembergischen Landkreise Neckar-Odenwald-Kreis und Rhein-Neckar-Kreis.

Die Fläche des Odenwaldkreises beträgt rund 624 km<sup>2</sup>, das entspricht ca. 3 % der hessischen Landesfläche. Mit knapp 100.000 Einwohnern ist der Odenwaldkreis der bevölkerungsärmste Landkreis Hessens (HESSISCHES STATISTISCHES LANDESAMT 2007a:

16). Die landwirtschaftliche Fläche macht im Odenwaldkreis mit rund 20.400 ha 33 % der Gemarkungsfläche aus. 56 % der Gemarkungsfläche sind bewaldete Flächen. Hauptanbafrüchte sind Silomais mit 50.657 t sowie die Getreidesorten Weizen, Roggen, Gerste und Triticale mit insgesamt 23.353 t (HESSISCHES STATISTISCHES LANDESAMT 2007b: 36 f.). Mit rund 74.300 Schlachtungen im Jahr 2006 ist der Odenwaldkreis hessenweit an vierter Stelle zu finden. Ferner sind im Odenwaldkreis im Jahr 2006 rund 42.000 t Milch produziert worden (HESSISCHES STATISTISCHES LANDESAMT 2007b: 39.).

Auf Grundlage dieser Werte erfolgte die Auswahl des Odenwaldkreises als Untersuchungsregion. Es kann davon ausgegangen werden, dass nicht nur ausreichend Gülle, sondern auch genügend Flächen für den Anbau von Silomais zur Verfügung stehen. Zudem ist im Odenwaldkreis eine von Nord nach Süd sowie eine von Ost nach West verlaufende Gasleitung vorhanden (siehe Kapitel 5.2).

Die Untersuchungsregion erstreckt sich nicht über den gesamten Odenwaldkreis. Der südliche Teil des Kreises mit den drei Gemeindegebieten Hesseneck, Rothenberg und Sensbachtal gehört nicht dazu. Die Abgrenzung des Untersuchungsgebiets ist in Abbildung 23 durch eine rot gestrichelte Linie dargestellt.

**Abbildung 22: Untersuchungsregion**

Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage Vektordaten Verwaltungsgrenzen (VG 250).

Die Begrenzung auf den nördlichen Teil des Odenwaldkreises erfolgte aufgrund der beschränkten Datenverfügbarkeit. So liegt z.B. das digitale Geländemodell (DGM) von Südhessen nur für den nördlichen Teil des Odenwaldkreises vor, weshalb auch der südliche „Zipfel“ der Gemeinde Erbach nicht ins Untersuchungsgebiet fällt. Somit hat das Untersuchungsgebiet eine Fläche von rund 456 km<sup>2</sup>. Dies entspricht in etwa 73 % der Gesamtfläche des Odenwaldkreises.

## 5.2 Datengrundlage

Bevor die Analysemethodik auf das vorgestellte Untersuchungsgebiet angewendet wird, bedarf es einiger Aufbereitung der zur Verfügung stehenden Geodaten. Entsprechend dem bereits ausgearbeiteten methodischen Verfahren sollen zunächst die Geodaten aufbereitet und bei dieser Gelegenheit näher beschrieben werden, die als restriktive Faktoren

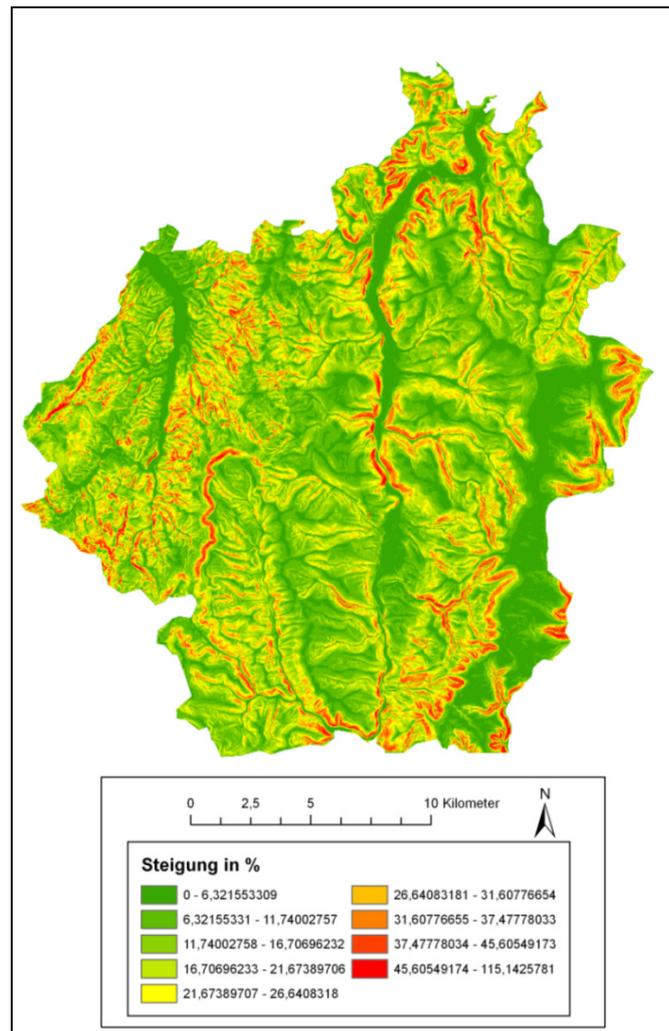
in die Analyse einfließen. Gleichzeitig erfolgt eine Erläuterung der zugrunde liegenden Annahmen. Einen Überblick der verwendeten restriktiven Faktoren gibt Tabelle 9.

**Tabelle 9: Restriktive Faktoren im Untersuchungsgebiet**

<b>Restriktive Faktoren</b>
Hangsteigung >15 %
Wald
Gewässer
Siedlungsflächen
Verkehrswege
Naturschutzgebiete
Wasserschutzgebiete Zonen I und II
Gasleitungen

Quelle: Eigene Darstellung

Als erstes hartes Kriterium sind Flächen mit einer **Hangsteigung** von über 15 % festgelegt. Die Festlegung dieser Grenze erfolgt aufgrund erhöhter Baukosten für Anlagen in extremen Steillagen (MA et. al 2005: 596). Das vom Hessischen Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation (HLBG) zur Verfügung gestellte DGM25 von Südhessen erlaubt die Ableitung der Hangsteigung unter Zuhilfenahme der GIS-Funktion „Slope“. Die daraus resultierende Steigungskarte des Untersuchungsgebiets ist in Abbildung 24 zu sehen. Besonders steile Hänge sind rot dargestellt, wenig geneigte Flächen erscheinen grün.

**Abbildung 23: Steigungskarte des Untersuchungsgebiets**

Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage DGM 25.

Es ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der Steigung nicht um die Hangneigung handelt. Während die Hangneigung in Grad angegeben wird, wird die Steigung in Prozent angezeigt. Die Steigung drückt das Verhältnis von Höhenunterschied und waagerechter Strecke aus, wobei eine Steigung von 100 % einem Hangneigungswinkel von 45° entspricht. Daher treten in der Legende der Steigungskarte Werte von über 100 % auf.

Zusätzliche Ausschlussfunktion erfüllen sämtliche in die Analysen einfließenden Informationen über Wald-, Gewässer- und Verkehrsflächen sowie über bebaute Gebiete und Naturschutzgebiete. All diese Daten stammen aus dem sog. ATKIS-Basisdatenbestand.

Das amtliche topographisch-kartographische Informationssystem (ATKIS) beinhaltet digital erfasste räumliche Daten, die auf Bundeslandebene von den Vermessungsämtern verwaltet werden. Die im Vektorformat vorliegenden digitalen Landschaftsmodelle des ATKIS orientieren sich an der topographischen Karte 1:25.000 (TK25). Die Inhalte der Modelle sind im sog. Objektartenkatalog (OK) festgelegt. Wichtige Punkt- und Linienob-

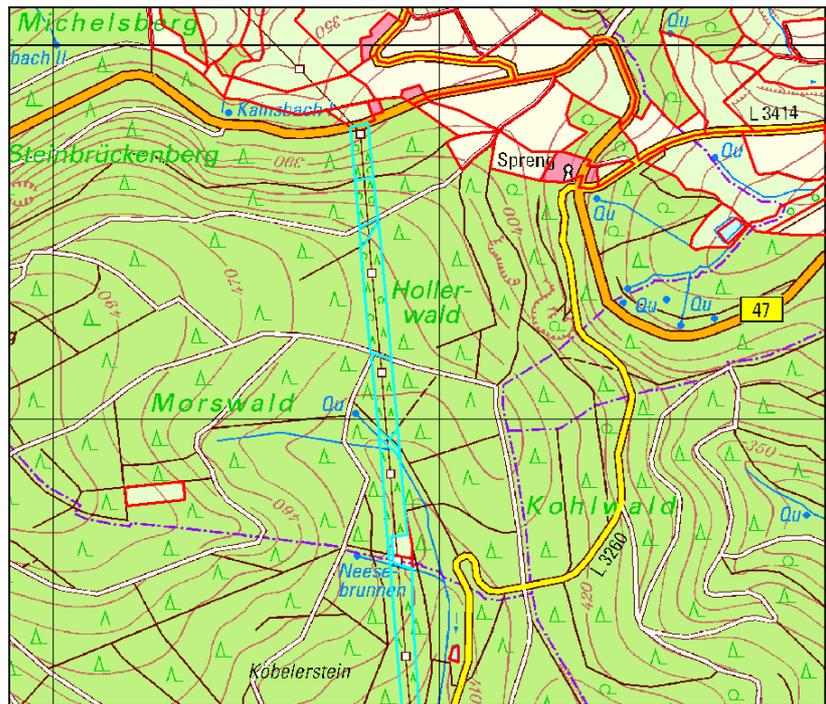
jekte besitzen im ATKIS entsprechend der Deutschen Grundkarte im Maßstab 1:5.000 (DGK 5) eine Lagegenauigkeit von  $\pm 3$  m. Der ATKIS-Datenbestand ist bundesweit einheitlich und als Basisdatenbestand für Verknüpfungen mit Fachdaten verschiedenster Nutzer ausgelegt (DE LANGE 2002: 227 f.). Daher eignen sich ATKIS-Daten insbesondere als Grundlage für weitere fachspezifische Nutzungen in GIS und bilden eine solide Datengrundlage für die Anforderungen der beabsichtigten Analysen. Die ATKIS-Daten sind dem Transferbereich „Energiepflanzen, Wirtschaft und Umwelt“ für wissenschaftliche Zwecke am 20.12.2007 vom HLBG zur Verfügung gestellt worden.

Obwohl die ATKIS-Daten als Basisdaten ausgelegt sind, bedürfen sie einiger Vorbereitungen und Anpassungen, um für die Fragestellung der Analysen Verwendung zu finden. Damit lediglich die für das Untersuchungsgebiet relevanten Geo-Informationen im Datenbestand verbleiben, erfolgt wie beim DGM eine Verschneidung der ATKIS-Daten mit dem Polygon des Untersuchungsgebiets. Bei der Überprüfung der ATKIS-Daten anhand der digitalen topographischen Karte im Maßstab 1:25.000 (DTK 25) ist in mehreren Fällen aufgefallen, dass die Flächengeometrien zum Teil nicht mit der DTK 25 übereinstimmen, so dass eine nachträgliche Veränderung der Flächengrenzen erfolgen musste. Darüberhinaus sind für die Fragestellung irrelevante Objekte wie z.B. die Objektgruppe 4200 „Bäume und Büsche“ oder die Gruppe 5300 „Einrichtungen und Bauwerke an Gewässern“ aus dem Datenbestand entfernt worden. Erst nach diesen Aufbereitungsmaßnahmen konnte der ATKIS-Datenbestand als Grundlage für die Analyse-Datenbank verwendet werden.

Alle Flächen des Untersuchungsgebiets, die im ATKIS-Objektartenkatalog als **Waldflächen** ausgewiesen sind fließen als zweiter restriktiver Faktor in die Analysen ein. Eine Nutzungsumwandlung von Wald soll aufgrund der zahlreichen Funktionen dieses Landnutzungstyps nicht erfolgen. Laut OK ist Waldfläche als „Fläche, die mit Forstpflanzen bestockt ist“ definiert (ATKIS-OK 2003: Objektart Nr. 4107). Innerhalb der ATKIS-Daten sind als Vegetationsflächen jedoch auch Gehölzflächen aufgeführt. Eine Gehölzfläche ist laut dem Objektartenkatalog eine „Fläche, die mit einzelnen Bäumen, Baumgruppen, Büschen, Hecken und Sträuchern bestockt ist“ (ATKIS-OK 2003: Objektart Nr. 4108). Waldflächen und Gehölzflächen ähneln einander insofern, als dass sie mit ähnlichen Vegetationsformen bedeckt sind.

Bei der näheren Betrachtung der Gehölzflächen ist auffällig, dass diese Flächen in unmittelbarer Nachbarschaft zu Waldflächen oder sogar innerhalb von Waldflächen liegen, wie der Abbildung 25 zu entnehmen ist.

Abbildung 24: Typische Lage von Gehölzflächen



Quelle: eigene Darstellung, Datengrundlage ATKIS-DLM und DTK 25 Blatt 6319.

Die hellblau hervorgehobene Fläche deutet auf die Lage einer Gehölzfläche hin, die entlang einer Stromleitung inmitten einer Waldfläche liegt.

Aufgrund der Lage der Gehölzflächen innerhalb von Waldflächen bzw. am Waldrand und aufgrund der Tatsache, dass sowohl Wald- als auch Gehölzflächen mit ähnlichen Vegetationsformen bestockt sind, wird davon ausgegangen, dass beide Flächentypen zusammengekommen Waldflächen repräsentieren. Die Ausdehnung dieser bewaldeten Flächen beträgt ca. 24.300 ha, was rund 53 % des Untersuchungsgebiets entspricht.

**Gewässer** bilden den dritten restriktiven Faktor. Es ist offensichtlich, dass Gewässer nicht trockengelegt, überbaut oder umgeleitet werden sollen, damit an ihre Stelle eine BGA errichtet werden kann. Alle innerhalb der Untersuchungsregion liegenden natürlichen Wasserläufe wie z.B. Flüsse und Bäche sowie stehende Gewässer wie Binnenseen, Stauseen und Teiche bilden deshalb die nächste Datenquelle, die einen restriktiven Einfluss auf die Analysen hat. Auch diese Daten stammen aus dem ATKIS-Datenbestand.

Bereits **bebaute Flächen** stehen ebenfalls nicht als Standorte für BGA zu Verfügung. Die benötigten Informationen über die räumliche Lage und Ausdehnung von bebauten Flächen sind dem ATKIS-Datensatz entnommen. Die Ausdehnung der bebauten Flächen nimmt mit 7.119 ha rund 15,6 % des Untersuchungsgebiets ein. Die Daten beinhalten nicht nur baulich geprägte Flächen wie z.B. Wohnbauflächen, Industrie- und Gewerbeflächen, Flächen gemischter Nutzung, sondern auch Siedlungsfreiflächen wie z.B. Sportplät-

ze, Freizeitanlagen und Tierparks (siehe ATKIS-OK 2003: Objektbereich Nr. 2000). Desweiteren sind einzelne Bauwerke und sonstige Einrichtungen wie Tagebaustätten und Halden im Datensatz enthalten. Die genannten Objekte bilden zusammengenommen die Grundlage zur Bestimmung des vierten restriktiven Faktors.

Die Flächen, auf denen bestehende **Verkehrswege** vorhanden sind, stehen gleichfalls nicht als Standorte von BGA zur Verfügung, da Straßen und Feldwege nicht umgeleitet oder abgerissen werden sollen. Sämtliche Daten über Verkehrswege stammen aus dem ATKIS Objektbereich „3000 Verkehr“. Dazu zählen die Objektgruppen 3100 bis 3400 Straßen-, Schienen-, Flug- und Schiffsverkehr sowie die Objektgruppe 3500 „Anlagen und Bauwerke für Verkehr, Transport und Kommunikation“ wie z.B. Bahnhöfe, Tunnel, Brücken, Raststätten etc.

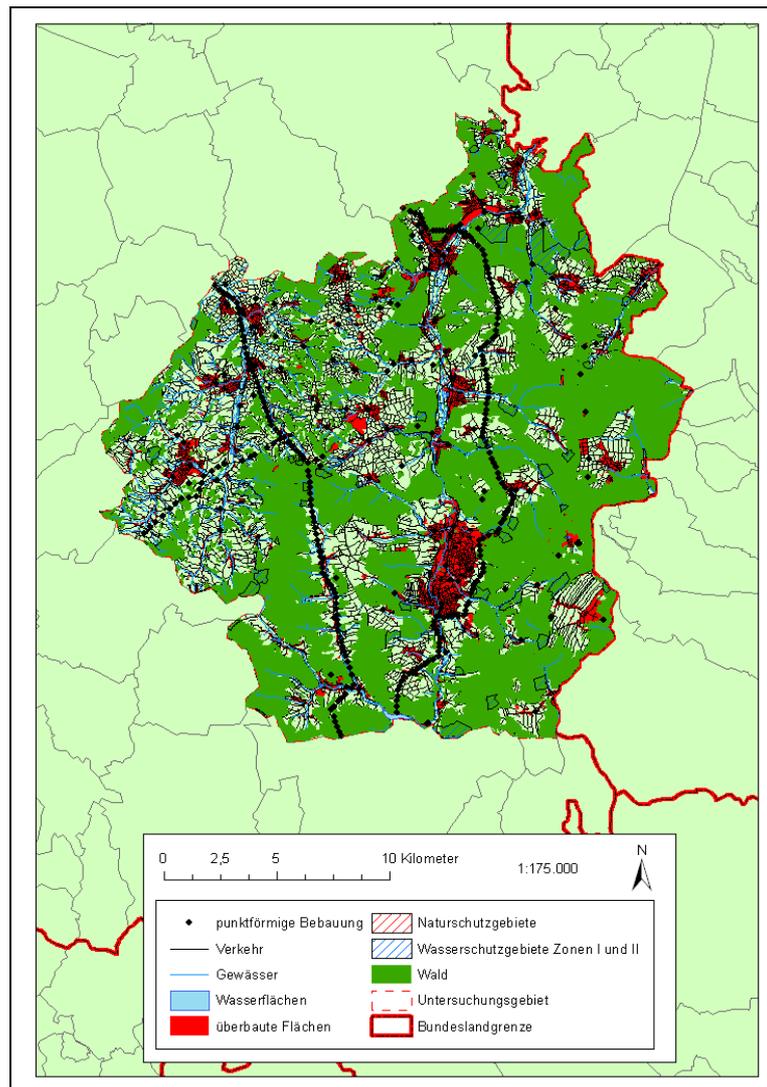
Die linienhaften Verkehrsdaten sind nochmals aufgeteilt in z.B. Straßen, Wege, Plätze und Fahrbahnen, während punktförmige Daten im OK unter der Objektgruppe 3500 „Bauwerke für Verkehr, Transport und Kommunikation“ z.B. in Form von Stromleitungsmasten, Antennen-, Funk- und Sendemasten zu finden sind.

Der sechste restriktive Faktor „**Naturschutzgebiete**“ beruht auf der Grundlage der ATKIS-Objektart-Nr. 7302 „Naturschutzgebiet“. Im Untersuchungsgebiet liegen dreizehn Naturschutzgebiete mit einer Gesamtfläche von rund 138 ha. Ihr Flächenanteil beträgt somit ca. 0,3 % des Untersuchungsgebiets. Naturschutzgebiete sollen im Hinblick auf die Vereinbarkeit von erneuerbaren Energien und Umweltschutz nicht aufgehoben werden, damit an ihrer Stelle eine BGA errichtet werden kann.

Im Fassungsbereich (Zone I) sowie der engeren Schutzzone (Zone II) von **Wasserschutzgebieten** dürfen entsprechend der im Staatsanzeiger veröffentlichten Verordnungen zur Festsetzung von Wasserschutzgebieten ebenfalls keine BGA errichtet werden (siehe z.B. § 5, Abs. 1 u. § 6 VO WSG „Mischbornquelle“). Im Untersuchungsgebiet befinden sich 80 engere Schutzzone mit einer Gesamtfläche von rund 1.677 ha. Dies entspricht ca. 3,7 % der Fläche des Untersuchungsgebiets. Die Geodaten bzgl. der Wasserschutzgebiete stammen wie die ATKIS-Daten aus dem Datenbestand des Transferbereichs.

Alle aus dem ATKIS-Datenbestand entnommenen Geodaten sowie die Wasserschutzgebietszonen I und II sind in Abbildung 26 zusammengefasst.

Abbildung 25: Restriktive Faktoren aus ATKIS



Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage ATKIS-DLM.

Die Lage der Gasleitungen repräsentiert den letzten in die Analysen eingehenden restriktiven Faktor. Aus Sicherheitsgründen sollen Erdgaspipelines nicht von BGA überbaut werden. Die nachträgliche Umverlegung bestehender Leitungen kommt ebenfalls nicht in Frage. Die Lagedaten der Leitungen stammen aus dem Datenbestand der HSE, die die Informationen in Form einer analogen Karte zur Verfügung gestellt hat. Diese Informationen gehen nach der Digitalisierung der Karte in die Analysedatenbank ein. Die Lage der Erdgasleitungen innerhalb des Untersuchungsgebiets ist in Abbildung 28 (siehe S. 9) wiedergegeben.

Als zweite Kriteriengruppe sollen entsprechend der erprobten Methodik die Geodaten näher betrachtet werden, die sich als selektive Faktoren auf die Analyseergebnisse auswirken. Generell kann ausgesagt werden, dass sich die Nähe zu diesen Geobjekten auf

den Standort einer BGA positiv auswirkt. Einen Überblick der zur Verfügung stehenden verwendeten selektiven Faktoren gibt Tabelle 10.

**Tabelle 10: Selektive Faktoren im Untersuchungsgebiet**

Befestigte Straßen
Ackerland
Landwirtschaftliche Flächen
Betriebe mit Rindvieh
20-kV-Transformationsstationen
Gasleitungen

Quelle: eigene Darstellung

Ein Teil der benötigten Informationen zur Ermittlung der selektiven Faktoren stammt aus dem ATKIS-Datenbestand. Dies sind alle Geoobjekte, die zusammengenommen als die Faktoren „befestigte Straßen“, „Ackerland“ und „landwirtschaftliche Flächen“ in die Analysen eingehen.

Der erste selektive Faktor „**befestigte Straßen**“ beinhaltet neben Bundesstraßen auch Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen aus dem ATKIS-Datensatz (Objektart-Nr. 3101). Die Nähe zu befestigten Straßen ist insofern wichtig, als dass eine gewisse Logistik erforderlich ist, um die benötigte Biomasse zur BGA zu transportieren. Eine BGA mit einer Leistung von 350 kW benötigt rund 10.000 Tonnen Biomasse pro Jahr. Das entspricht rund 500 Fuhren mit einer 20 Tonnen fassenden Transporteinheit. Etwa die gleiche Menge muss als Gärrückstand ausgebracht werden. Beim Einsatz von Silagen konzentriert sich das Verkehrsaufkommen der Anlieferung auf die entsprechenden Erntezeiten, so dass während der Ernte ein erhöhtes Verkehrsaufkommen zu erwarten ist. Dieses Aufkommen ist jedoch mit dem Aufkommen der klassischen Landwirtschaft vergleichbar, da die Anbauflächen auch ohne Biogasanlage bewirtschaftet werden (FACHVERBAND BIOGAS 2006: 22). Daher verursacht eine einzelbetriebliche BGA, in der lediglich Substrate vom Hof des Anlagenbetreibers vergärt werden, kein erhöhtes Verkehrsaufkommen am Anlagenstandort. Beim Betrieb einer Gemeinschaftsanlage werden allerdings auch umliegende Flächen benachbarter landwirtschaftlicher Betriebe zum Anbau von Substraten genutzt. Folglich konzentriert sich das Verkehrsaufkommen zur Erntezeit in der Nähe des Anlagenstandorts und eine gute Verkehrsanbindung ist vorteilhaft.

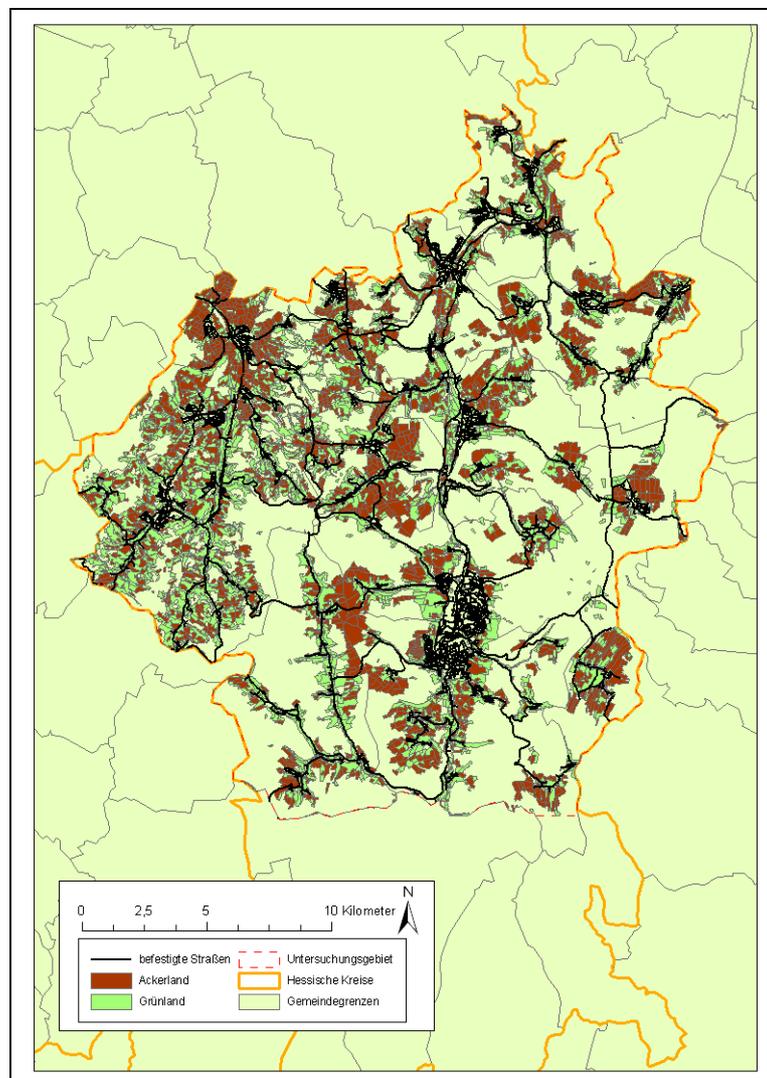
Die Geodaten des zweiten selektiven Faktors sind ebenfalls aus dem ATKIS-Datensatz abgeleitet. Um die Versorgung der BGA mit NawaRo zu gewährleisten, ist es erforderlich, dass in der Nähe des geplanten Standorts **ackerbaulich genutzte Flächen** liegen, die zum Anbau dieser Rohstoffe dienen. Die Informationen über die Flächen für den Anbau von Feldfrüchten sind aus der ATKIS-Objektart 4101 „Ackerland“ abgeleitet. Eine ausführ-

liche Differenzierung der Ackerflächen erfolgt im Zuge der Analyseberechnungen (siehe Kapitel 5.3).

Gemeinsam mit den Ackerflächen repräsentieren die Flächen der ATKIS-Objektart Nr. 4102 „Grünland“ **landwirtschaftliche Flächen**, die für die Verwertung der anfallenden Gärrückstände relevant sind. Je näher diese Flächen sich am Standort der BGA befinden, desto geringer sind die Transportkosten und somit auch die Ausbringungskosten dieses transportunwürdigen Produkts.

Abbildung 27 zeigt die Lage der ATKIS-Geoobjekte im Untersuchungsgebiet, die sich als selektive Faktoren auf die Analyseergebnisse auswirken.

**Abbildung 26: Selektive Faktoren aus ATKIS**



Quelle: eigene Darstellung, Datengrundlage ATKIS-DLM.

Als nächster selektiver Faktor fließen die Informationen über Lage, Verteilung und Bestandszahlen von „**Betrieben mit Rindvieh**“ in die Standortbewertung ein. Diese Informa-

tionen lagen nicht in Form von Geodaten vor. Zwar bestehen Daten über den regionalen Tierbestand der landwirtschaftlichen Betriebe in Form des bundesweiten Herkunftssicherungs- und Informationssystems für Tiere (HIT) beim Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten (StMLF). Auch die hessische Tierseuchenkasse verfügt über Daten tierhaltender Betriebe, aus denen sowohl die Standorte der Betriebe und über die Tierbestände auch die anfallenden Güllemengen ermittelt werden können, jedoch ergab eine direkte Anfrage bei den jeweiligen Instituten keine Ergebnisse. Beide Institutionen lehnten die Datenübergabe mit Hinweis auf den Datenschutz ab und verwiesen auf das Hessische Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (HMULV). Daher wurde die Datenanforderung an das Ministerium gerichtet. Die Freigabe der Daten wird von Seiten des Ministeriums allerdings noch juristisch geprüft und es ist nicht absehbar ob die Daten bereitgestellt werden. Zur Beschaffung der Daten über tierhaltende Betriebe als potentielle Güllieferanten musste daher ein Kompromiss erfolgen. So basieren die Informationen über die Standorte von rindviehhaltenden Betrieben und über die dort vorhandenen Rinderbestände auf der hessischen Gemeindestatistik. Die Statistik gibt u.a. Auskunft über die Anzahl der rindviehhaltenden Betriebe sowie der Anzahl der Kälber, Milchkühe und der Schlacht- und Mastrinder auf Gemeindeebene (HESSISCHES STATISTISCHES LANDESAMT 2007c: 56). Daten auf Gemeindeebene haben jedoch gegenüber lagegenauen Betriebsstandorten für die Durchführung der parzellenscharfen Standortanalyse wenig Aussagekraft. Da diese punktgenauen Informationen allerdings nicht verfügbar sind, bilden die in Tabelle 11 aufgelisteten Werte aller Gemeinden des Untersuchungsgebiets eine alternative Datengrundlage.

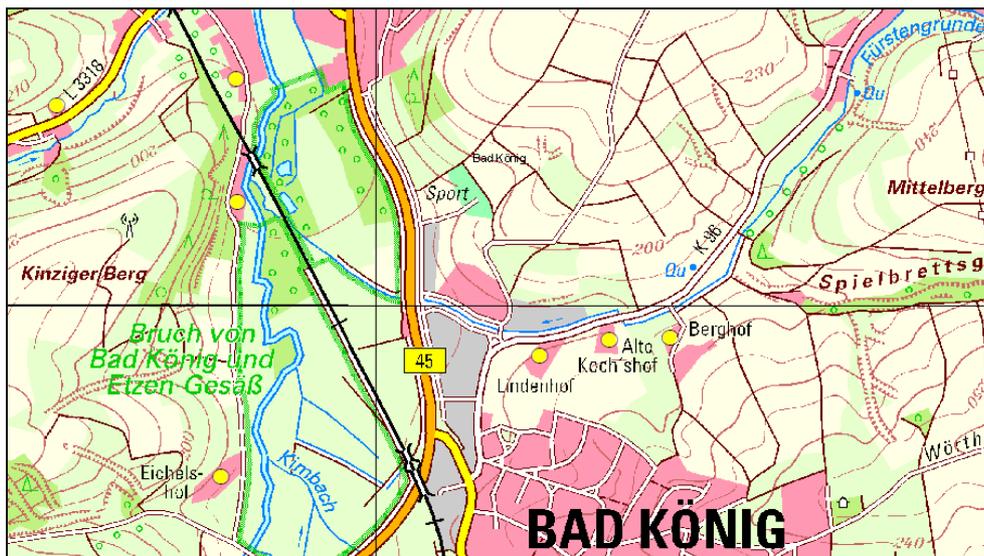
**Tabelle 11: Rindviehhaltende Betriebe und Bestandszahlen im Untersuchungsgebiet**

<b>Gemeinde</b>	<b>Betriebe</b>	<b>Rindviehbestand*</b>	<b>Rindvieh pro Betrieb</b>
Bad König	41	1754	43
Brensbach	18	685	38
Breuberg	9	442	49
Brombachtal	19	562	30
Erbach	33	1511	46
Fränkisch-Crumbach	14	575	41
Höchst	16	1170	73
Lützelbach	22	711	32
Michelstadt	35	1785	51
Mossautal	31	1785	58
Reichelsheim	99	4769	48
Untersuchungsgebiet	<b>337</b>	<b>15749</b>	<b>47</b>
Odenwaldkreis	<b>429</b>	<b>18851</b>	<b>44</b>
* ohne Kälber			

Quelle: Eigene Darstellung nach HESSISCHES STATISTISCHES LANDESAMT 2007c: 56.

Die auf Gemeindeebene erhobene durchschnittliche Bestandszahl pro Betrieb geht unter Zuhilfenahme der DTK 25 in die Analysedatenbank ein. Es wird unterstellt, dass die Betriebsstandorte sich zumeist an Ortsrandlagen bzw. im Außenbereich befinden. Abbildung 27 verdeutlicht das Vorgehen bei der Ermittlung möglicher Standorte von rindviehhaltenden Betrieben am Beispiel der Gemeinde Bad König. Die Betriebsstandorte sind mit gelben Punkten markiert.

**Abbildung 27: Standorte von rindviehhaltenden Betrieben**



Quelle: Eigene Darstellung, Grundlage DTK 25 Blatt 6219 u. 6220.

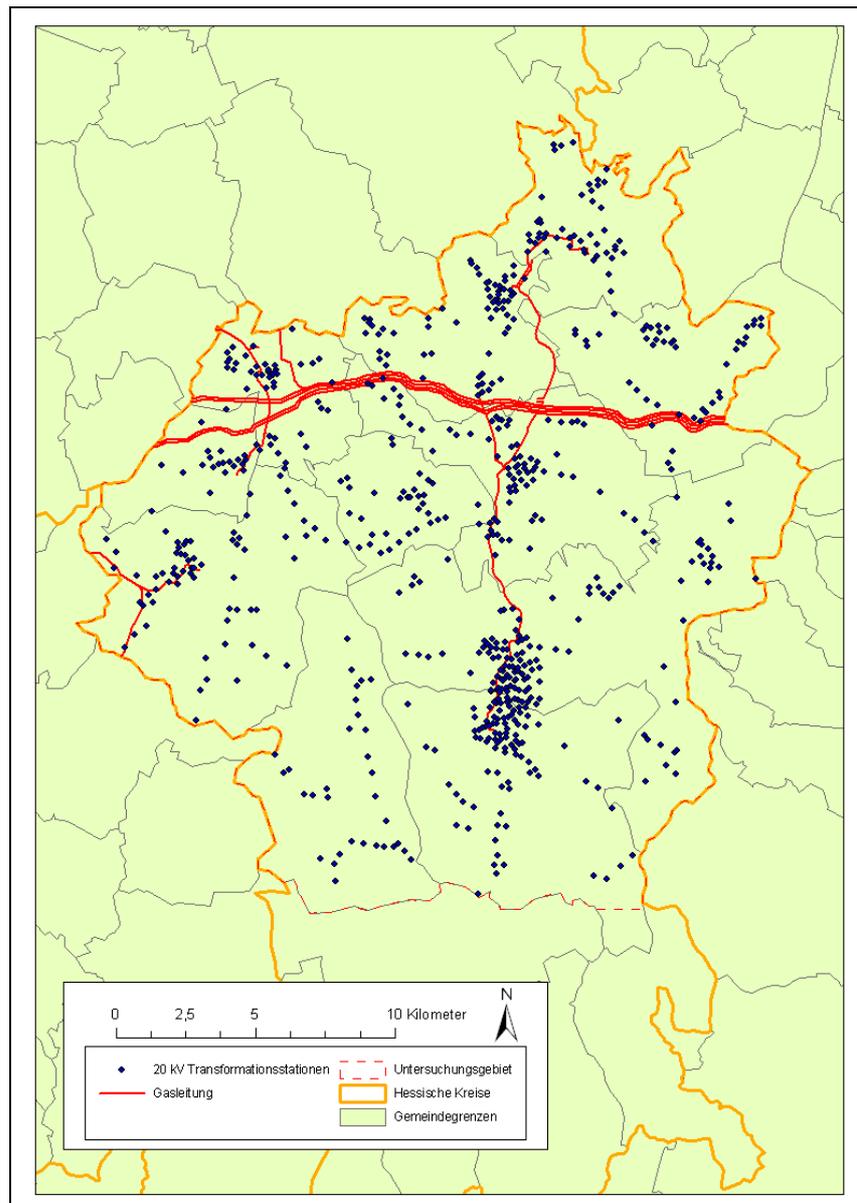
Selbstverständlich spiegelt die angenommene Verteilung der Betriebsstandorte nicht die tatsächliche Lage und insbesondere die realen Viehbestandszahlen der einzelnen Betriebe wieder. Aufgrund der Datensituation liefert diese alternative Datenerhebung jedoch zumindest näherungsweise Informationen, die zur Durchführung der Standortbestimmung von BGA unerlässlich sind.

Die 654 im Untersuchungsgebiet liegenden **20-kV-Transformatorstationen** bilden einen weiteren weichen Faktor der Multikriterienanalysen. Die Lage der Stationen wurde auf Grundlage einer von der HSE zur Verfügung gestellten analogen Karte digitalisiert. Die Stationen werden gebraucht, um eine Biogasanlage mit Strom zu versorgen bzw. um den vor Ort produzierten Strom ins Stromnetz einzuspeisen. Dazu muss vom Standort der BGA ein entsprechendes Kabel zur nächsten Transformatorstation verlegt werden, was wiederum Baukosten verursacht. Die Nähe zur Transformatorstation ist daher vorteilhaft. Zudem stammt der für die BGA benötigte Strom aus dem Stromnetz. Sicherlich könnte der erforderliche Strom auch aus dem BHKW der BGA entnommen werden, allerdings sollte man dabei beachten welche Vergütung verloren geht und diese den geringeren Bezugskosten für konventionellen Strom gegenüberstellen (BÖSS 2008).

Einen alternativen Faktor mit ähnlicher Aussagekraft stellen die 20 kV Kabelleitungen dar. Befindet sich in der Nähe eines aus der Summe aller anderen Faktoren besonders geeigneten Standorts keine Transformatorenstation, so kann es sich unter Umständen lohnen dort eine 20 kV Station zu errichten. Da jedoch die benötigten Informationen nicht in digitaler Form vorlagen und es sich bei diesem Faktor lediglich um eine zusätzliche Möglichkeit der Standortbewertung handelt, wurde auf die aufwendige Digitalisierung verzichtet. Somit fließt nicht die Nähe zur Stromleitung, sondern die Nähe zu den Transformatorenstationen in die Analysen ein.

Auf eine Digitalisierung des **Gasleitungsnetzes** konnte hingegen nicht verzichtet werden. Die Informationen über die Lage der Leitungen bilden einen wesentlichen selektiven Faktor bei der Bestimmung optimaler Standorte von BGA, die Bioerdgas in das Netz einspeisen und sind ebenfalls in Form einer Karte von der HSE bereitgestellt worden. Als problematisch stellte sich die Identifizierung der zur Biomethaneinspeisung geeigneten Netzabschnitte heraus, die ohne eine Modellierung im entsprechenden Informationssystem nicht möglich ist. So sind spezielle Anforderungen an das Gasnetz gegeben, wenn zusätzliches Bioerdgas eingespeist werden soll. Deshalb ist nicht jede Leitung geeignet das zusätzlich anfallende Biogas aufzunehmen. Dies liegt hauptsächlich an dem Mengenvolumen an Erdgas, das in den Sommermonaten durch die Leitungen fließt. Es muss bei der Einspeisung jederzeit gewährleistet sein, dass die sogenannte 2%-Regel des Eichamtes nicht verletzt wird, d.h. bei der Einspeisung darf das Mischverhältnis von 98% Erdgas zu 2% Bioerdgas nicht überschritten werden (BÖSS 2008). Da die spezifischen Eigenschaften der Gasnetzabschnitte anhand der analogen Karte nicht erkenntlich sind, muss davon ausgegangen werden, dass alle vorhanden Leitungen zur Einspeisung von Biome than in Frage kommen.

Die räumliche Lage der Ferngasleitungen und der 20-kV-Transformatorenstationen ist in Abbildung 28 dargestellt.

**Abbildung 28: Ferngasleitungen und 20-kV-Transformatorstationen**

Quelle: Eigene Darstellung, Digitalisierungsgrundlage: Netzgebiet Verteilnetzbetreiber Rhein-Main-Neckar GmbH & Co. KG. Karte „Hoch- und Mittelspannungsnetz“ und Karte „Ferngasleitungen“. Stand: Sept. 2007.

### 5.3 Multikriterienanalysen

Nach der ausführlichen Präsentation der Ausgangsdaten werden in diesem Abschnitt sowohl die für die folgenden Standortanalysen geltenden Annahmen, die Entfernungsangaben der einzelnen Faktoren als auch die Klassengrenzen und Gewichtungsfaktoren der selektiven Kriterien beschrieben, bevor die Analyseergebnisse vorgestellt werden.

Zunächst erfolgt die Bestimmung der restriktiven Flächen, wobei zusätzlich zu den bereits vorgestellten Geodaten mit Ausschlussfunktion noch die in Kapitel 5.3.1 genannten Abstandsregelungen berücksichtigt werden. Die restriktiven Kriterien sind für alle weiteren

Analyseergebnisse identisch, so dass lediglich ein Berechnungsdurchlauf benötigt wird, dessen Ergebnis jedoch für alle weiteren Verschneidungsoperationen im GIS zum Einsatz kommt.

Um eine abgestuften Bewertung der potentiellen Standorte zu erhalten, fließen außer den restriktiven Kriterien noch selektive Kriterien in die Analysen ein. Sowohl die Auswahl der selektiven Kriterien, als auch die Gewichtung der einzelnen Faktoren und die Ermittlung von Maximalabständen und Klassengrenzen können variabel gestaltet werden. Die Verschneidung beider Kriterientypen ermöglicht Aussagen bzgl. der Standorteignung.

Zur Bewertung der erarbeiteten Methodik sollen mehrere Szenarien berechnet und ihre Ergebnisse auf Plausibilität überprüft werden. Gleichzeitig soll anhand der Berechnungen der unterschiedlichen Szenarien aufgezeigt werden, inwiefern sich veränderte Rahmenbedingungen auf die Modellergebnisse auswirken und wie diese neuen Gegebenheiten in die Modelle zu integrieren sind. Außerdem soll die Flexibilität der Modelle insofern ausgereizt werden, als dass zwei unterschiedliche Produktionsverfahren, nämlich die konventionelle Biogas- und die Biomethanproduktion, betrachtet werden. Auch hierbei soll primär aufgezeigt werden, wie veränderte Anforderungen dieser unterschiedlichen Verfahren in die Modelle zu implementieren sind.

Aufgrund der damit verbundenen Vorteile wie z.B. Entkoppelung örtlicher Nachfragedisparitäten liegt das Hauptaugenmerk der Analysen zunächst auf biomethanproduzierenden Anlagen. Unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen dieses Anlagentyps wird in Kapitel 5.3.2 das Szenario „verschärfte Rahmenbedingungen“ simuliert, welches die aktuelle Situation der Biogasproduktion abbilden soll. Anschließend erfolgt in Abschnitt 5.3.3 die Berechnung einer Variation dieses Szenarios, für die eine grundlegende Annahme darauf basiert, dass nur eine bestimmte Auswahl von Ackerflächen für den Anbau von Silomais in Frage kommt.

Abschnitt 5.3.4 erläutert die Berechnung dieser Szenariovariation für konventionelle BGA. Diese Standortanalyse dient hauptsächlich zur Demonstration der Flexibilität des entwickelten Modells. Die Modellstruktur erlaubt eine komfortable Manipulation der Eingangsparameter und kann daher sowohl von Seiten der Produktionsverfahren als auch von Seiten übergeordneter Rahmenbedingungen auf veränderte Anforderungen angepasst werden.

Unter Annahme günstiger Voraussetzungen für die Biogaserzeugung erfolgt in Kapitel 5.3.5 die Analyse des letzten Szenarios „verbesserte Rahmenbedingungen“. Am Beispiel konventioneller Anlagen wird gezeigt, wie veränderte Produktionsbedingungen in die Mo-

dellberechnungen zu integrieren sind und inwiefern sich diese Veränderungen auf die Ergebnisse im Vergleich zur vorherigen Szenarienmodellierung auswirken.

### 5.3.1 Restriktive Faktoren

Den ersten Schritt zur Ermittlung der folgenden Analyseergebnisse bildet die Generierung der Restriktionskarte. Die Annahmen bzgl. der Restriktionsflächen sind für alle Analysevariationen und Szenarienberechnungen identisch.

Zusätzlich zu den in Kapitel 5.2 vorgestellten Geoobjekten mit restriktiver Funktion existieren um einige dieser Geoobjekte Bereiche, die ebenfalls gemieden werden müssen. Jedoch existieren kaum rechtliche Regelungen, die sich explizit auf Entfernungsangaben von Vergärungsanlagen zu bestimmten räumlichen Objekten beziehen. Dieser Umstand ist dadurch erklärbar, dass die Baugenehmigung einer BGA meist einer Einzelfallprüfung unterliegt. Um dennoch für die Analyse notwendige Aussagen treffen zu können, sind generelle Annahmen bezüglich der Mindestabstände unvermeidbar. Die konkreten Abstandswerte stammen aus der „Technischen Anleitung Luft“ (TA Luft) und dem Bundesfernstraßengesetz (FStrG) sowie aus einer wissenschaftlichen Arbeit mit ähnlicher Fragestellung von MA et al. (2005).

Die TA Luft bezieht sich als einzige Rechtsgrundlage explizit auf Abstände von Vergärungsanlagen zu anderen Flächennutzungen. Sie regelt unter Nr. 5.4.8.6.1. den Mindestabstand von Vergärungsanlagen zur Wohnbebauung, die 300 Meter nicht unterschreiten soll. Die Abstandsregelung richtet sich jedoch ausschließlich auf Wohnbauflächen. Daher bildet der 300m breite Puffer um Wohnbauflächen zusätzliche Restriktionsgebiete. Zur Bestimmung dieses Puffers ist erneut der ATKIS-Datensatz zum Einsatz gekommen, beinhaltet er mit der Objektartnr. 2111 „Wohnbaufläche“ jene baulich geprägten Flächen, „die ausschließlich oder vorwiegend dem Wohnen dient. Neben den Wohngebäuden sind z.B. anzutreffen: der Versorgung der Fläche dienende Läden, nichtstörende Handwerksbetriebe, Einrichtungen für kirchliche, kulturelle, soziale und gesundheitliche Zwecke“ (ATKIS-OK: 2003).

Darüberhinaus sind unter der ATKIS-Objektartnr. 2114 Informationen über Flächen „besonderer funktionaler Prägung“ enthalten. Dabei handelt es sich um bauliche geprägte Flächen, auf denen Gebäude und/oder Anlagen bestimmter Funktion vorherrschen. Hierzu gehören die Funktionen „Verwaltung“, „Gesundheit und Soziales“ (z.B. Krankenhaus), „Bildung“, „Forschung“ (z.B. Universität), „Kultur“ (z.B. Kirche), „Sicherheit und Ordnung“ (z.B. Haftanstalt), „Wochenend- und Ferienhausbebauung“ sowie „Landesverteidigung“ (ATKIS-OK: 2003). Zwar sind diese Gebäude bzw. Anlagen nicht Wohnbebauung im eigentlichen Sinne, jedoch ist die Einhaltung des Mindestabstands von 300 m auch für die-

se Objekte wünschenswert. Die Summe aller unter dem Begriff „**Wohnbaufläche**“ zusammengefassten Geoobjekte hat mit ca. 2030 ha einen Anteil von 4,5 % des Untersuchungsgebiets.

Eine rechtliche Aussage bzgl. der **Straßenabstände** ist im Bundesfernstraßengesetz zu finden (FStrG). § 9 FStrG besagt, dass entlang von Bundesstraßen im Abstand bis zu 20 Metern keine Hochbauten errichtet werden dürfen. Da diese Angabe die einzige entfernungsrelevante Angabe aller untersuchter Gesetzestexte ist, soll sie im Rahmen der Analyse für alle im Untersuchungsgebiet vorhandenen Verkehrswege, d.h. für befestigte Straßen, Schienen und Wege gelten.

Eine Schutzzone von jeweils 100 m wird aus Sicherheitsgründen für **Gewässer** und **Gasleitungen** angenommen (MA et al. 2005: 596). Damit soll erstens vermieden werden, dass im Falle von Leckagen die Gärsubstrate, bzw. -rückstände in Gewässer gelangen und zweitens bei Notfällen die Explosionsgefahr minimiert wird.

Die in Tabelle 12 aufgelisteten Geoobjekte und Mindestabstände bilden die Grundlage zur Berechnung der Restriktionsflächen im Untersuchungsgebiet.

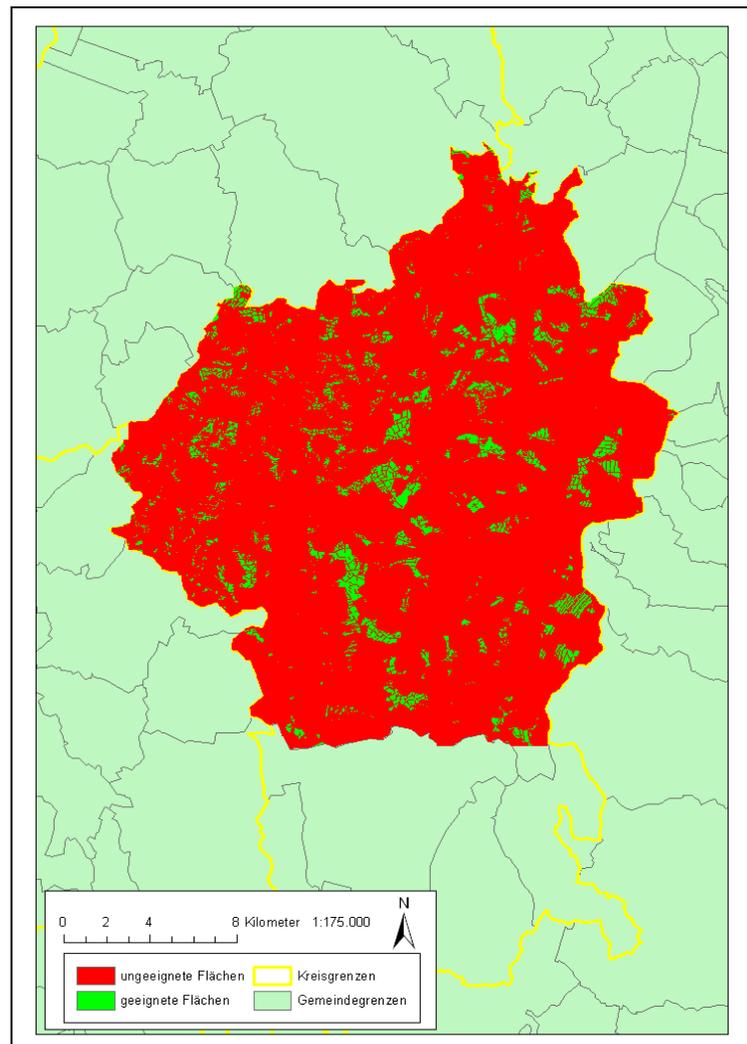
**Tabelle 12: Restriktive Faktoren und Mindestabstände**

<b>Restriktive Faktoren</b>	<b>Mindestabstände</b>
Hangsteigung >15 %	-
Wald	-
Gewässer	100 m
Überbaute Gebiete	-
Wohnbauflächen	300 m
Verkehrswege	20 m
Naturschutzgebiete	-
Wasserschutzgebiete Zonen I und II	-
Gasleitungen	100 m

Quelle: eigene Zusammenstellung, nach MA et al. (2005: 596), FStrG u. TA Luft.

Sämtliche Arbeitsschritte bezgl. der Ermittlung der restriktiven Flächen wie z.B. die Generierung von Pufferzonen, Konversionen in das Rasterformat, Klassifizierungen sowie arithmetische Operationen wurden unter Zuhilfenahme des ESRI ModelBuilders 9.2 in einem Modell integriert. Eine Abbildung des Modells ist im Anhang 1 zu finden. Aus den Berechnungen des Modells ergibt sich die in Abbildung 29 dargestellte Restriktionskarte. Grüne Bereiche sind für die Errichtung von BGA geeignet, rote Flächen hingegen nicht.

Abbildung 29: Restriktionskarte



Quelle: Eigene Darstellung.

Das Resultat der Berechnungen ergibt, dass ca. 3192 ha, d.h. 7 % der Fläche der Untersuchungsregion für die Errichtung von BGA in Frage kommen. Im Vergleich mit der Restriktionskarte der Modellregion wird deutlich, dass in der Realität wesentlich weniger Flächen zur Bebauung in Frage kommen, was hauptsächlich damit zusammenhängt, dass in der Untersuchungsregion neben ausgedehnten Waldflächen auch starke Reliefunterschiede vorliegen. Welcher dieser Flächen besonders gut und welche weniger gut als Standort für BGA geeignet sind, klärt die Berechnung der selektiven Kriterien.

### 5.3.2 Szenario „verschärfte Rahmenbedingungen Bioerdgas“

Weitere Schritte der Multikriterienanalysen bestehen aus der Zusammenstellung, Klassifizierung und Gewichtung der selektiven Faktoren sowie der abschließenden Durchführung von Verschneidungsoperationen im GIS. Diese Arbeitsschritte werden exemplarisch anhand des Szenarios „verschärfte Rahmenbedingungen“ für BGA mit Biomethaneinspeisung vorgestellt. Das Szenario basiert auf Überlegungen zu den aktuellen

Rahmenbedingungen der Biogaserzeugung, die in starker Konkurrenz zu gängigen Produktionsverfahren der Landwirtschaft steht (vgl. Kapitel 2.7).

Nach der Konversion der Vektordaten in das Rasterformat ist die Bestimmung der maximal möglichen Entfernungswerte notwendig. Für die Faktoren „befestigte Straßen“, „Transformatorstationen“ und „Gasleitungen“ wurde die direkte Luftlinienentfernung berücksichtigt, da angenommen wird, dass der Anschluss an diese Geoobjekte auf direktem Wege und ohne die Berücksichtigung von Hindernissen erfolgen kann.

Die Entfernungen zu den Faktoren „Ackerland“, „Betriebe mit Rindvieh“ und „landwirtschaftliche Flächen“ sollen jedoch nicht als Luftliniendistanz ermittelt werden, weil der Transport der Rohstoffe an Verkehrswege gekoppelt ist. Daher sind die Rohstofffundorte nicht auf dem direkten Weg, sondern nur über Umwege erreichbar. BERG (2007a: 13) geht davon aus, dass die Transportentfernung für Silomais unter 15 km liegen soll, was einer Luftliniendistanz von ca. 10 km entspricht. Aus diesen Überlegungen leitet sich ein Umwegfaktor von 1,66 ab (vgl. BERENS u. KÖRLING: 1983). Dieser Faktor bewirkt eine Verkleinerung der Einzugsgebiete um rund 33 % und wird zur Vereinfachung der Modellberechnungen auf die drei Einzugs- bzw. Ausbringungsgebiete von Silomais, Gülle und Gärrückstand angewendet. Die ursprünglich geplante Bestimmung der tatsächlichen Wegstreckenentfernungen scheiterte aufgrund der Größe der Untersuchungsregion und der Vielzahl der Feldwege und Straßen. Für den Ansatz der geplanten Standortbestimmungen ist die Reduzierung der Einzugsgebiete um jeweils 33 % ein annehmbarer Kompromiss. Im Zuge der methodischen Überlegungen (vgl. Kapitel 4) wurden die maximalen Transportentfernungen von Gülle und Mais anhand der Ergebnisse einer Studie des WUPPERTAL INSTITUTS (2006: 16 f.) festgelegt. Gülle soll demnach möglichst nicht, höchstens jedoch fünf bis zehn km weit transportiert werden. NawaRos können aufgrund der höheren Energiedichte über Strecken von 15 bis 20 km befördert werden (ebd.) Im Hinblick auf die aktuelle Situation der Biogasbranche (vgl. Kapitel 2.7), kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Entfernungsangaben nicht mehr aktuell sind. Vielmehr ist die Wirtschaftlichkeit von BGA aufgrund der festen Einspeisevergütungen und zugleich hoher Rohstoffpreise nur gegeben, wenn alle Kostenpunkte auf ein Minimum reduziert sind.

Zur Berechnung des ersten Szenarios „verschärfte Rahmenbedingungen Bioerdgas“ wird deshalb die reine Luftliniendistanz für Silomais von 15.000 m auf 11.250 m, für Gülle von 5.000 m auf 1.500 m und für den Gärrückstand von 5.000 m auf 4500 m reduziert, um der aktuellen Marktsituation gerecht zu werden. Abzüglich der Verkleinerung der Einzugsradien ergeben sich daraus die in Tabelle 13 dargestellten Maximalentfernungen.

Die Reklassifizierung der Entfernungsangaben erfolgt in jeweils fünf Klassen, wobei Schulnoten entsprechend Klasse I als „sehr gut“ bewertet wird, während Klasse V als „mangelhaft“ anzusehen ist. Die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren richtet sich in Anlehnung an MA et al. (2005: 597) sowie an Aussagen von Seiten der HSE (BÖSS 2008). Eine Übersicht der verwendeten selektiven Faktoren für das Szenario „verschärfte Rahmenbedingungen“ mit Klassengrenzen und Gewichtungsfaktoren liefert Tabelle 13.

**Tabelle 13: Selektive Faktoren des Szenarios „verschärfte Rahmenbedingungen“**

Selektive Faktoren	Klassengrenzen	Gewichtung
Befestigte Straßen	I < 100 m > II < 200 m > III < 300 m > IV < 400 m > V < 500 m	2 (wichtig)
Transformatorstationen	I < 200 m > II < 400 m > III < 600 m > IV < 800 m > V < 1000m	1 (weniger wichtig)
Gasleitungen	I < 160 m > II < 320 m > III < 480 m > IV < 640 m > V < 800 m	3 (sehr wichtig)
Ackerland	I < 1500 m > II < 3000 m > III < 4500 m > IV < 6000 m > V < 7500 m	3 (sehr wichtig)
Betriebe mit Rindvieh	I < 200m > II < 400m > III < 600m > IV < 800 m > V < 1000 m	3 (sehr wichtig)
Landwirtschaftliche Flächen	I < 600 m > II < 1200 m > III < 1800 m > IV < 2400 m > V < 3000 m	2 (wichtig)
Umwegfaktor k=1,66 bei Ackerland, Betrieben mit Rindvieh und landwirtschaftlichen Flächen (vgl. BERENS u. KÖRLING 1983 u. BERG 2007a: 13)		

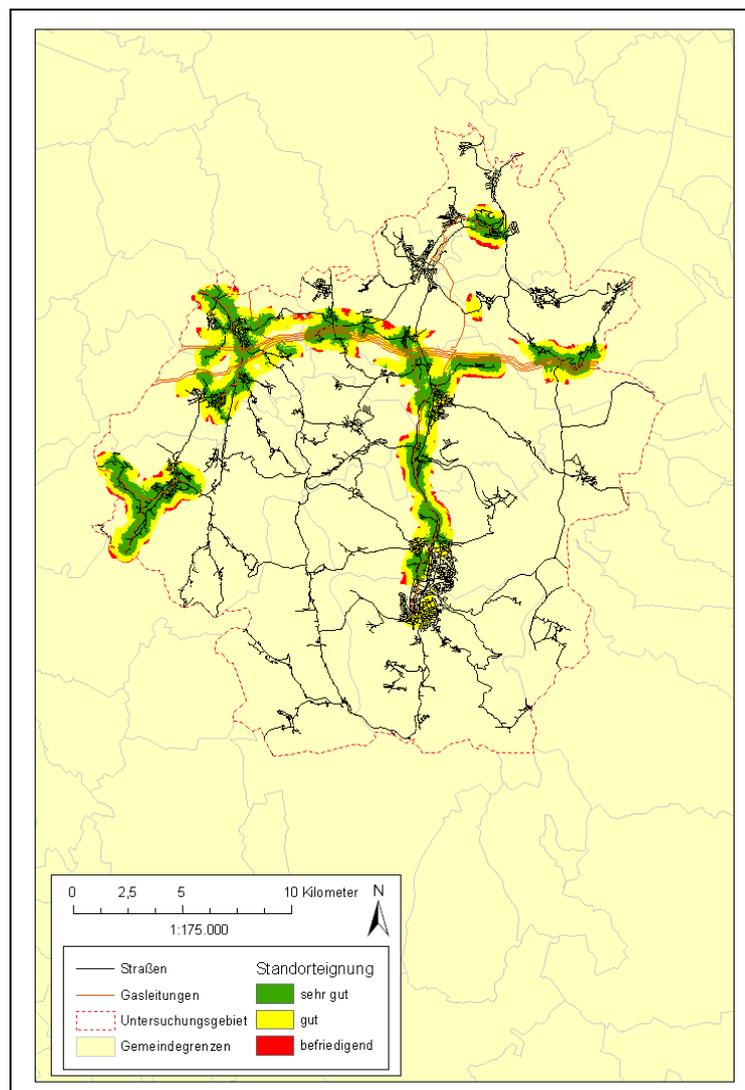
Quelle: eigene Darstellung. Maximalentfernungen und Gewichtungen teilweise nach MA et al. 2005: 597 u. BÖSS 2008.

Eine Besonderheit ist bei der Betrachtung von Ackerland als potentielle Flächen zum Anbau von Silomais zu beachten. Es wird angenommen, dass das Vorhandensein von Ackerland den Anbau von Silomais prinzipiell ermöglicht. Dies ist jedoch nur dann der Fall, wenn die ökonomische Vorzüglichkeit dieser Energiepflanze gegenüber anderen Marktfrüchten gegeben ist. Das Treffen einer Aussage bzgl. der Vorzüglichkeit bestimmter Produktionsverfahren an einem landwirtschaftlichen Standort ist im Vergleich mit anderen landwirtschaftlichen Verfahren jedoch keine triviale Angelegenheit. Vielmehr ist diese wissenschaftliche Fragestellung seit einigen Jahren Gegenstand mehrerer Forschungsgruppen. Eine dieser Gruppen ist am Sonderforschungsbereich 299 „Landnutzungskonzepte für periphere Regionen“ in Gießen tätig. Mit dem entwickelten räumlich-expliziten Modell „ProLand“ kann sowohl die parzellenscharfe Landnutzung in bestimmten Regionen sowie die Vorzüglichkeit von Anbaufrüchten prognostiziert werden. Die Modellierung ist bereits für die hessischen Regionen Lahn-Dill-Bergland sowie Wetterau erfolgt. Die Übertragung der Forschungsergebnisse auf südhessische Untersuchungsgebiete mit besonderem Fokus auf erneuerbare Energien aus Biomasse soll erst im nächsten Projekt, dem Transferbereich „Energiepflanzen, Wirtschaft und Umwelt“ erfolgen. Daher ist im Rahmen dieser Diplomarbeit die Identifizierung von vorzüglichen Silomaisflächen nicht möglich. Um dennoch Ergebnisse erzielen zu können, wird davon ausgegangen, dass der Landwirt als homo oeconomicus auftritt. Zur Berechnung des ersten Szenarios wird deshalb unterstellt,

dass die Existenz einer BGA sich positiv auf die Vorzüglichkeit des Anbaus von Energiepflanzen auswirkt, so dass diese Produkte tatsächlich auf den umliegenden Ackerflächen angebaut werden. Für die Untersuchungsregion ist diese Annahme insofern zulässig, als dass Silomais mit über 50.000 t pro Jahr bereits die Hauptanbauf Frucht repräsentiert.

Auch die zur Bestimmung der Selektionsflächen vorgenommenen Datenverarbeitungsschritte sind via ESRI ModelBuilder 9.2 in ein Modell (siehe Anhang 2) integriert worden. Das Ergebnis der Operationen ist in Abbildung 30 als „Selektionsflächenkarte“ dargestellt. „Sehr gute“ Flächen sind grün, „gute“ Flächen gelb und „befriedigende“ Flächen rot gefärbt. Die Reduzierung des Bewertungsschemas von fünf auf drei Klassen resultiert daher, dass alle Ackerflächen mit ihren vergleichsweise hohen Einzugsradien und hoher Gewichtung in die Analyseergebnisse eingehen. Ein differenziertes Ergebnis liefert hingegen die in Kapitel 5.3.3 beschriebene Szenariovariation.

**Abbildung 30: Selektionsflächenkarte**

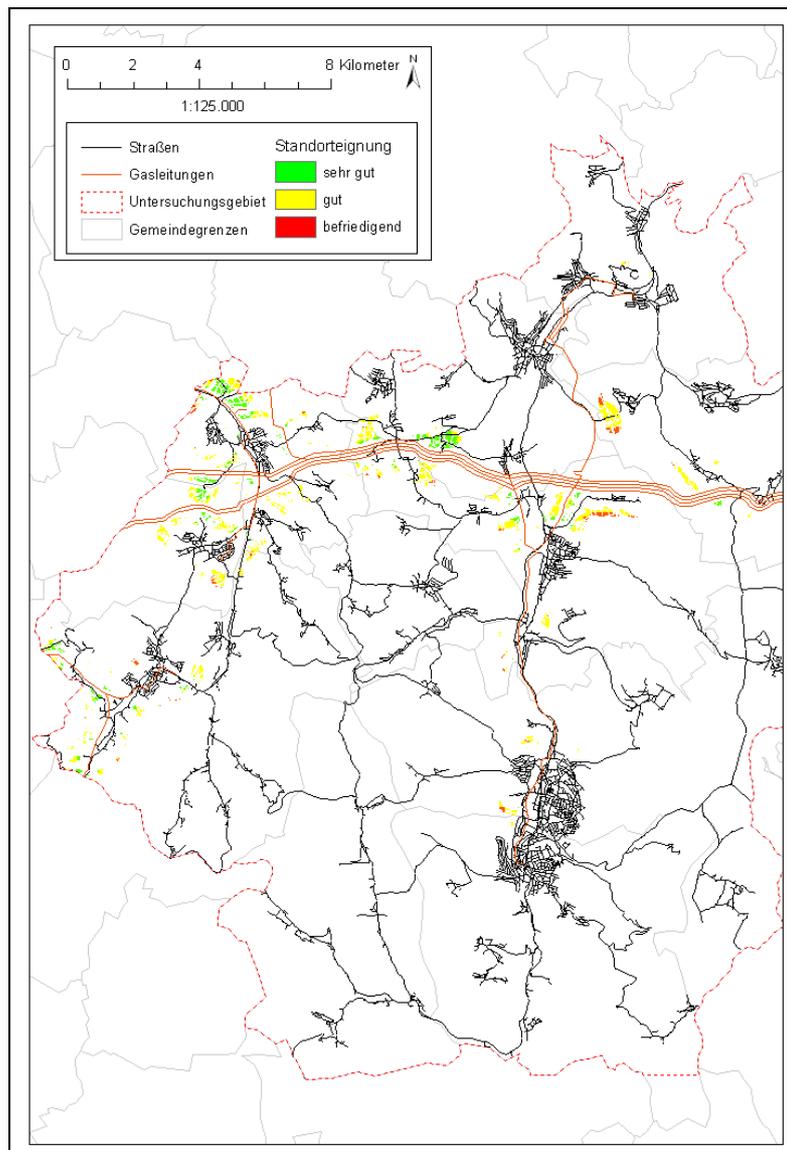


Quelle: eigene Darstellung.

Anhand dieses Zwischenergebnisses wird die starke Bindung der Standorte entlang der Gasleitungen sowie der befestigten Straßen deutlich, was mit den relativ geringen Maximalentfernungen dieser beiden Faktoren zusammenhängt.

Als Ergebnis der Verschneidung aus dem restriktiven Endlayer und dem selektiven Endlayer ergibt sich für die Berechnungen des ersten Szenarios „verschärfte Rahmenbedingungen“ unter Berücksichtigung von BGA zur Biomethaneinspeisung die in Abbildung 32 dargestellte Standorteignungskarte.

**Abbildung 31: Standorteignungskarte**



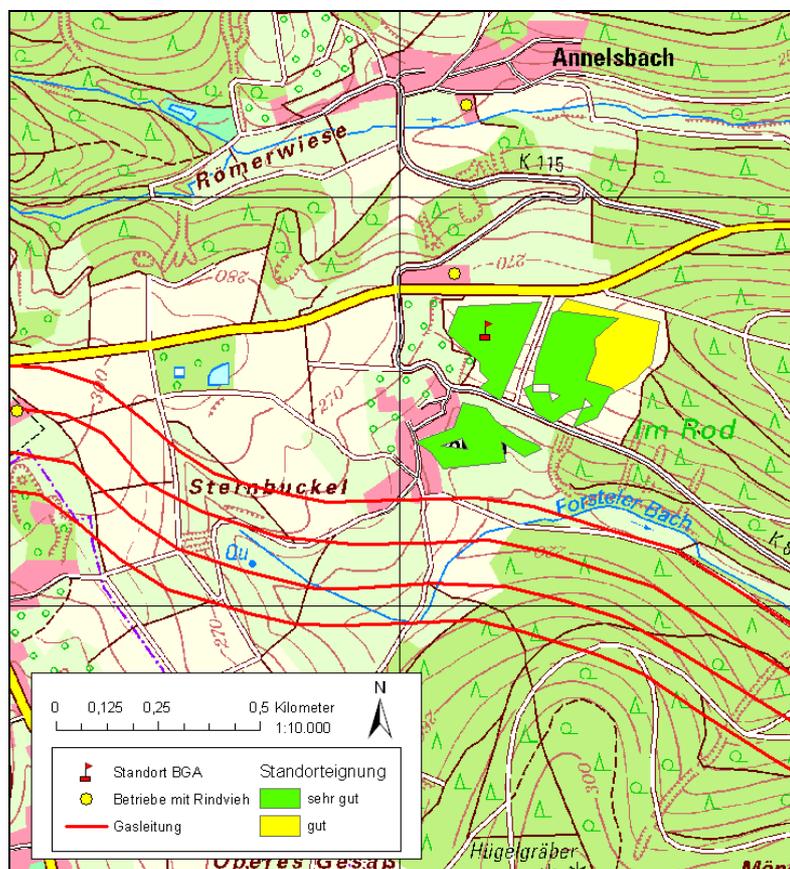
Quelle: eigene Darstellung

Die Standorteignungskarte bietet einen ersten Hinweis auf besonders gut geeignete Anlagenstandorte. Bei der näheren Betrachtung wird allerdings auch deutlich, dass die Karte relativ kleine Flächen ausweist. Es erscheint fraglich, ob die Ausmaße dieser kleinen Flächen zur Bebauung mit einer BGA ausreichen, beträgt doch die benötigte Mindestgröße

des zu bebauenden Grundstücks rund 2,1 ha. Dieses Areal wird für Anordnung und Aufbau der Anlage inkl. Zentrallager und Silo benötigt (SEEBACH 2006).

Daher erfolgt die Entfernung aller zusammenhängenden Flächen mit einer Mindestgröße von 2,1 ha aus dem Datensatz, was dazu führt, dass lediglich 32 von ursprünglich 851 ausgewiesenen Flächen übrig bleiben. Von diesen 32 Flächen sind vier Areale mit sehr gut, 26 mit gut und zwei mit befriedigend bewertet. Drei der besonders gut geeigneten Flächen sowie eine gut geeignete Fläche sind in Abbildung 33 zu sehen. An diesen Stellen ist unter Berücksichtigung aller Faktoren der optimale Standort für eine Vergärungsanlage, die aus Rindergülle und Silomais Biogas produziert und in das Gasnetz einspeist.

**Abbildung 32: Optimaler Standort einer BGA**



Quelle: eigene Darstellung. Grundlage DTK 25, Blatt 6219.

Die Identifikation dieser 32 Flächen und ihre Bewertung wird insofern als bemerkenswert angesehen, als dass das Ergebnis aus dem ersten Durchlauf der Modellberechnungen resultiert. Aufgrund der theoretischen Annahmen und ihrer Erprobung in der Modellregion scheinen die angenommenen Bedingungen eine solide Basis darzustellen, so dass keine weiteren Anpassungen der Modellfaktoren notwendig waren, um zu dem dargestellten Ergebnis zu gelangen.

Die Analyse könnte an dieser Stelle als abgeschlossen betrachtet werden. Jedoch können die in die Analyse einfließenden Geodaten unter Berücksichtigung des erzielten Ergebnisses zugleich bei der Ermittlung benötigter Anbauflächen helfen, sofern die Leistung der BGA und die vorhandenen Güllepotentiale bekannt sind.

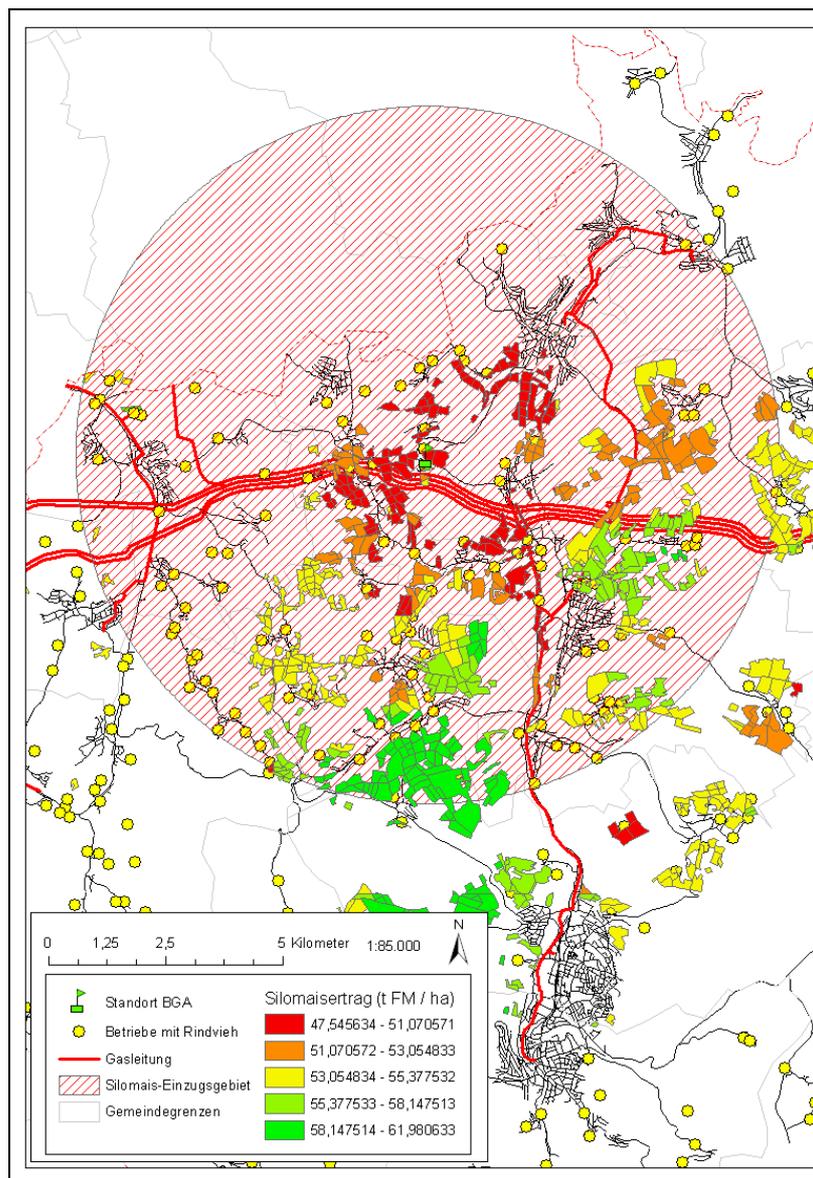
Angenommen ein mit „sehr gut“ bewertetes Grundstück steht für die Bebauung mit einer BGA zur Verfügung (in Abbildung 33 durch ein rotes Fähnchen symbolisiert), so besteht der nächste Schritt darin, die verfügbaren Güllemengen zu untersuchen um daraus eine Schlussfolgerung zur Ermittlung der Größe des benötigten Silomais-Anbaugebiets treffen zu können.

In unmittelbarer Nähe des identifizierten Standorts befindet sich ein Betrieb mit einem Bestand von 73 Rindern. Soll die Leistung der BGA 500 kW betragen, dann könnten die jährlich anfallenden 1825 t Gülle ca. 1,8 % des jährlichen Substratbedarfs der BGA abdecken (zur Berechnung siehe Anhang 3).

Die restlichen 98,2 % müssten aus Silomais gewonnen werden, falls keine zusätzliche Gülle aus umliegenden Betrieben zur Verfügung steht, was im untersuchten Beispiel unter den Bedingungen des Szenarios der Fall ist. Um eine Aussage bzgl. des Flächenbedarfs des Silomaisanbaugebiets treffen zu können, müssen die Erträge der Ackerflächen bekannt sein. Die mit einem Fehler von 7% behaftete absolute Höhe der Silomaiserträge stammt aus dem Modell „ProLand“. Das Modell ist in der Lage unter Berücksichtigung von natürlichen Standortfaktoren wie z.B. Niederschlag, Temperatur, Boden und Exposition u.a. potentielle Erträge für verschiedene Marktfrüchte auf unterschiedlichen Standorten zu ermitteln. Zur Klärung des Flächenbedarfs dient eine aus dem Modell abgeleitete Ertragskarte für Silomais als Berechnungsgrundlage.

Geht man vom geringsten Silomaisertrag der umliegenden Ackerflächen in Höhe von 50,5 t Trockenmasse je Hektar (TM/ha) aus, dann wären zur Versorgung der Anlage Anbauflächen im Umfang von 221 ha erforderlich (siehe Anhang 4). Bei weiter entfernten Flächen steigt der Ertrag auf bis zu 60 t TM/ha, so dass entsprechend weniger Flächen (180 ha) benötigt würden. Gleichzeitig müsste die Biomasse jedoch über längere Distanzen transportiert werden, wie Abbildung 33 verdeutlicht. Besonders ertragsstarke Flächen sind grün dargestellt, ertragsschwache Flächen erscheinen rot.

Abbildung 33: Einzugsgebiet von Silomais



Quelle: Eigene Darstellung. Datengrundlage der Silomais-erträge nach „ProLand“.

Ob die Ertragsgewinne längere Transportwege und damit auch höhere Erntekosten rechtfertigen, hängt von einer Vielzahl ökonomischer Parameter der Biogasproduktion ab und ist im Einzelfall genauer zu untersuchen. Da sich im Einzugsradius zahlreiche Ackerflächen befinden und angenommen wird, dass auf allen Ackerflächen Silomais angebaut werden kann, ist die Bestimmung der maximalen Anlagenleistung anhand dieses Beispiels nicht besonders realistisch und unterbleibt daher. Zur Bestimmung der Anlagengröße muss also bekannt sein welche Flächen für den Anbau von Energiepflanzen verwendet werden. Da diese Information nicht vorliegt, soll die folgende Szenariovariation beispielhaft aufzeigen, welche Auswirkungen eine detaillierte Identifizierung von NawaRo-Flächen auf die Ergebnisse der Analyse hat.

### 5.3.3 Szenariovariation „verschärfte Rahmenbedingungen Bioerdgas“

Als eine Variation des Szenarios „verschärfte Rahmenbedingungen Bioerdgas“ soll für BGA, die Biomethan in das Erdgasnetz einspeisen, angenommen werden, dass nicht alle Ackerflächen zum Anbau von Silomais geeignet sind, sondern lediglich die Standorte, die einen hohen Ertrag garantieren. Diese Szenariovariation soll die Idee des möglichst geringen Flächenverbrauchs beim Anbau der Substrate widerspiegeln. Es darf nicht unberücksichtigt bleiben, dass auf den Flächen mit hohem Silomaisertrag unter Umständen auch mit anderen Marktfrüchten besonders hohe Erträge erzielt werden können. Daher deutet die Annahme nicht zwangsläufig darauf hin, dass es sich um besonders vorzügliche Flächen zum Anbau von Silomais handelt, sondern dient lediglich zur Reduzierung der Anbauflächen.

Die getroffene Annahme soll demonstrieren, wie eine Änderung der Bedingungen in das Modell zu implementieren ist und welchen Einfluss die Modifikation der Inputvariablen auf das Endergebnis hat.

Zur Berechnung der Szenariovariante muss die Auswahl der selektiven Faktoren verändert werden, während die restriktiven Kriterien unverändert bleiben. Anstelle von „Ackerland“ tritt als neuer selektiver Faktor der Faktor „Ackerland mit hohem Ertrag“. Die Klassengrenzen, Maximalentfernungen sowie Gewichtungen bleiben identisch, wie Tabelle 14 belegt.

**Tabelle 14: Selektive Faktoren der Szenariovariation**

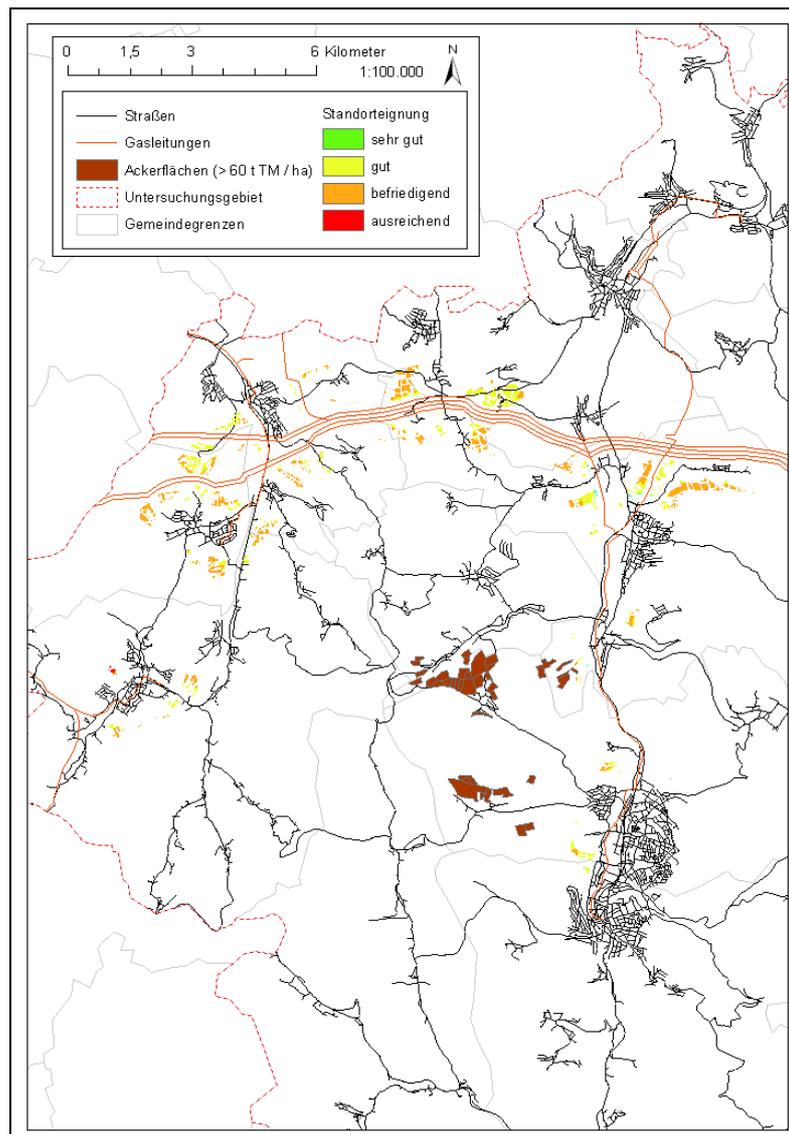
Selektive Faktoren	Klassengrenzen	Gewichtung
Befestigte Straßen	I < 100 m > II < 200 m > III < 300 m > IV < 400 m > V < 500 m	2 (wichtig)
Transformatorstationen	I < 200 m > II < 400 m > III < 600 m > IV < 800 m > V < 1000m	1 (weniger wichtig)
Gasleitungen	I < 160 m > II < 320 m > III < 480 m > IV < 640 m > V < 800 m	3 (sehr wichtig)
Ackerland mit hohem Ertrag	I < 1500 m > II < 3000 m > III < 4500 m > IV < 6000 m > V < 7500	3 (sehr wichtig)
Betriebe mit Rindvieh	I < 200m > II < 400m > III < 600m > IV < 800 m > V < 1000 m	3 (sehr wichtig)
Landwirtschaftliche Flächen	I < 600 m > II < 1200 m > III < 1800 m > IV < 2400 m > V < 3000	2 (wichtig)
Umwegfaktor k=1,66 bei Ackerland, Betrieben mit Rindvieh und landwirtschaftlichen Flächen (vgl. BERENS u. KÖRLING 1983 u. BERG 2007a: 13)		

Quelle: eigene Darstellung. Maximalentfernungen und Gewichtungen teilweise nach MA et al. 2005: 597 u. BÖSS 2008.

Als „Ackerland mit hohem Ertrag“ gilt jede Fläche, deren Silomaisertrag höher als 60 t TM / ha ist. Das in Abbildung 34 dargestellte Zwischenergebnis deutet im Vergleich zu der ersten Standorteignungskarte einerseits darauf hin, dass sich die Anzahl der potentiell zur Bebauung ausgewiesenen Flächen verringert hat. Zudem ist eine Verschlechterung der Flächenbewertung zu beobachten. Standorte die im ersten Durchlauf mit „sehr gut“ be-

wertet wurden sind nunmehr „befriedigend“. Ferner ist eine differenzierte Abstufung zu beobachten. Die Bewertungsklassen reichen in diesem Fall von „sehr gut“ bis „ausreichend“, während sie im ersten Berechnungsergebnis lediglich von „sehr gut“ bis „befriedigend“ reichten. Daher ist absehbar, dass eine weitere Differenzierung der Bewertungsklassen eintritt, wenn die Anzahl der Silomaisflächen abnimmt und die lagegenaue Verteilung dieser Flächen bekannt ist.

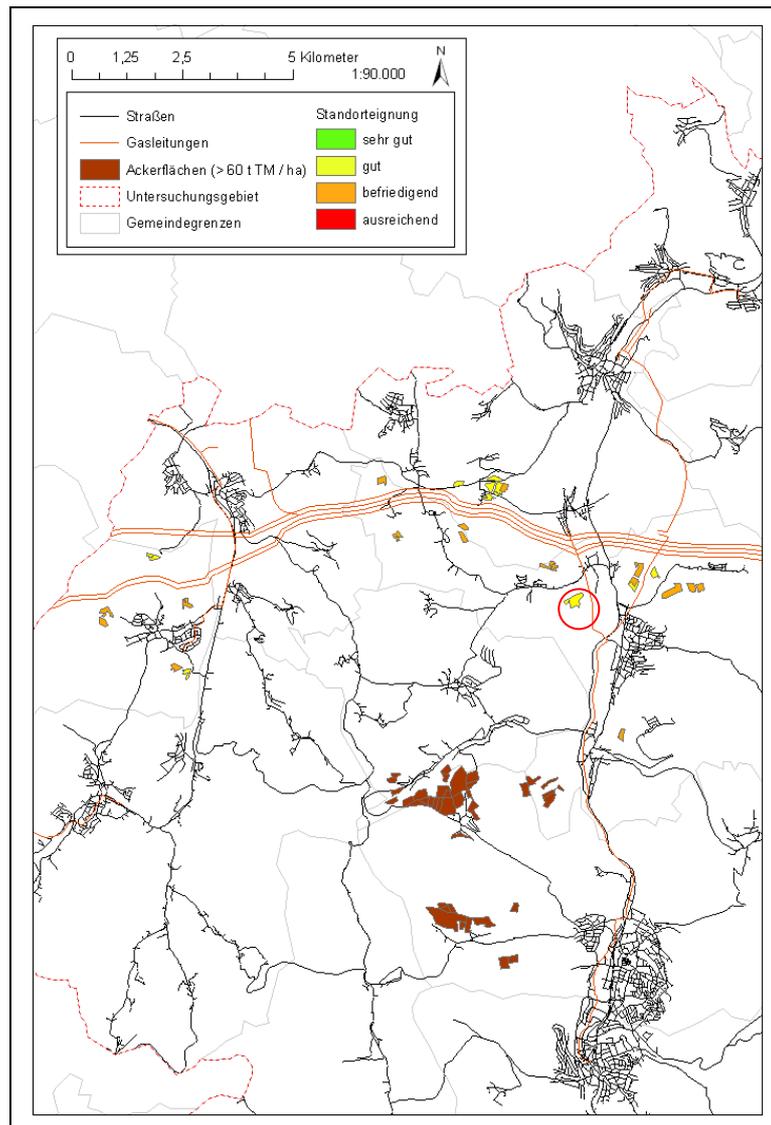
**Abbildung 34: Standorteignungskarte der Szenariovariation**



Quelle: Eigene Darstellung.

Nach dem Entfernen aller Flächen mit einer Größe von über 2,1 ha, verbleiben als Endergebnis 26 Flächen, die als Baugrundstücke für BGA, welche auf der Basis von Rindergülle und Silomais Biogas in das Gasnetz einspeisen, geeignet sind. Davon sind 10 Flächen mit „gut“ und 16 Flächen mit „befriedigend“ bewertet, wie anhand von Abbildung 35 zu erkennen ist.

Abbildung 35: Optimale Standorte der Szenariovariation

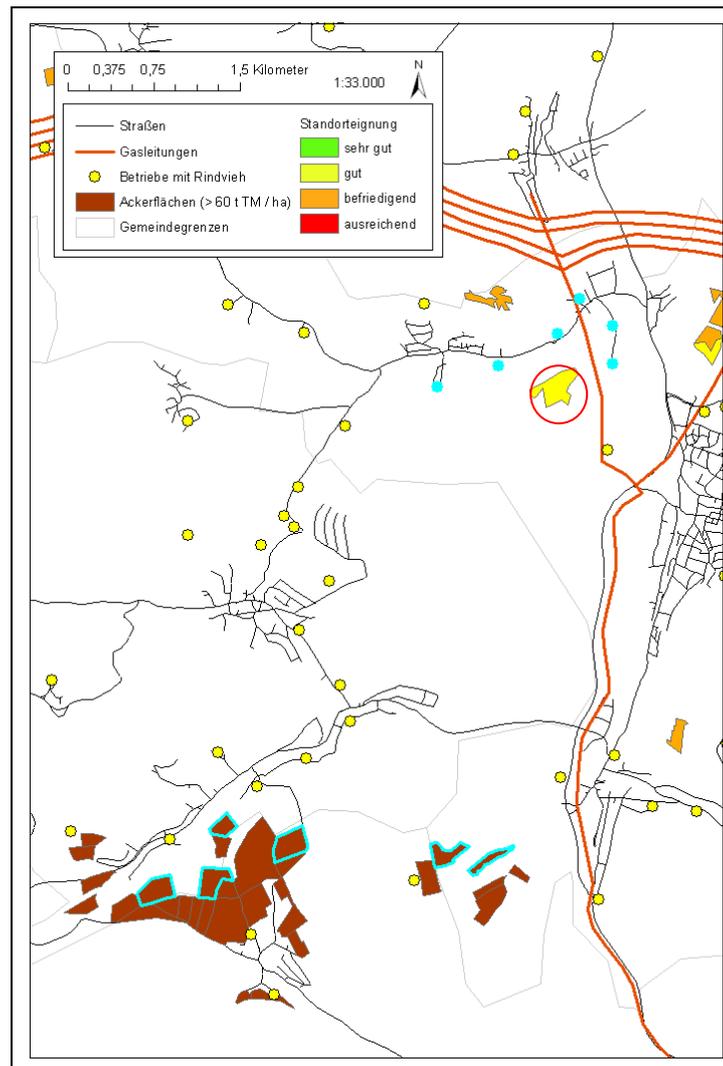


Quelle: eigene Darstellung.

Zur Ermittlung der benötigten Anbauflächen wird angenommen, dass auf dem in Abbildung 35 rot eingekreisten Areal eine BGA mit einer Leistung von 500 kW errichtet wird.

In der Nähe des Anlagenstandorts stehen 6 Ställe mit jeweils 43 Rindern als potentielle Güllelieferanten zur Verfügung. Daher könnten 6,5 % des Substratbedarfs der Anlage durch Gülle gedeckt werden (Anhang 5). Zur Deckung des restlichen Bedarfs der Anlage würden zusätzlich noch 10.631 t Silomais benötigt. Bei einem Ertrag von 60,1 t TM / ha entspricht das einer Anbaufläche in Höhe von 177 ha (Anhang 6). In Abbildung 37 sind die in Frage kommenden Ackerflächen und Rindviehbetriebe hellblau markiert. Der geplante Anlagenstandort ist durch einen roten Kreis markiert.

Abbildung 36: Bestimmung von Anbauflächen



Quelle: Eigene Darstellung.

### 5.3.4 Szenario „verschärfte Rahmenbedingungen konventionelle BGA“

Das Szenario „verschärfte Rahmenbedingungen“ soll für konventionelle BGA berechnet werden. Dazu bleiben Klassen, Gewichtungen und Entfernungen der selektiven Faktoren ebenso wie die Auswahl der restriktiven Faktoren unverändert. Es gelten jedoch für die Standortanalyse von konventionellen BGA, die Strom und Wärme produzieren, leicht veränderte Bedingungen hinsichtlich der Auswahl der selektiven Faktoren, da die Nähe zur Gasleitung in diesem Fall nicht relevant ist.

Anstelle der Gasleitung tritt als neues selektives Kriterium die Nähe zum Faktor „Wärmeabnehmer“, da der Betrieb einer BGA ohne Wärmeverwertung sowohl ökologisch als auch ökonomisch keinen Sinn macht (vgl. Kapitel 2.7).

Die entsprechenden Geodaten stammen aus dem ATKIS-Datensatz, welcher die bereits zur Bestimmung von Restriktionsflächen verwendete Objektartnr. 2114 enthält. Diese Objektart repräsentiert baulich geprägte Flächen mit besonderer Funktion wie z.B. Krankenhäuser, Schulen, Universitäten und Haftanstalten (ATKIS-OK: 2003). Zudem ist die Objektart 2132 „Gärtnerei“ als Wärmeabnehmer von Bedeutung. Es wird vorausgesetzt, dass die maximale Entfernung zu diesen Wärmeabnehmern 2.000 Meter betragen soll, da die Errichtung eines längeren Wärmenetzes nicht in Frage kommt. Die für die Berechnungen relevanten Bedingungen an die selektiven Faktoren sind in Tabelle 15 gelistet.

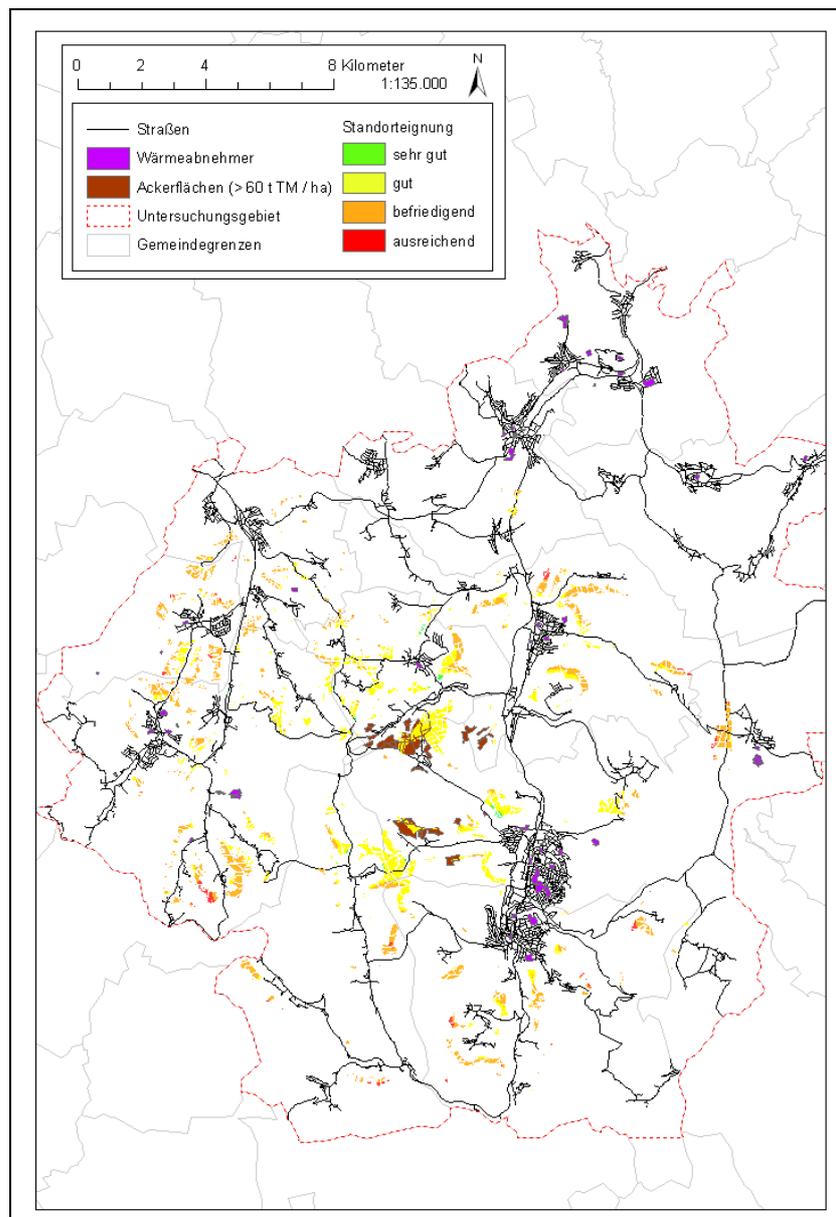
**Tabelle 15: Selektive Faktoren des Szenarios "verschärfte Rahmenbedingungen konventionelle BGA"**

<b>Selektive Faktoren</b>	<b>Klassengrenzen</b>	<b>Gewichtung</b>
Befestigte Straßen	I < 100 m > II < 200 m > III < 300 m > IV < 400 m > V < 500 m	2 (wichtig)
Transformatorstationen	I < 200 m > II < 400 m > III < 600 m > IV < 800 m > V < 1000m	1 (weniger wichtig)
Wärmeabnehmer	I < 400 m > II < 800 m > III < 1200 m > IV < 1600 m > V < 2000 m	2(wichtig)
Ackerland mit hohem Ertrag	I < 1500 m > II < 3000 m > III < 4500 m > IV < 6000 m > V < 7500 m	3 (sehr wichtig)
Betriebe mit Rindvieh	I < 200m > II < 400m > III < 600m > IV < 800 m > V < 1000 m	3 (sehr wichtig)
Landwirtschaftliche Flächen	I < 600 m > II < 1200 m > III < 1800 m > IV < 2400 m > V < 3000 m	2 (wichtig)
Umwegfaktor k=1,66 bei Ackerland, Betrieben mit Rindvieh und landwirtschaftlichen Flächen (vgl. BERENS u. KÖRLING 1983 u. BERG 2007a: 13)		

Quelle: eigene Darstellung. Maximalentfernungen und Gewichtungen teilweise nach MA et al. 2005: 597 u. BÖSS 2008.

Unter Beachtung dieser Kriterien ergibt sich das anhand von Abbildung 37 dargestellte Ergebnis.

**Abbildung 37: Standorteignungskarte des Szenarios „verschärfte Rahmenbedingungen konventionelle BGA“**



Quelle: Eigene Darstellung.

Im Vergleich zu der Standorteignungskarte von Biomethan-Anlagen (siehe Abbildung 34) ist zu erkennen, dass für konventionelle BGA wesentlich mehr Baugrundstücke in Frage kommen. Das Modell identifiziert 738 Flächen, die größer als 2,1 ha sind. 13 dieser Areale sind „sehr gut“ als Standort geeignet. Die große Anzahl ausgewiesener Flächen hängt mit der größeren räumlichen Verteilung der Wärmeabnehmer im Vergleich zu der relativen Konzentration der Erdgasleitung zusammen. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass zur Berechnung des Szenarios zwar die Standorte von potentiellen Wärmeabnehmern in das Berechnungsmodell integriert wurden, aber dies ist nicht gleichbedeutend damit, dass auch die gesamte produzierte Wärme abgenommen werden kann. Zur Bestimmung der verwertbaren Wärmemengen kann das Modell keine Aussage machen, da diese Größe

aus dem Datenbestand nicht hervorgeht. Daher ist eine Einzelfallprüfung vor Ort erforderlich.

### 5.3.5 Szenario „verbesserte Rahmenbedingungen konventionelle BGA“

Das dritte und letzte Szenario „erhöhte Einspeisevergütungen“ soll anhand von konventionellen BGA aufzeigen, wie veränderte Rahmenbedingungen in das Modell zu integrieren sind und wie sich diese auf die Ergebnisse auswirken.

Zur Berechnung des Szenarios „erhöhte Einspeisevergütungen“ wird angenommen, dass sich die Situation auf dem Biogasmarkt entspannt hat und die Förderung von Biogas von Seiten der Bundesregierung über ein novelliertes EEG mit erhöhten Einspeisevergütungen wieder zugenommen hat. Daher ist es aus betriebswirtschaftlicher Sicht möglich längere Leitungen zu verlegen, längere Zufahrtswege zu bauen und die Substrate über längere Distanzen zu transportieren. Im Vergleich zu den bisherigen Annahmen, hat sich die maximale Entfernung zu befestigten Straßen um 500 m, zu Umspannstationen um 1.000 m, zu Wärmeabnehmern um 2.000 m, zu Ackerflächen um 2.500 m, zu Rindviehbetrieben um 1.000 m und zu landwirtschaftlichen Flächen um 2.000 m erhöht. Diese Erhöhung hat auch eine Veränderung der Klassengrenzen zu Folge, wie anhand von Tabelle 16 deutlich wird.

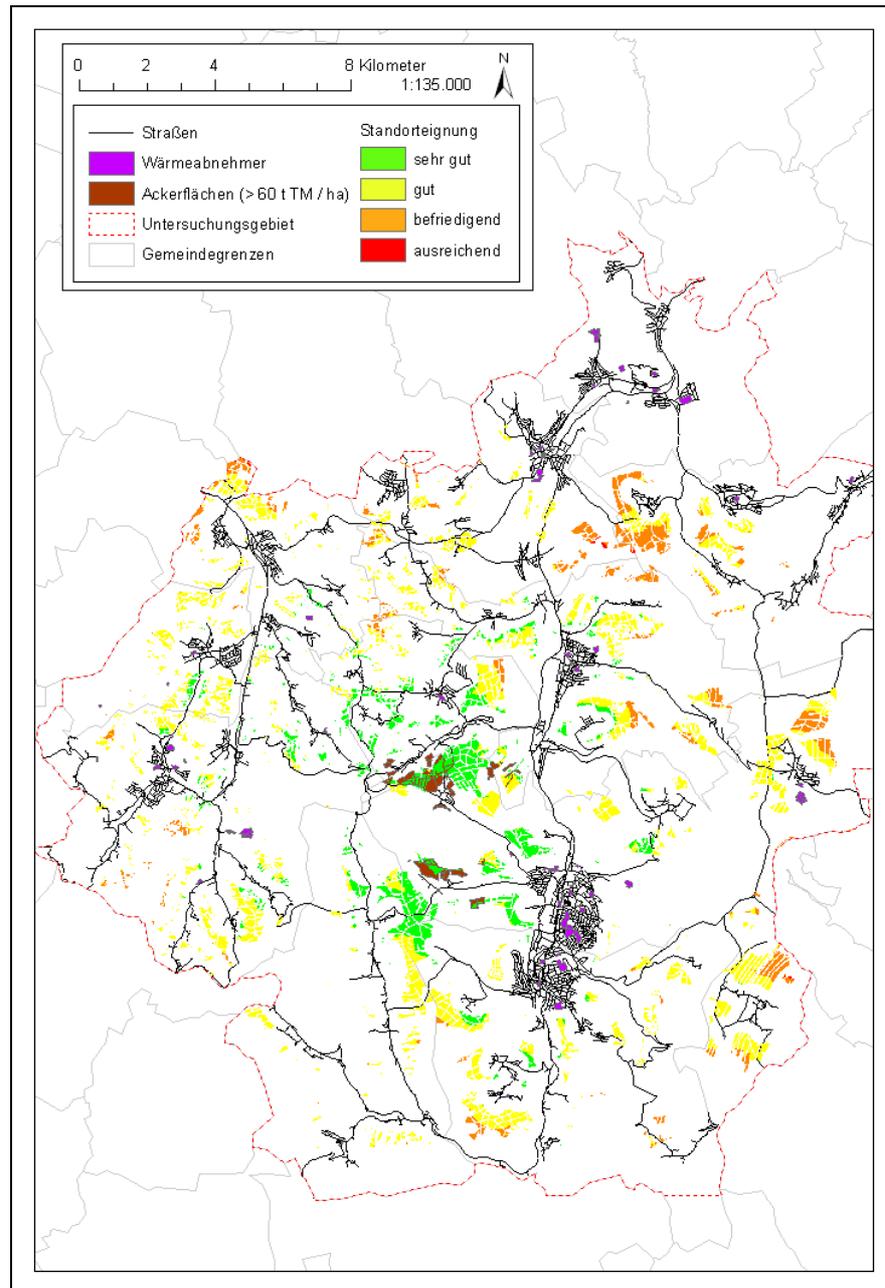
**Tabelle 16: Selektive Faktoren des Szenarios "verbesserte Rahmenbedingungen konventionelle BGA"**

Selektive Faktoren	Klassengrenzen	Gewichtung
Befestigte Straßen	I < 200 m > II < 400 m > III < 600 m > IV < 800 m > V < 1000 m	2 (wichtig)
Transformatorstationen	I < 400 m > II < 800 m > III < 1200 m > IV < 1600 m > V < 2000 m	1 (weniger wichtig)
Wärmeabnehmer	I < 800 m > II < 1600 m > III < 2400 m > IV < 3200 m > V < 4000 m	2(wichtig)
Ackerland mit hohem Ertrag	I < 2000 m > II < 4000 m > III < 6000 m > IV < 8000 m > V < 10000 m	3 (sehr wichtig)
Betriebe mit Rindvieh	I < 400 m > II < 800 m > III < 1200 m > IV < 1600 m > V < 2000 m	3 (sehr wichtig)
Landwirtschaftliche Flächen	I < 1000 m > II < 2000 m > III < 3000 m > IV < 4000 m > V < 5000 m	2 (wichtig)
Umwegfaktor k=1,66 bei Ackerland, Betrieben mit Rindvieh und landwirtschaftlichen Flächen (vgl. BERENS u. KÖRLING 1983 u. BERG 2007a: 13)		

Quelle: eigene Darstellung. Maximalentfernungen und Gewichtungen teilweise nach MA et al. 2005: 597 u. BÖSS 2008.

Als Ergebnis der Analyse ist anhand der Standorteignungskarte in Abbildung 38 zu erkennen, dass sich sowohl die Anzahl der geeigneten Flächen als auch die Anzahl von „sehr gut“ ausgewiesenen Flächen erhöht hat.

**Abbildung 38: Standorteignungskarte des Szenarios „verbesserte Rahmenbedingungen konventionelle BGA“**



Quelle: Eigene Darstellung.

Waren für das Szenario „verschärfte Rahmenbedingungen“ noch 738 Flächen ausgewiesen, wovon 13 mit „sehr gut“ bewertet wurden, so hat sich die Zahl der Flächen mit einer Mindestgröße von 2,1 ha im Szenario „verbesserte Rahmenbedingungen“ auf 1.485 erhöht! 336 dieser Areale sind „sehr gut“ zur Bebauung mit BGA geeignet. Es wird deutlich, dass das Bewertungsschema weiter verfeinert werden sollte, um unter den genannten Rahmenbedingungen zu einem differenzierteren Ergebnis zu gelangen. Dies könnte z.B. durch eine Erhöhung der Klassenanzahl erfolgen.

## 6 Bewertung

Die exemplarisch am Beispiel von Teilen des Odenwaldkreises durchgeführten Multikriterienanalysen haben gezeigt, dass die entwickelte Methodik zu brauchbaren Ergebnissen führt. Unter Zuhilfenahme von Szenarien ist die Möglichkeit veränderte Rahmenbedingungen und alternative Biogasproduktionsverfahren abzubilden in die Modellentwürfe implementiert worden. Dabei ist deutlich geworden, dass die Modelle nur geringfügig modifiziert werden müssen, um den neu definierten Anforderungen zu entsprechen.

Der Versuch einer objektiven Bewertung der vorgestellten Berechnungsergebnisse deutet darauf hin, dass die vorgestellte Standortbewertungsmethodik nicht in jeden Fall potentielle Standorte einwandfrei ausweist. Aufgrund der Beschränkung der verfügbaren Geodaten basieren die Standorteignungskarten auf vereinfachenden Annahmen. Es ist zu erwarten, dass das Vorhandensein von differenzierten Basisdaten über geeignete Gasleitungen, über Vorzüglichkeiten und Erträge der einzelnen Energiepflanzen sowie über exakte Standorte und Bestandszahlen von rinderhaltenden Betrieben aufgrund der hohen Gewichtungen dieser Faktoren bedeutende Auswirkungen auf die Ergebnisse haben wird.

Die Identifikation der optimalen Standorte im Untersuchungsgebiet entspricht aufgrund der Datenproblematik zwar nur näherungsweise den tatsächlichen bestmöglichen Biogasproduktionsorten, jedoch war es nicht das primäre Ziel der Arbeit für einen bestimmten Raumausschnitt Aussagen über die Standorteignung zu treffen. Vielmehr stand die Entwicklung einer Methodik zur Standortbestimmung im Vordergrund. Dieses Ziel ist insofern erreicht worden, als dass die Berechnungsergebnisse nach den methodischen Vorüberlegungen auf Anheb differenzierte Aussagen zur Standorteignung geliefert haben. Als zusätzlich erreichtes Ziel kann angesehen werden, dass veränderte Rahmenbedingungen und/oder alternative Produktionsverfahren durch eine einfach zu handhabende Modifikation der Berechnungsmodelle abgebildet werden können.

Die Erkenntnisse der vorliegenden Analysen liefern Aussagen über potentielle Standorte am Beispiel von verschiedenen Biogasanlagentypen und unter Berücksichtigung von agrar- und energiepolitischen Bedingungen sowie rechtlichen Vorgaben. Selbst wenn eine detaillierte Datengrundlage die realistische Identifikation von Anlagenstandorten ermöglichen sollte, muss darauf hingewiesen werden, dass die entwickelten Modelle lediglich entscheidungsunterstützende Wirkung haben. Es muss berücksichtigt werden, dass nicht alle Gegebenheiten modellierbar sind. So konnten z.B. Bürgerinitiativen und die lokale Politik bereits den Bau von BGA stoppen. Auch können Kooperationen zwischen Landwirten aufgrund von sozialen Konflikten scheitern oder von vornherein nicht möglich sein. Die vom Modell ausgewiesenen Standorte müssen aufgrund dieser Unsicherheiten in jedem

Fall vor Ort einer zusätzlichen Einzelfallprüfung unterliegen. Erst nach diesem „field check“ kann entschieden werden, ob sich ein vom Modell ausgewiesener Standort tatsächlich zur Errichtung einer BGA eignet.

Die Analyseergebnisse wirken jedoch nicht nur für Bauherren und Betreiber wie z.B. Energieversorgungsunternehmen oder Landwirte sondern auch für Regionalplaner entscheidungsunterstützend. Inwiefern die Regionalplanung einen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann und welche Rolle dabei die Ergebnisse dieser Arbeit spielen können, wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.

### **6.1 Regionalplanung und Klimaschutz**

Raumplanung kann einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Immerhin steht aus raumplanerischer Sicht die Sicherung und Entwicklung des Freiraums im Vordergrund, welcher u.a. Standort für die Energiegewinnung aus regenerativen Quellen, wie z.B. Windkraft und Biomasse ist (RITTER 2007: 531).

Die Erschließung regenerativer Energieträger ist neben der Energieeinsparung und Effizienzsteigerung eine wichtige klimaschutzrelevante Maßnahme. Die Produktionsstätten von Biogas sind im Vergleich mit anderen regenerativen Energiequellen, wie z.B. der Solarenergie, aufgrund zahlreicher Faktoren an bestimmte Standorte gebunden, wie die Ergebnisse der Multikriterienanalysen aufgezeigt haben. Aus Sicht der Raumplanung kommen laut §34 Baugesetzbuch ausgewiesene Gewerbe- und Industriegebiete als Standorte für BGA in Frage. Im Außenbereich kann eine BGA als privilegierte Anlage behandelt und genehmigt werden, wenn die Voraussetzungen nach § 35 Abs.1 Nr. 6 Baugesetzbuch vollständig gegeben sind. Hiernach muss ein räumlich-funktionaler Zusammenhang mit einem Landwirtschaftsbetrieb bestehen, die Biomasse muss überwiegend aus diesem oder aus nahe gelegenen Betrieben stammen, es darf je Betriebsstandort nur eine Anlage betrieben werden und die vorgegebene Leistungsgrenze von  $500 \text{ kW}_{el}$  darf nicht überschritten werden. Möglichkeiten zur Errichtung von BGA im Außenbereich sind durch die Änderung des Flächennutzungsplanes für das entsprechende Gebiet oder die Aufstellung eines vorhabenbezogenen Bebauungsplanes sowie die Realisierung der Anlage in einem für diesen Nutzungszweck festgesetzten Sondergebiet nach § 11 BauNVO gegeben. Diese sonstigen Sondergebiete kommen für Anlagen, die der Erforschung, Entwicklung oder Nutzung erneuerbarer Energien dienen in Betracht.

Die Ausweisung der entsprechenden Gebiete im Außenbereich ist von Vorteil, da somit eine optimale Lage der BGA z.B. zum Erdgasnetz sowie zu landwirtschaftlichen Anbauflächen gegeben ist. Außerdem ist davon auszugehen, dass im Außenbereich geringere Grundstückspreise vorzufinden sind und weniger Konfliktpotential von Seiten der benach-

barten Unternehmen zu erwarten ist (BERG 2007b: 48). Es ist daher nicht verwunderlich, dass alle durch die Modellberechnungen ausgewiesenen und mit „sehr gut“ bewerteten Flächen im Außenbereich liegen. Als wichtige Voraussetzung für eine Ausweisung im Außenbereich gilt in besonderem Maße die Unterstützung der kommunalen Verwaltung sowie der lokalen politischen Mehrheiten. Bei guter Planungsvorbereitung und Behördenbegleitung in der Genehmigungsphase sowie weiteren positiven Randbedingungen ist die Schaffung bauplanungsrechtlicher Voraussetzungen und die Erteilung der Baugenehmigung nach einem Dreivierteljahr möglich (ebd.: 48).

Die regionale und überregionale Raumordnungsplanung könnte die für die Biogaserzeugung genannten Eignungsgebiete festlegen, welche in der bauleitplanerischen Abwägung zu berücksichtigen und umzusetzen wären. Zugleich könnte die Inanspruchnahme dieser Gebiete durch entgegenstehende Nutzungen ausgeschlossen werden (RITTER 2007: 532). Die überörtliche Planung hat jedoch bislang auf die regional zum Teil überproportionale Zunahme von Biogasanlagen noch nicht mit entsprechenden Planungen reagiert, so dass hier noch ein fehlendes Problembewusstsein deutlich wird (PIELOW u. SCHIMANSKY 2007: 1).

Im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Multikriterienanalysen kann die Raumplanung jedoch aktiv werden, indem sie die vom Modell ausgewiesenen Flächen bereits bei der notwendigen Flächensicherung berücksichtigt und somit nicht nur die Fachplanungen in ihren Klimaschutzbestrebungen unterstützt, sondern auch dazu beiträgt die Dauer der Genehmigungsphase für BGA zu beschleunigen. Gleichzeitig könnte eine Fehlplanung wie z.B. die übermäßige Zulassung privilegierter Vorhaben und daraus evtl. resultierende Probleme mit dem Orts- und Landschaftsbild verhindert werden, eröffnet doch das BauGB in § 35 Abs. 3 Satz 3 die Möglichkeit, die Errichtung privilegierter Vorhaben durch den Regional- bzw. Flächennutzungsplan zu steuern, soweit hierfür durch Darstellung im Flächennutzungsplan oder durch Ziele der Raumordnung eine Ausweisung an anderer Stelle erfolgt ist.

Inwiefern ein Standortbestimmungsmodell in raumplanerische Aufgaben einfließen könnte, kann letztendlich nur die Planungsbehörde entscheiden. Im Sinne aller beteiligten Akteure und insbesondere im Sinne der Anlagenbetreiber bleibt zu hoffen, dass die Berücksichtigung zukünftiger Modellberechnungen Anwendung bei der Standortsuche und -ausweisung findet.

## **6.2 Ausblick**

Wie die Bewertung der Modellergebnisse und die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten in Raumplanung, Energiewirtschaft und Landwirtschaft andeuten, ist die dargestellte Me-

thode ein durchaus interessantes Werkzeug, das es noch weiter auszubauen gilt. In Zukunft soll die aufgezeigte Methodik weiter verfeinert werden, um nicht nur zur Bewertung von Standorten der Biogasproduktion, sondern auch zur Identifizierung von optimalen Standorten landwirtschaftlicher Veredelungsbetriebe eingesetzt zu werden.

Zunächst soll jedoch die Anwendung im Rahmen der Transferbereichs „Energiepflanzen, Wirtschaft und Umwelt“ im Arbeitsbereich T1 „Entscheidungsunterstützungssystem ProLand“ auf den Energiebereich beschränkt bleiben.

Dabei ist insbesondere die Flexibilität der Methode vorteilhaft. So ist zur Berechnung von Szenarien keine vollständige Umstrukturierung der Modelle nötig. Neben den bereits dargestellten sind weitere Szenarien vorstellbar, die nicht nur veränderte Rahmenbedingungen sondern auch zusätzliche Produktionsverfahren wie z.B. die Biogasproduktion auf Grundlage der Trockenfermentation abbilden. Zur Berechnung dieses „Trockenfermentationsszenarios“ müsste lediglich der Faktor „Betrieb mit Rindvieh“ aus dem Modell entfernt werden. Es bleibt allerdings zu hinterfragen, ob dieser Ansatz einer ausschließlich auf Pflanzen basierenden Vergärung unter Berücksichtigung der globalen Nahrungsmittelsituation sinnvoll ist oder ob es nicht von Vorteil ist ohnehin anfallende Reststoffe wie z.B. Gülle zu verwerten. Der zweitgenannte Fall könnte ebenfalls problemlos von den erstellten Modellen berücksichtigt werden, vorausgesetzt die entsprechenden Daten steht zur Verfügung. Es könnten bei der entsprechenden Datenlage ebenfalls alternative Substrate, wie z.B. Getreide, Grassilagen oder Abfallstoffe in die Modellberechnungen einfließen.

Zur genauen Bestimmung optimaler Standorte von BGA spielen unter anderem die Ackerflächen und Hektarerträge und in besonderem Maße auch konkurrierende Nutzungsalternativen eine wichtige Rolle. Daher werden in absehbarer Zeit Ergebnisse über die relative Vorzüglichkeit von Marktfrüchten aus dem Modell „ProLand“ in die vorgestellten BGA-Standortmodelle einfließen. Dies ermöglicht eine Aussage über die Lage von besonders für den Anbau von Energiepflanzen geeigneten Ackerstandorten, die in die Datengrundlage eingebunden und somit wesentliche Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse haben werden.

Zudem soll versucht werden zur Bestimmung der Substrateinzugsradien nicht die Luftlinienentfernung, sondern die tatsächliche Wegstreckenentfernung anzuwenden. Ferner ist vorstellbar, dass für bestimmte Faktoren, wie z.B. die Gasanschlussleitung von der BGA zur Erdgaspipeline Barrieren wie z.B. Gewässer berücksichtigt werden, um Baukosten möglichst gering zu halten. Inwiefern sich die beabsichtigten Optimierungsvorhaben realisieren lassen bleibt abzuwarten.

Als Fazit bleibt zu beachten, dass neben der Untersuchung von optimalen Produktionsstandorten auch weitere Aspekte der energetischen Biomassenutzung erforscht werden müssen, damit haltbare Aussagen über die Bewertung dieser Energieerzeugungsoption erfolgen können. So ist durchaus vorstellbar, dass eine großräumige Agrarproduktion der Reihenkultur Mais gleichbedeutend sein kann mit der Verarmung von Fruchtfolgen. Es können deshalb unerwünschte Wirkungen für den Naturhaushalt wie z.B. erhöhte Nährstoffausträge in Oberflächengewässer und in das Grundwasser, Schadstoffanreicherung in den Böden, erhöhte Erosionsgefährdung der Böden sowie ein Rückgang der Artenvielfalt die Folge sein. Die Ausweitung der Biogaserzeugung auf Grundlage des Basissubstrats Silomais sollte daher kritisch hinterfragt werden. Eine abschließende Bewertung ist allerdings nur im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit möglich.

Ferner muss berücksichtigt werden, dass nicht nur die optimalen Standorte von Biomasseanlagen einen Beitrag zum Klimaschutz leisten können, sondern dass es vielmehr auf einen ausgewogenen Energiemix aus alternativen Energiequellen, auf die Steigerung der Energieeffizienz sowie auf die Verwirklichung von Einsparpotentialen ankommt.

Es bleibt zu hoffen, dass die Erkenntnisse der vorliegenden Diplomarbeit und folgender wissenschaftlicher Arbeiten einen gewissen Anteil dazu beitragen können, damit das Ziel der Bundesregierung im Jahr 2050, die Hälfte des Energieverbrauchs durch erneuerbare Energien abzudecken, tatsächlich erreicht werden kann.

## 7 Literaturverzeichnis

- BAHRENBERG, G. u. GIESE, E.** (1975): Statistische Methoden und ihre Anwendung in der Geographie. Stuttgart.
- BATHELT, H. und GLÜCKLER, J.** (2003)<sup>2</sup>: Wirtschaftsgeographie. Stuttgart.
- BECKMANN, G.** (2006): Regionale Potenziale ausgewählter biogener Reststoffe. In: Informationen zur Raumentwicklung. Heft 1/2.2006. Bioenergie: Zukunft für ländliche Räume. Bonn. S.23 - 33.
- BERENS, W. u. KÖRLING, F.-J.** (1982): Das Schätzen von realen Entfernungen bei der Warenverteilungsplanung mit gebietspaarspezifischen Umwegfaktoren. In: OR Spektrum 1983, S. 67 - 75.
- BERG, H.** (2007b): Regionale Standortfaktoren und die Wirtschaftlichkeit der Einspeisung von Biomethan in das Erdgasnetz. In: DVGW Jahresrevue energie wasser-praxis 12/2007. Bonn. S. 46 - 49.
- BÖSS, G.** (2008): Interview zum Thema: Biogasanlagen im südhessischen Versorgungsgebiet der HSE. Geführt am 09.01.2008. Darmstadt.
- BREUER, T. u. HOLM-MÜLLER, K.** (2006): Entwicklungschancen für den ländlichen Raum: Standortfaktoren der Produktion biogener Kraftstoffe in Deutschland. In: Informationen zur Raumentwicklung. Heft 1/2, Jg. 2006: Bioenergie: Zukunft für ländliche Räume. Bonn. S. 55 - 65.
- BRÜCHER, W.** (1997): Mehr Energie! Plädoyer für ein vernachlässigtes Objekt der Geographie. In: Geographische Rundschau, Band 49, Heft 6, S. 330-335.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMLEV)** (2007): Förderung der ländlichen Entwicklung in Deutschland. Förderrahmen, Maßnahmen, Zuständigkeiten. Bonn.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU).** REFERAT ÖFFENTLICHKEITSARBEIT (Hrsg.) (2005): Erneuerbare Energien. Einstieg in die Zukunft. Berlin.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU).** REFERAT ÖFFENTLICHKEITSARBEIT (Hrsg.) (2007a): Erneuerbare Energien in Zahlen - nationale und internationale Entwicklungen. Berlin.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMVEL)** (2005): Meilensteine der Agrarpolitik. Umsetzung der europäischen Agrarreform in Deutschland. Berlin.

**BUNDESVERBAND DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN BERUFGENOSSENSCHAFTEN (BLB)** (Hrsg.) (2002): Arbeitsunterlage 69. Sicherheitsregeln für landwirtschaftliche Biogasanlagen. Kassel.

**CHRISTIANSEN, T.** und **ERB, W.-D.** (2001): GIS. In: Lexikon der Geographie auf CD-Rom. Heidelberg, Berlin.

**DE BY, R. A.** et al. (2004)<sup>3</sup>: Principles of Geographic Information Systems. An introductory textbook. Enschede.

**DE LANGE, N.** (2002): Geoinformatik in Theorie und Praxis. Berlin.

**DICKEN, P.** u. **LLOYD, P.** (1999): Standort und Raum. Theoretische Perspektiven in der Wirtschaftsgeographie. Stuttgart.

**EDELMANN, W.** (2001): Biogaserzeugung und -nutzung. In KALTSCHMITT, M. und HARTMANN, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin. S. 641 - 694.

**EDER, B.** u. **SCHULZ, H.** (2006)<sup>3</sup>: Biogas-Praxis. Staufen bei Freiburg.

**FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) e.V.** (2005): Ergebnisse des Biogas-Messprogramms. Gülzow.

**FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) e.V.** (2006): Marktanalyse nachwachsende Rohstoffe. Gülzow.

**FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) e.V.** (2007a)<sup>4</sup>: Biogas - eine Einführung. Gülzow.

**FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) e.V.** (2007b)<sup>3</sup>: Studie: Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz. Gülzow.

**FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) e.V.** (2007c): Daten und Fakten zu nachwachsenden Rohstoffen. Gülzow.

**FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) e.V.** (2008): Biokraftstoffe. Basisdaten Deutschland. Gülzow.

**FACHVERBAND BIOGAS E.V.** (2006): Biogas - das Multitalent für die Energiewende. Freising.

**HENKE, J. M.** (2005): Biokraftstoffe - eine weltwirtschaftliche Perspektive. Kiel.

**HESSISCHES STATISTISCHES LANDESAMT** (2007a): Hessische Kreiszahlen. Bd. 1, Jg. 52. Wiesbaden.

**HESSISCHES STATISTISCHES LANDESAMT** (2007b): Hessische Kreiszahlen. Bd. 2, Jg. 52. Wiesbaden.

**HESSISCHES STATISTISCHES LANDESAMT** (2007c): Hessische Gemeindestatistik. 28. Ausgabe. Wiesbaden.

**INSTITUT FÜR ENERGETIK UND UMWELT (IE) GGMBH** (2007): Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. Leipzig.

**JACOBS, H.-H.** (2001): Vergärung von Energiepflanzen. In: VDI-Berichte 1620. Biogas als regenerative Energie - Stand und Perspektiven. Düsseldorf. S. 63 - 71.

**KEYMER, U. u. REINHOLD, G.** (2006)<sup>3</sup>: Grundsätze bei der Projektplanung. In: **FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) e.V** (Hrsg.): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Gülzow. S. 182 - 209.

**KLINKSI, S.** (2005): Überblick über die Zulassung von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien. Berlin.

**KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (KTBL)** (2006): Betriebsplanung Landwirtschaft 2006/07. Darmstadt.

**LUSK, P.** (1998): Methane Recovery from Animal Manures. The Current Opportunities Casebook. Washington.

**MA, J., SCOTT, N. R., DEGLORIA, S.D. u. LEMBO, A. J.** (2005): Siting analysis of farm-based centralized anaerobic digester systems for distributed generation using GIS. In: Biomass and Bioenergy 28, S. 591 - 600.

**MATTHIAS, J., JÄGER, S., KLAGES, S., und NIEBAUM, A.** (2006)<sup>3</sup>: Rechtliche und administrative Rahmenbedingungen. In: **FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) e.V** (Hrsg.): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Gülzow. S. 137 - 152.

**NEUMANN, H.** (2007): Jede zweite Biogasanlage hat Defizite! In: topagrar 10/2007. S. 103 - 105.

**NOTTINGER, A.** (2007): Technische und wirtschaftliche Anforderungen an die Bioerdgasproduktion zur Einspeisung ins HD-Netz. Fachtagung Bioenergie. Agritechnica 2007. Hannover.

**RITTER, E.-H.** (2007): Klimawandel - eine Herausforderung an die Raumplanung. In: **RAUMFORSCHUNG UND RAUMORDNUNG**. Heft 6. 65. Jg. Hannover. S. 531 - 538.

**SAURER, H. u. BEHR, F.-J.** (1997): Geographische Informationssysteme. Eine Einführung. Darmstadt.

**SCHATTAUER, A. u. WEILAND, P.** (2006)<sup>3</sup>: Grundlagen der anaeroben Fermentation. In: **FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) e.V** (Hrsg.): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Gülzow. S. 25 - 35.

**SCHOLWIN, F., WEIDEL, T. u. GATTERMANN, W.**(2006)<sup>3</sup>: Gasaufbereitung und Verwertungsmöglichkeiten. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) e.V (Hrsg.): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Gülzow. S. 97 - 116.

**SCHOLWIN, F., WEIDEL, T., GATTERMANN, H., SCHATTAUER, A. u. WEILAND, P.** (2006)<sup>3</sup>: Anlagentechnik zur Biogasbereitstellung. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) e.V (Hrsg.): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Gülzow. S. 36 - 85.

**SCHULTE-SCHULZE-BERNDT, A.** (2001): Innovative Biogasnutzungskonzepte - Einsatz von Biogas als Kraftstoff oder Erdgassubstitut. In: VDI-Berichte 1620. Biogas als regenerative Energie - Stand und Perspektiven. Düsseldorf. S. 181 - 207.

**STEIN, C.** (2005): Finanzielle Rahmenbedingungen für die energetische Biomassenutzung. In: Informationen zur Raumentwicklung, Heft 1/2, Jg. 2006: Bioenergie: Zukunft für ländliche Räume. Bonn. S. 7 - 13.

**TOEWS, T.** (2007): Transportkosten von Silomais. Bremsen die Transportkosten große Biogas-Anlagen aus? In: Lohnunternehmen, Bd. 9, Jg. 62. Lehrte. S.34 - 37.

**WEBER, A.** (1922)<sup>2</sup>: Ueber den Standort der Industrien. Erster Teil. Reine Theorie des Standorts. Tübingen.

**WUPPERTAL INSTITUT FÜR KLIMA, UMWELT, ENERGIE** (2006): Endbericht. Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Band 1. Wuppertal.

## 7.1 Internetquellen

### **ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHEN**

**ENERGIEVERBRAUCH e.V. (ASUE)** (2008): Erneuerbare Energien aus dem Erdgasnetz. Abgerufen am 04.03.2008. URL: [http://www.asue.de/images/images\\_neu/grafik\\_509\\_f.jpg](http://www.asue.de/images/images_neu/grafik_509_f.jpg)

**ATKIS-OBJEKTARTENKATALOG (ATKIS - OK)** (2003): ATKIS - Objektartenkatalog Basis-DLM.

Version 3.2. Abgerufen am 13.04.2008. URL:

[http://www.atkis.de/dstinfo/dstinfo.dst\\_start?dst\\_oar=4101&inf\\_sprache=deu&c1=1&dst\\_typ=25&dst\\_ver=dst&dst\\_land=HE](http://www.atkis.de/dstinfo/dstinfo.dst_start?dst_oar=4101&inf_sprache=deu&c1=1&dst_typ=25&dst_ver=dst&dst_land=HE)

**BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL)** (2004a): Biogasausbeuten

verschiedener Substrate. Gülle/Mist. Abgerufen am 27.04.2008. URL:

[http://www.lfl.bayern.de/ilb/technik/10225/?sel\\_list=51%2C1&strsearch=&pos=left](http://www.lfl.bayern.de/ilb/technik/10225/?sel_list=51%2C1&strsearch=&pos=left)

**BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL)** (2004b): Biogasausbeuten

verschiedener Substrate. Maissilagen/CCM. Abgerufen am 27.04.2008. URL:

[http://www.lfl.bayern.de/ilb/technik/10225/?sel\\_list=12%2Cb&strsearch=&pos=left](http://www.lfl.bayern.de/ilb/technik/10225/?sel_list=12%2Cb&strsearch=&pos=left)

**BENSMANN, M.** (2007a): So klappt's auch mit dem Nachbarn. In: neue energie. das magazin für erneubare energien. 08/07. Osnabrück. Abgerufen am 07.03.2008. URL:

<http://www.neueenergie.net/index.php?id=1511>

**BENSMANN, M.** (2007b): Bio aus der Leitung. In: neue energie. das magazin für erneubare energien. 03/07. Osnabrück. Abgerufen am 09.03.2008. URL:

<http://www.neueenergie.net/index.php?id=1395>

**BERG, H.** (2007a): Regionale Standortfaktoren und die Wirtschaftlichkeit der Einspeisung von Biomethan in das Erdgasnetz. Abgerufen am 24.04.2008. URL:

[http://www.bueroberg.de/pdf/Vortrag\\_Standortfaktoren.pdf](http://www.bueroberg.de/pdf/Vortrag_Standortfaktoren.pdf)

**BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG** (2007a): Karte Anzahl Biogasanlagen 2004. Abgerufen am 15.12.2007. URL:

[http://www.bbr.bund.de/cIn\\_007/nn\\_116208/DE/ForschenBeraten/Fachpolitiken/EnergieUmwelt/Re-](http://www.bbr.bund.de/cIn_007/nn_116208/DE/ForschenBeraten/Fachpolitiken/EnergieUmwelt/RegenerativeEner-)

[generativeEnergie/EnergetischeBiomassenutzung/Bilder/Karte\\_20Anzahl\\_20Biogasanlagen2004,templateId=raw,property=publicationFile.jpg/Karte%20Anzahl%20Biogasanlagen2004.jpg](http://www.bbr.bund.de/cIn_007/nn_116208/DE/ForschenBeraten/Fachpolitiken/EnergieUmwelt/RegenerativeEnergie/EnergetischeBiomassenutzung/Bilder/Karte_20Anzahl_20Biogasanlagen2004,templateId=raw,property=publicationFile.jpg/Karte%20Anzahl%20Biogasanlagen2004.jpg)

**BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU)**

(2007b): Entwurf eines Gesetzes zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften. Abgerufen am:

11.12.2007. URL: <http://www.erneuerbare->

[energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/entwurf\\_ee\\_recht.pdf](http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/entwurf_ee_recht.pdf)

**BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU)**

(2007c): Das Integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung. Abgerufen am 16.12.2007. URL: [http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/hintergrund\\_meseberg.pdf](http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/hintergrund_meseberg.pdf)

**FACHVERBAND BIOGAS E.V.** (2007a): Biogasnutzung in Deutschland – Entwicklung von 1992 - 2007. Abgerufen am 25.11.2007. URL: <http://www.biogas.org/datenbank/file/notmember/medien/BGA%20Entwick%2092-07.pdf>

**FACHVERBAND BIOGAS E.V.** (2007b): Stellungnahme des Fachverbandes Biogas e.V. zum Referentenentwurf EEG vom 09.10.2007. Abgerufen am 05.12.2007. URL: [http://www.biogas.org/datenbank/file/notmember/fach/07-11-14\\_Stellungnahme-EEG-FvB\\_endg.pdf](http://www.biogas.org/datenbank/file/notmember/fach/07-11-14_Stellungnahme-EEG-FvB_endg.pdf)

**LANDWIRTSCHAFTLICHE RENTENBANK** (2008): Sonderkreditprogramm Umweltschutz und Nachhaltigkeit. Frankfurt. Abgerufen am 17.03.2008. URL: [http://www.rentenbank.de/d/Download/Programme/Programminfo\\_UmweltschutzUndNachhaltigkeit.pdf](http://www.rentenbank.de/d/Download/Programme/Programminfo_UmweltschutzUndNachhaltigkeit.pdf)

**PIELOW, J.-C. u. SCHIMANSKY, C.** (2007): Rechtsprobleme der Erzeugung von Biogas und der Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse aus dem Workshop Rechtsfragen der Einspeisung von Biogas in die Gasnetze. Oberhausen. Abgerufen am 27.04.2008. URL: [http://www.umsicht.fhg.de/veranstaltungen/downloads/070620\\_juri\\_biogasei\\_6.pdf](http://www.umsicht.fhg.de/veranstaltungen/downloads/070620_juri_biogasei_6.pdf)

**RENTZING, S.** (2006): Solare Gewinnmaschine. In: neue energie. das magazin für erneuerbare energien. 09/06. Osnabrück. Abgerufen am 07.03.2008. URL: <http://www.neueenergie.net/index.php?id=1202>

**SEEBACH, A.** (2006): Konzeption und Projektentwicklung von Biomethananlagen. Abgerufen am 24.04.2008. URL: [http://www.asue.de/images/veroeff\\_pdf/dr\\_seebach\\_mai\\_2006.pdf](http://www.asue.de/images/veroeff_pdf/dr_seebach_mai_2006.pdf)

**WEILAND, P.** (2006): Biogas - ein universeller Energieträger zur Erzeugung von Strom, Wärme und Kraftstoff. In: aid-Forum Landwirtschaft. Kraftwerk Feld und Wald - Bioenergie für Deutschland. Bonn. Abgerufen am 03.03.2008. URL: [http://www.aid.de/downloads/lw\\_forum\\_aid\\_2006\\_abstract\\_weiland.pdf](http://www.aid.de/downloads/lw_forum_aid_2006_abstract_weiland.pdf)

## 7.2 Rechtsquellen

**BAUGESETZBUCH** (BauGB) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17.08.1997 (BGBl. I S.2141), zuletzt geändert durch Gesetz vom 15.12.1997 (BGBl. I S.2903).

**BUNDESFERNSTRASSENGESETZ** (FStrG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. Juni 2007 (BGBl. I S. 1206).

**GESETZ ZUM SCHUTZ VOR SCHÄDLICHEN UMWELTEINWIRKUNGEN DURCH LUFTVERUNREINIGUNGEN, GERÄUSCHE, ERSCHÜTTERUNGEN UND ÄHNLICHE VORGÄNGE** (BlmschG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14.05.1990 (BGBl. I S. 880), zuletzt geändert durch Gesetz vom 19.10.1998 (BGBl. I S. 3178).

**GESETZ ZUR NEUREGELUNG DES RECHTS DER ERNEUERBAREN ENERGIEN IM STROMBEREICH** (EEG): Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2004 (BGBl. I S. 1918), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. November 2006 (BGBl. I S. 2550).

**TECHNISCHE ANLEITUNG ZUR REINHALTUNG DER LUFT** (TA Luft): in der Neufassung vom 24.07.2002 (GMBL., Nr. 25 - 29, S. 511 - 605).

**VERORDNUNG (EG) NR. 1107/2007** des Rates zur Abweichung von der Verordnung (EG) Nr. 1782/2003 (Abl. L 253/1 f. vom 28.09.2007).

**VERORDNUNG ÜBER DAS INVERKEHRBRINGEN VON DÜNGEMITTELN, BODENHILFSSTOFFEN, KULTURSUBSTRATEN UND PFLANZENHILFSMITTELN** (DüMV): Düngemittelverordnung vom 26. November 2003 (BGBl. I S. 2373), zuletzt geändert durch Artikel 3 der Verordnung vom 22. Oktober 2007 (BGBl. I S. 2494).

**VERORDNUNG ÜBER DIE ANWENDUNG VON DÜNGEMITTELN, BODENHILFSSTOFFEN, KULTURSUBSTRATEN UND PFLANZENHILFSMITTELN NACH DEN GRUNDSÄTZEN DER GUTEN FACHLICHEN PRAXIS BEIM DÜNGEN** (DüngeV): Düngeverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221).

**VERORDNUNG ÜBER DIE BAULICHE NUTZUNG DER GRUNDSTÜCKE** (BauNVO): Baunutzungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. Januar 1990 (BGBl. I S. 132), geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 22. April 1993 (BGBl. I S. 466).

**VERORDNUNG ÜBER DIE ERZEUGUNG VON STROM AUS BIOMASSE** (BiomasseV): Biomasseverordnung vom 21. Juni 2001 (BGBl. I S. 1234), geändert durch die Verordnung vom 9. August 2005 (BGBl. I S. 2419).

**VERORDNUNG ÜBER DIE VERWERTUNG VON BIOABFÄLLEN AUF LANDWIRTSCHAFTLICH, FORSTWIRTSCHAFTLICH UND GÄRTNERISCH GENUTZTEN BÖDEN (BioAbfV):**

Bioabfallverordnung vom 21. September 1998 (BGBl. I S. 2955), zuletzt geändert durch Artikel 5 der Verordnung vom 20. Oktober 2006 (BGBl. I S. 2298).

**VERORDNUNG ÜBER GENEHMIGUNGSBEDÜRFTIGE ANLAGEN (4. BImSchV):** Verordnung

über genehmigungsbedürftige Anlagen in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. März 1997 (BGBl. I S. 504), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 23. Oktober 2007 (BGBl. I S. 2470).

**VERORDNUNG ZUR FESTSETZUNG EINES WASSERSCHUTZGEBIETES ZUM SCHUTZ DER TRINKWASSERGEWINNUNGSANLAGE DER „MISCHBORNQUELLE“ DES**

**ZWECKVERBANDES GRUPPENWASSERWERK DIEBURG (VO WSG „Mischbornquelle“)** in der Fassung der Bekanntmachung vom 20.04.2007 (StAnz. Nr. 24/2007. S. 1195 ff.).

## Anhang

**Anhang 1:** Schematischer Ablauf der Berechnungen von restriktiven Flächen mit dem ESRI ModelBuilder 9.2.

**Anhang 2:** Schematischer Ablauf der Berechnungen zur Bestimmung von selektiven Flächen mit dem ESRI ModelBuilder 9.2 am Beispiel von BGA zur Biomethaneinspeisung.

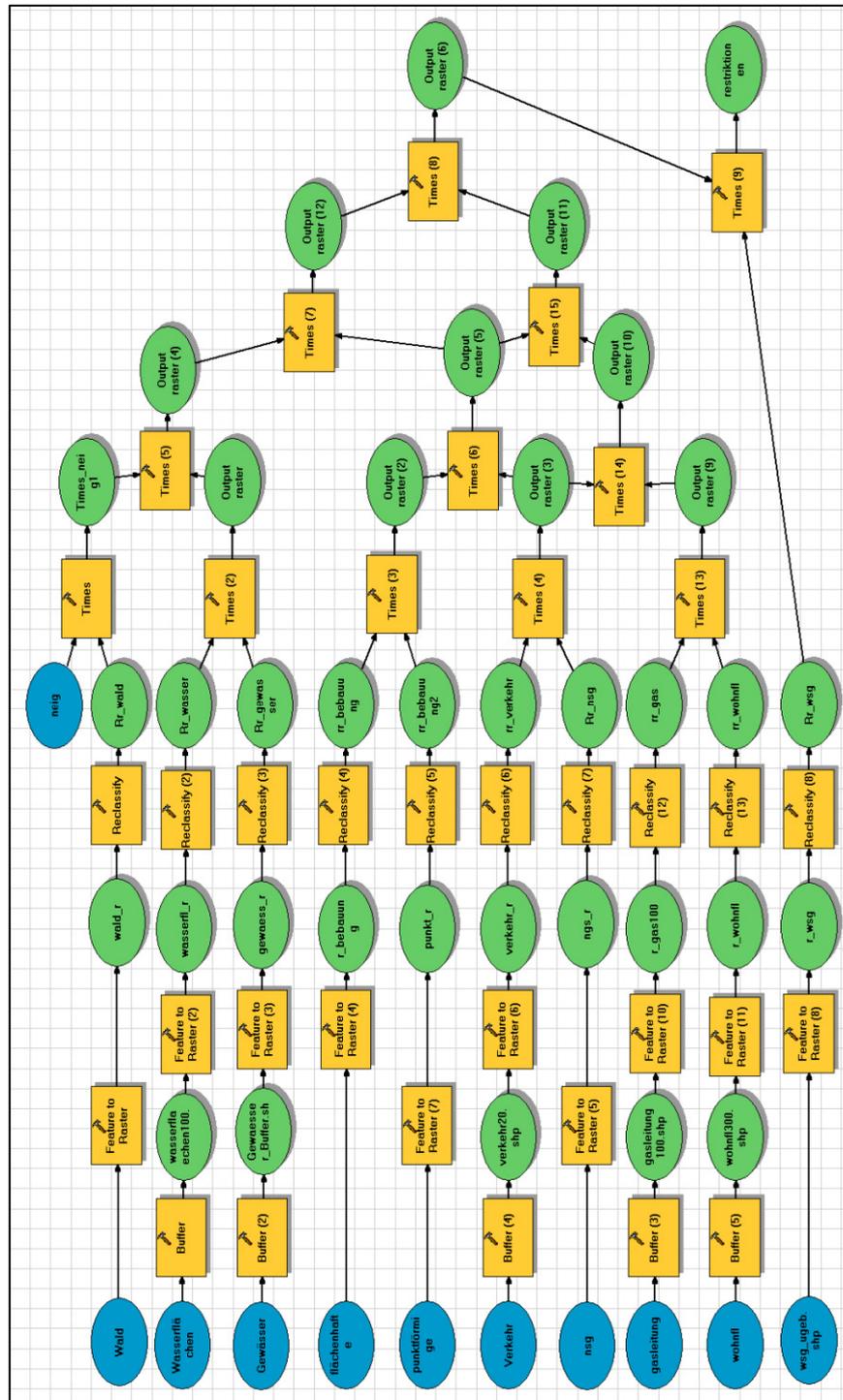
**Anhang 3:** Tabelle zur Berechnung von Gülleanteilen für das Szenario „verschärfte Rahmenbedingungen Bioerdgas“

**Anhang 4:** Tabelle zur Berechnung von Silomaisflächen für das Szenario „verschärfte Rahmenbedingungen Bioerdgas“

**Anhang 5:** Tabelle zur Berechnung von Gülleanteilen für die Szenariovariation „verschärfte Rahmenbedingungen Bioerdgas“

**Anhang 6:** Tabelle zur Berechnung von Silomaisflächen für die Szenariovariation „verschärfte Rahmenbedingungen Bioerdgas“

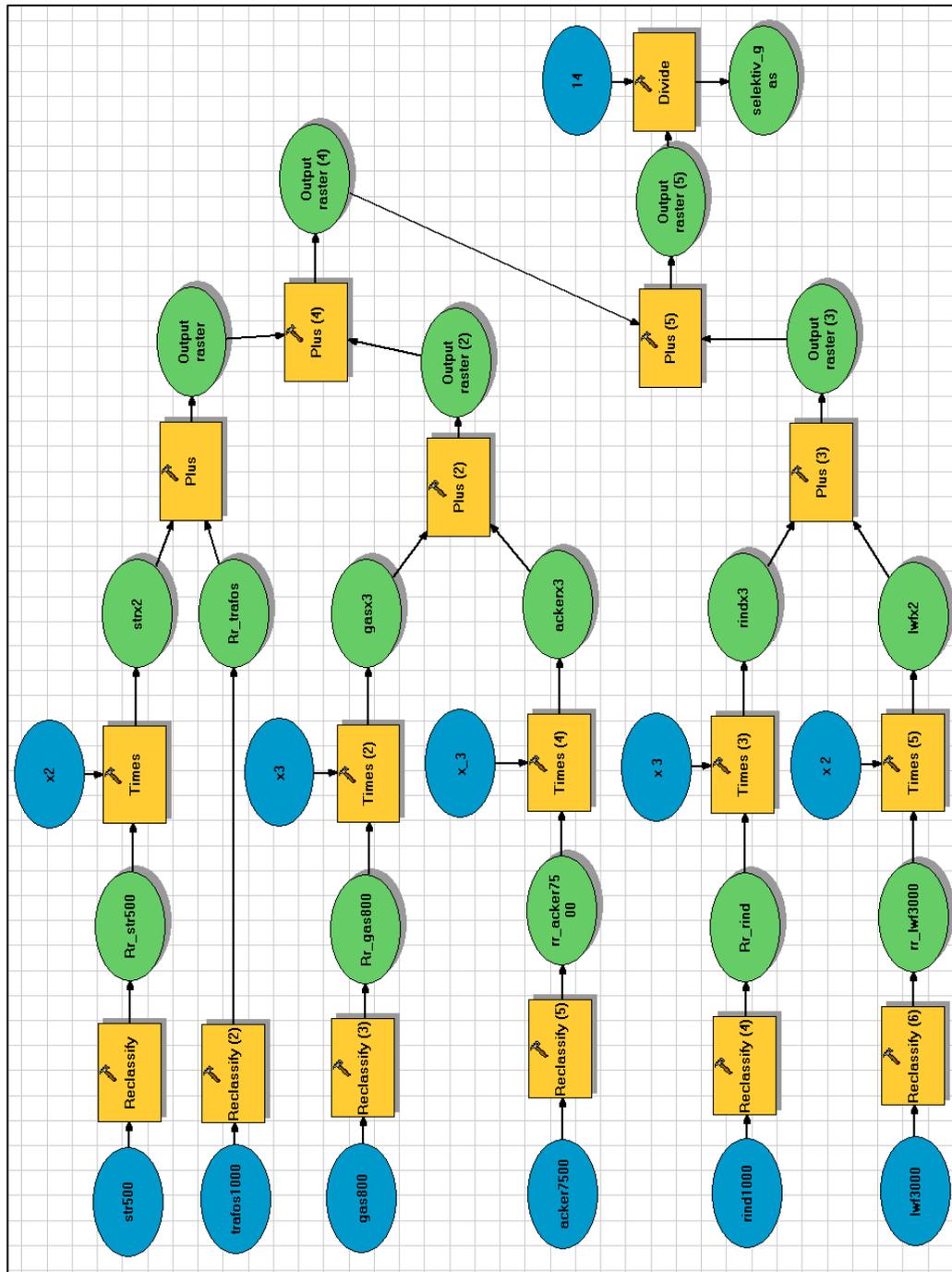
**Anhang 1:** Schematischer Ablauf der Berechnungen von restriktiven Flächen mit dem ESRI ModelBuilder 9.2.



Quelle: eigene Darstellung aus ESRI ModelBuilder 9.2.

Anmerkung: Eingangsdaten sind als blaue Kreise, Ergebnisse als grüne Kreise und Operationen als gelbe Rechtecke dargestellt.

**Anhang 2:** Schematischer Ablauf der Berechnungen zur Bestimmung von selektiven Flächen mit dem ESRI ModelBuilder 9.2 am Beispiel des Szenarios „verschärfte Rahmenbedingungen“ von biomethanproduzierenden BGA.



Quelle: eigene Darstellung aus ESRI ModelBuilder 9.2.

Anmerkung: Eingangsdaten und Gewichtungsfaktoren sind als blaue Kreise, Ergebnisse als grüne Kreise und Operationen als gelbe Rechtecke dargestellt.

**Anhang 3:** Tabelle zur Berechnung von Gülleanteilen für das Szenario „verschärfte Rahmenbedingungen Bioerdgas“

	Wert	Einheit
Verfügbare Rinder	73	
Gülleertrag pro Rind und Jahr	25	t
Gülleanteil am Gesamtinput der BGA	1,8	%
Güllebedarf pro Jahr	1.825	t
Gasertrag pro t FM	20	Nm <sup>3</sup>
Energie pro t Substrat	110	kWh
Wirkungsgrad	40	%
Betriebsstunden pro Jahr	8750	h
Stromproduktion	4.375.000	kWh
Notwendige Energiezufuhr	10.937.500	KW
Leistung BGA	500	kW

Quelle: eigene Darstellung.

Anmerkung: Gülleertrag aus KTBL 2006: 412, Gasertrag aus LFL 2004a.

**Anhang 4:** Tabelle zur Berechnung von Silomaisflächen für das Szenario „verschärfte Rahmenbedingungen Bioerdgas“

	Wert	Einheit
Benötigte Anbaufläche	221	ha
Ertrag pro ha und Jahr	50,5	t FM
Silomaisanteil am Gesamtinput der BGA	98,2	%
Silomaisbedarf pro Jahr	11.165	t FM
Gasertrag pro t FM	185	Nm <sup>3</sup>
Energie pro t Substrat	962	kWh
Wirkungsgrad	40	%
Betriebsstunden pro Jahr	8750	h
Stromproduktion	4.375.000	kWh
Notwendige Energiezufuhr	10.937.500	KW
Leistung BGA	500	kW

Quelle: eigene Darstellung.

Anmerkung: Silomaisertrag aus „ProLand“, Gasertrag aus LFL 2004b.

**Anhang 5:** Tabelle zur Berechnung von Gülleanteilen für die Szenariovariation „verschärfte Rahmenbedingungen Bioerdgas“

	Wert	Einheit
Verfügbare Rinder	259	
Gülleertrag pro Rind und Jahr	25	t
Gülleanteil am Gesamtinput der BGA	6,5	%
Güllebedarf pro Jahr	6.450	t
Gasertrag pro t FM	20	Nm <sup>3</sup>
Energie pro t Substrat	110	kWh
Wirkungsgrad	40	%
Betriebsstunden pro Jahr	8750	h
Stromproduktion	4.375.000	kWh
Notwendige Energiezufuhr	10.937.500	KW
Leistung BGA	500	kW

Quelle: eigene Darstellung.

Anmerkung: Gülleertrag aus KTBL 2006: 412, Gasertrag aus LFL 2004a.

**Anhang 6:** Tabelle zur Berechnung von Silomaisflächen für die Szenariovariation „verschärfte Rahmenbedingungen Bioerdgas“

	Wert	Einheit
Benötigte Anbaufläche	177	ha
Ertrag pro ha und Jahr	60,1	t FM
Silomaisanteil am Gesamtinput der BGA	93,5	%
Silomaisbedarf pro Jahr	10.631	t FM
Gasertrag pro t FM	185	Nm <sup>3</sup>
Energie pro t Substrat	962	kWh
Wirkungsgrad	40	%
Betriebsstunden pro Jahr	8750	h
Stromproduktion	4.375.000	kWh
Notwendige Energiezufuhr	10.937.500	KW
Leistung BGA	500	kW

Quelle: eigene Darstellung.

Anmerkung: Silomaisertrag aus „ProLand“, Gasertrag aus LFL 2004b.

**Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die aus den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. In diese Versicherung sind auch sämtliche Abbildungen und Tabellen eingeschlossen.

Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Gießen, den 29.04.2008

Adam Plata