

**Treibhausgas-Emissionen in der deutschen Landwirtschaft –
Herkunft und technische Minderungspotenziale unter
besonderer Berücksichtigung von Biogas**

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Agrarwissenschaften
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von
Jens-Karl Wegener
geboren in Göttingen

Göttingen, Dezember 2006

D7

Referent: Prof. Dr. Wolfgang Lücke

Korreferent: Prof. Dr. Herman Van den Weghe

Tag der mündlichen Prüfung: 02.02.2007

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
Zusammenfassung	XII
Prolog.....	1
I. Teil: Landwirtschaftliche Treibhausgas-Emissionen	3
Zusammenfassung	4
1 Einleitung.....	5
2 Material und Methoden.....	6
2.1 Verwendete Quellen	6
2.2 Vorgehensweise	7
2.3 Datenumrechnung.....	7
2.4 Bemerkungen.....	8
3 Emissionsdatenerfassung.....	9
3.1 Gesamtemissionen an Treibhausgasen in Deutschland	9
3.2 Emissionen der Quellgruppe Landwirtschaft	11
3.2.1 Tierische Verdauung.....	11
3.2.2 Wirtschaftsdünger-Management.....	12
3.2.3 Landwirtschaftlich genutzte Böden	14
3.2.4 Reisanbau, Brandrodung und Verbrennung von Ernterückständen....	16
3.2.5 Zusammenfassung	16
3.3 Sonstige Emissionen der Landwirtschaft.....	17
3.3.1 Energieemissionen	17
3.3.2 Landnutzung und Landnutzungsänderung.....	18
3.3.3 Zusammenfassung	20
4 Ergebnisse.....	21
4.1 Emissionsbeitrag der Landwirtschaft.....	21
4.2 Emissionsbeitrag der einzelnen Bereiche	22
4.3 Emissionsbeitrag der Einzelquellen und -senken	23

4.4	Emissionen nach Produktionsbereichen	25
4.5	Entwicklung landwirtschaftlicher Gesamtemissionen.....	27
4.5.1	Tierische Verdauung.....	29
4.5.2	Wirtschaftsdünger-Management.....	29
4.5.3	Landwirtschaftlich genutzte Böden	29
4.5.4	Energieemissionen	30
4.5.5	Landnutzung und Landnutzungsänderung.....	30
5	Diskussion.....	30
II.	Teil: Minderungspotenziale durch die energetische Nutzung von Biomasse.....	33
	Zusammenfassung	34
1	Einleitung.....	35
2	Material und Methoden.....	35
2.1	Biomasseanfall in der Landwirtschaft	35
2.2	Verfahren zur Produktion von Energie aus Biomasse	38
2.3	Methodik.....	40
2.3.1	Emissionsminderung durch energetische Nutzung.....	40
2.3.2	Emissionen aus Vorketten	41
2.3.3	Emissionsminderung durch veränderte Prozessketten.....	42
3	Ergebnisse.....	43
3.1	Stroh.....	43
3.2	Gras aus Dauergrünland.....	43
3.3	Landschaftspflegematerial	44
3.4	Exkrementen und Einstreu.....	44
3.5	Ernterückstände	44
3.6	Energiepflanzen	45
3.7	Gesamtpotenzial.....	45
4	Diskussion.....	46
III.	Teil: Innovative Technologien zur Biogasnutzung.....	49
	Zusammenfassung	50
1	Einleitung.....	51
2	Material und Methoden.....	51

3	Untersuchte Systeme.....	55
3.1	Motor-BHKW im dezentralen Betrieb	56
3.2	Direkteinspeisung von Biogas in das Erdgasnetz.....	57
3.3	Motor-BHKW bei Fernabnahme	59
3.4	Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle im dezentralen Betrieb	60
3.5	Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle bei Fernabnahme	61
3.6	Hybridsystem im dezentralen Betrieb.....	62
3.7	Hybridsystem bei Fernabnahme	64
3.8	Elektrolytmembran-Brennstoffzelle bei Fernabnahme.....	65
4	Ergebnisse	66
5	Diskussion.....	67
	Epilog.....	70
	Literaturverzeichnis	73
	Danksagung	77
	Lebenslauf.....	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Nutzbares Energiepotential an Bio-, Klär- und Deponiegas in Deutschland, aufgeschlüsselt nach Herkunft der zur Verfügung stehenden technisch nutzbaren Biomassekapazitäten. Quelle: FNR (2005a).....	36
Abbildung 2: Spezifisches Treibhausgas-Minderungspotenzial sowie die Mehrkosten im Vergleich zur konventionellen Endenergie verschiedener Biomasse-Nutzungspfade im Vergleich. Quelle: BGW & DVGW (2006).	39
Abbildung 3: Die durch pflanzenbauliche Maßnahmen verursachten Treibhausgas-Emissionen unterschiedlicher Kulturarten für die energetische Verwertung auf Basis der organischen Trockenmasse, (l.i. = low intensity, h.i. = high intensity), Quelle: Plöchl & Heiermann (2002).	41
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Bilanzgrenze für die zu untersuchenden Systeme.	52
Abbildung 5: Energieflussdiagramm bei der dezentralen Energieerzeugung mit Biogas in einem Motor-BHKW.	56
Abbildung 6: Energieflussdiagramm für eine Anlage zur Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität.	58
Abbildung 7: Energieflussdiagramm für die Fernabnahme bei Direkteinspeisung von Biogas in einem Motor-BHKW.	59
Abbildung 8: Energieflussdiagramm einer Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) bei 100 kWh Energieinput im Rohbiogas.	61
Abbildung 9: Energieflussdiagramm einer Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) bei Fernabnahme von auf Erdgasqualität aufbereitetem Biogas.	62
Abbildung 10: Energieflussdiagramm einer Biogasanlage mit einem Festoxid-Brennstoffzellen-Mikroturbinen-Hybridsystem.	63
Abbildung 11: Energieflussdiagramm eines Hybridsystems aus Festoxid-Brennstoffzelle und Mikroturbine bei Fernabnahme von auf Erdgasqualität aufbereitetem Biogas.	64
Abbildung 12: Energieflussdiagramm für die Fernabnahme von auf Erdgasqualität aufbereitetem Biogas in einem Elektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC) System für die Hausenergieversorgung.	65
Abbildung 13: Einfluss des sinkenden Kraftwerksmixes auf die spezifischen CO ₂ -Emissionseinsparungen der betrachteten Verwendungsmöglichkeiten für Biogas.	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gesamtemissionen an Treibhausgasen in Deutschland im Jahr 1990 aufgeschlüsselt nach den einzelnen Treibhausgasen Kohlendioxid (CO ₂), Methan (CH ₄), Distickstoffoxid (N ₂ O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF ₆), ihrem relativen Anteil sowie ihrem jeweiligen Treibhausgaspotenzial.	9
Tabelle 2: Gesamtemissionen an Treibhausgasen in Deutschland im Jahr 2004 aufgeschlüsselt nach den einzelnen Treibhausgasen Kohlendioxid (CO ₂), Methan (CH ₄), Distickstoffoxid (N ₂ O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF ₆), ihrem relativen Anteil sowie ihrem jeweiligen Treibhausgaspotenzial.	10
Tabelle 3: Originäre Methan- (CH ₄) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale aus der tierischen Verdauung im Jahr 1990 nach Tierarten und Untergruppen und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.	11
Tabelle 4: Originäre Methan- (CH ₄) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale aus der tierischen Verdauung im Jahr 2004 nach Tierarten und Untergruppen und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.	12
Tabelle 5: Originäre Methan- (CH ₄) und Distickstoffoxid- (N ₂ O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenzial aus dem „Wirtschaftsdünger-Management“ im Jahr 1990 nach Tierarten und Untergruppen und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.	13
Tabelle 6: Originäre Methan- (CH ₄) und Distickstoffoxid- (N ₂ O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenzial aus dem „Wirtschaftsdünger-Management“ im Jahr 2004 nach Tierarten und Untergruppen und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.	13
Tabelle 7: Originäre Methan- (CH ₄) und Distickstoffoxid- (N ₂ O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale aus dem Bereich „landwirtschaftlich genutzte Böden“ im Jahr 1990 nach Quellen/Senken und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.	15
Tabelle 8: Originäre Methan- (CH ₄) und Distickstoffoxid- (N ₂ O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale im Bereich „landwirtschaftlich genutzte Böden“ im Jahr 2004 nach Quellen/Senken und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.	15
Tabelle 9: Emissionen der „Quellgruppe Landwirtschaft“ im Jahr 1990 aufgeschlüsselt nach den Gasen Methan (CH ₄) und Distickstoffoxid (N ₂ O), ihrem Anteil an den	

gesamten deutschen Treibhausgas-Emissionen der jeweiligen Stoffgruppe im Jahr 1990 und ihrem Treibhausgaspotenzial.	16
Tabelle 10: Emissionen der „Quellgruppe Landwirtschaft“ im Jahr 2004 aufgeschlüsselt nach den Gasen Methan (CH ₄) und Distickstoffoxid (N ₂ O), ihrem Anteil an den gesamten deutschen Treibhausgas-Emissionen der jeweiligen Stoffgruppe im Jahr 2004 und ihrem Treibhausgaspotenzial.	17
Tabelle 11: Originäre Kohlendioxid- (CO ₂), Methan- (CH ₄) und Distickstoffoxid- (N ₂ O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale aus dem Bereich „Energieemissionen“ in der Landwirtschaft im Jahr 1990 nach Quellen und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.	17
Tabelle 12: Originäre Kohlendioxid- (CO ₂), Methan- (CH ₄) und Distickstoffoxid- (N ₂ O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale aus dem Bereich „Energieemissionen“ in der Landwirtschaft im Jahr 2003 nach Quellen und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.	18
Tabelle 13: Originäre Methan- (CH ₄) und Distickstoffoxid- (N ₂ O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale aus dem Bereich „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ im Jahr 1990 nach Quellen/Senken und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.	19
Tabelle 14: Originäre Methan- (CH ₄) und Distickstoffoxid- (N ₂ O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale aus dem Bereich „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ im Jahr 2004 nach Quellen/Senken und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.	19
Tabelle 15: Sonstige zurechnungsfähige Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft im Jahr 1990 aus der Nutzung von Betriebsmitteln und der Nutzung von Grün- und Ackerland aufgeschlüsselt nach den Gasen Kohlendioxid (CO ₂), Methan (CH ₄) und Distickstoffoxid (N ₂ O), ihren Anteilen an den gesamten deutschen Treibhausgas-Emissionen der jeweiligen Stoffgruppen, ihren Emissionshöhen und ihren Treibhausgaspotenzialen.	20
Tabelle 16: Sonstige zurechnungsfähige Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft im Jahr 2004 aus der Nutzung von Betriebsmitteln und der Nutzung von Grün- und Ackerland aufgeschlüsselt nach den Gasen Kohlendioxid (CO ₂), Methan (CH ₄) und Distickstoffoxid (N ₂ O), ihren Anteilen an den gesamten deutschen Treibhausgas-Emissionen der jeweiligen Stoffgruppen, ihren Emissionshöhen und ihren Treibhausgaspotenzialen.	21
Tabelle 17: Summe aller zurechnungsfähiger Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft im Jahr 2004 aufgeschlüsselt nach den Gasen Kohlendioxid (CO ₂), Methan (CH ₄) und Distickstoffoxid (N ₂ O), ihren Anteilen an den gesamten deutschen Treibhausgas-Emissionen der jeweiligen Stoffgruppen, ihren Emissionshöhen und ihren Treibhausgaspotenzialen.	21

Tabelle 18: Summe aller zurechnungsfähiger Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft im Jahr 1990 aufgeschlüsselt nach den Gasen Kohlendioxid (CO ₂), Methan (CH ₄) und Distickstoffoxid (N ₂ O), ihren Anteilen an den gesamten deutschen Treibhausgas-Emissionen der jeweiligen Stoffgruppen, ihren Emissionshöhen und ihren Treibhausgaspotenzialen.....	22
Tabelle 19: Kohlendioxid- (CO ₂), Methan- (CH ₄) und Distickstoffoxid- (N ₂ O) Emissionen der deutschen Landwirtschaft im Jahr 2004 und deren Treibhausgaspotenziale nach Bereichen.....	22
Tabelle 20: Rangfolge der landwirtschaftlichen Einzelemissionsquellen und –senken aus den Bereichen „tierische Verdauung“ (TV), „Wirtschaftsdünger-Management“ (WdM), „landwirtschaftlich genutzte Böden“ (LB), „Energieemissionen“ (EE) sowie „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ (LN) gewichtet nach ihrem Emissionsbeitrag anhand des Treibhausgaspotenzials für das Jahr 2004.....	24
Tabelle 21: Zuordnung der landwirtschaftlichen Einzelquellen und –senken zu den Produktionsbereichen „Ackerbau“ und „Tierproduktion“.....	26
Tabelle 22: Treibhausgaspotenziale der Emissionen der „Quellgruppe Landwirtschaft“ („Angerechnete“) sowie der sonstigen anrechnungsfähigen Emissionen in der Landwirtschaft aus den Bereichen „Energieemissionen“ sowie „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ („Anrechnungsfähige“) für die Jahre 1990 und 2004 sowie deren jeweilige Anteile bezogen auf den Gesamtausstoß aller Treibhausgase (THG) in Deutschland.....	27
Tabelle 23: Emissionsentwicklung von 1990 bis 2004 für die Gase CO ₂ , CH ₄ und N ₂ O in den Bereichen „tierische Verdauung“ (TV), „Wirtschaftsdünger-Management“ (WdM), „landwirtschaftlich genutzte Böden“ (LB), „Energieemissionen“ (EE) sowie „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ (LN).....	28
Tabelle 24: Übersicht der landwirtschaftlichen Biomassepotenziale in Deutschland, getrennt nach den Verwertungsrichtungen „biogene Festbrennstoffe“ sowie „Biogassubstrate“.....	36
Tabelle 25: Für die Untersuchung gewählte Biomassepotenziale in Deutschland, getrennt nach den Verwertungsrichtungen „biogene Festbrennstoffe“ sowie „Biogassubstrate“.....	38
Tabelle 26: Emissionen im Wirtschaftsdüngermanagement im Jahr 2004 und deren Verteilung auf die Tierarten Rinder und Schweine bezogen auf die Tierbestandsdaten von 2000.....	42
Tabelle 27: CH ₄ - und N ₂ O-Emissionsänderungsfaktoren für vergorene Gülle im Vergleich zur Rohgülle.....	42
Tabelle 28: Minimales bzw. maximales Treibhausgas-Emissionsminderungspotenzial aus der energetischen Nutzung verschiedener Biomassepotenziale.....	45

Tabelle 29: Gesamtes Treibhausgas-Emissionsminderungspotenzial aus der Verwertung von Biomasse.....	46
Tabelle 30: Endenergieverbrauch für den Primärenergieträger Erdgas im Jahr 2004 in Deutschland.	53
Tabelle 31: Naturgaseinsatz für die Strom- und Wärmeproduktion in öffentlichen und industriellen Kraftwerken bei angenommenen Wirkungsgraden nach der Energiebilanz 2002.	54
Tabelle 32: Ergebnisse der Emissionseinsparungen und Systemwirkungsgrade der untersuchten Systeme Brennstoffzellen-Gasturbinen-Hybridsystem (SOFC), Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC), Blockheizkraftwerk (BHKW), Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEMFC) und Direkteinspeisung von Biogas auf Erdgasqualität (Direkteinspeisung) bei Betrieb am Biogasanlagen-Standort (dezentral) sowie bei Betrieb an einem anderen Standort als dem der Biogasanlage (Fernabnahme) im Vergleich.	66

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr	MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
BGA	Biogasanlage	Mio.	Millionen
bzw.	beziehungsweise	Mg	Megagramm (1 t)
CH₄	Methan	Nawaro	Nachwachsende Rohstoffe
CO₂	Kohlendioxid	N₂O	Distickstoffoxid
EE	Energieemissionen	NIR	Nationaler Inventarbericht
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz	PEMFC	Protone Exchange Membrane Fuel Cell
el	elektrisch	PFC	perfluorierte Kohlenwasserstoffe
etc.	et cetera	PJ	Petajoule (10 ¹⁵ J)
Ges	Gesamt	SF₆	Schwefelhexafluorid
Gg	Gigagramm (1.000 t)	SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
GuD	Gas- und Dampfkraftwerk	t	Tonne
GWh	Gigawattstunde	th	thermisch
GWP	Global Warming Potential	THG	Treibhausgas
ha	Hektar	TV	tierische Verdauung
HFC	teihalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe	vgl.	vergleiche
HHKW	Holzheizkraftwerk	WdM	Wirtschaftsdünger-Management
HKW	Heizkraftwerk	z.B.	zum Beispiel
Hrsg.	Herausgeber	η	Wirkungsgrad
kWh	Kilowattstunde	$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung		
LB	landwirtschaftlich genutzte Böden		
LN	Landnutzung und Landnutzungsänderung		

Zusammenfassung

Die vorliegende Monographie befasst sich unter verschiedenen Aspekten mit den Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft. Im ersten Teil werden diese quantitativ zusammengefasst und hinsichtlich ihrer Zusammensetzung analysiert. Dabei wird unterschieden zwischen den Emissionen, die der Landwirtschaft im Nationalen Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar zugerechnet werden („Quellgruppe Landwirtschaft“) und solchen, die der Landwirtschaft darüber hinaus primär zuzurechnen sind („Energieemissionen“, Emissionen aus „Landnutzung und Landnutzungsänderung“). Je nach dem, welche Datenbasis dann zugrunde gelegt wird, trägt die Landwirtschaft im Jahr 2004 mit 6,3 % bzw. 11,1 % zu den Gesamtemissionen an Treibhausgasen in Deutschland bei. Damit ist sie ein bedeutender Emittent. Die Emissionsentwicklung in Bezug auf das Kioto-Basisjahr 1990 beträgt, bezogen auf die „Quellgruppe Landwirtschaft“ -18,5 %, womit sie mehr Emissionen gemindert hat als der Durchschnitt (-17,5 %) aller erfassten Bereiche im Nationalen Inventarbericht. Schließt man allerdings die Bereiche „Energieemissionen“ und „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ mit in die Betrachtung ein, dann liegen die Emissionsminderungen mit -16,4 % unter dem Durchschnitt. Hinzu kommt, dass die erzielten Reduktionen von Treibhausgas-Emissionen vorwiegend auf strukturellen Änderungen basieren und weniger auf systematische Maßnahmen zurückzuführen sind. Dieser Umstand wirft die Frage auf, in welcher Art und Weise die Landwirtschaft bei fortschreitender Verschärfung von nationalen Minderungszielen einen gezielten Beitrag zur Minderung von Treibhausgas-Emissionen leisten kann.

Aus diesem Grund beschäftigt sich der zweite Teil der Arbeit mit den Treibhausgas-Minderungspotenzialen, die durch die energetische Nutzung von landwirtschaftlichen Biomassen generiert werden könnten. Aufgrund der Heterogenität der vorhandenen Biomasse und der Vielzahl von Produkten, die sich auf deren Grundlage erzeugen lassen, existieren in der Praxis eine Vielzahl von technischen Verfahren mit unterschiedlichen Emissionsfaktoren. Dieser Umstand erschwert die Ableitung von realistischen Minderungspotenzialen. Die Arbeit beschränkt sich aus diesem Grund auf die Technologien, die unter Klimagesichtspunkten durch die Umwandlung der vorhandenen Biomasse den höchsten Nutzen stiften, um den maximal möglichen Beitrag der Landwirtschaft zum Klimaschutz in diesem Bereich abzuschätzen. Die Höhe des so berechneten Minderungspotenzials an Treibhausgasen beläuft sich auf 50.341 Gg CO₂-Äquivalent a⁻¹. Durch Emissionseinsparungen in dieser Höhe wäre die Landwirtschaft in der Lage, ihr Emissionssaldo bezogen auf die Emissionen der „Quellgruppe Landwirtschaft“ von 2004 um -78,3 % zu senken. Eine Realisierung in dieser Größenordnung setzt allerdings voraus, dass die Biomasse mit den Technologien genutzt wird, mit denen sie die größten Treibhausgasminderungen generiert. In dieser Hinsicht ist die zukünftige Förderung von Nachwachsenden Rohstoffen vor allem vor dem Hintergrund

der Nutzung in Biogasanlagen zu überprüfen, da sie dort nicht den maximalen Klimanutzen stiften. Die Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen zur Festbrennstoffnutzung liefert bessere Ergebnisse. Da in der Praxis, ausgelöst durch die Novellierung des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG), bereits eine Vielzahl von Biogasanlagen mit nachwachsenden Rohstoffen betrieben werden, stellt sich die Frage, in wie fern dieser auf 20 Jahre staatlich geförderte Weg in Bezug auf seinen Beitrag zum Klimaschutz verbessert werden kann.

Der dritte Teil der Arbeit untersucht deswegen die Zielbeiträge, die verschiedene technische Möglichkeiten zur Nutzung von Biogas zum Klimaschutz liefern. Untersuchungsgegenstand sind bestehende Technologien wie die energetische Nutzung im Motor-BHKW, die Direkteinspeisung von Biogas in das Erdgasnetz sowie die zukünftig mögliche Nutzung von Biogas in verschiedenen Brennstoffzellen-Systemen. Obwohl die Direkteinspeisung im Vergleich zur dezentralen Energieerzeugung am Anlagenstandort höhere Energieausbeuten bei der Umsetzung von Primär- in Sekundärenergie liefert, ist das Treibhausgas-Vermeidungspotential letztlich bedeutend geringer. Die Ursachen dafür liegen primär in der höheren Stromausbeute bei der energetischen Verwertung am Anlagenstandort. Je mehr Strom eine Technologie im Verhältnis zum Energieinput erzeugt, desto höher erweist sich ihr Treibhausgasminderungspotenzial gegenüber definierten Referenzsystemen. Aber nicht nur die Menge der Stromerzeugung spielt eine Rolle, sondern auch, wie diese ökologisch bewertet wird. Hier gibt es ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen der Biogasnutzung am Anlagenstandort und der Direkteinspeisung. Im ersten Fall kann für die Stromproduktion der Emissionsfaktor des deutschen Kraftwerksmix ($653 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$) angesetzt werden, weil der so erzeugte Strom sämtliche fossilen Energieträger substituieren könnte. Bei der Direkteinspeisung wird dagegen nicht Strom, sondern der „klimafreundlichste“ der fossilen Energieträger, nämlich Erdgas, substituiert. Wird das eingespeiste Biogas verstromt, kann für den erzeugten Strom nur noch ein Referenzwert für die Stromerzeugung aus Erdgas ($432 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$) angesetzt werden. Unter ökologischen Gesichtspunkten bietet die Direkteinspeisung von Biogas in das Erdgasnetz wesentlich weniger Treibhausgasminderungsmöglichkeiten als Systeme, die am Anlagenstandort auf Basis von Brennstoffzellen betrieben werden. Dies gilt selbst dann noch, wenn am Anlagenstandort kein Wärmenutzungskonzept vorgesehen ist. Aus diesem Grund sollte auch die Förderung innovativer Technologien durch das EEG nach ihrem potenziellen Beitrag zum Klimaschutz ausgerichtet werden.

Prolog

Erste wissenschaftliche Erkenntnisse zeichneten bereits Anfang der 1970er Jahre die Möglichkeit eines aufgrund anthropogener Einflüsse sich wandelnden globalen Klimas ab. Schon damals war klar, dass mögliche Lösungsstrategien nur international und interdisziplinär zu finden sein würden. Mehr als 30 Jahre mussten vergehen, bis diesen Erkenntnissen das erste in die Praxis umgesetzte umweltpolitische Handelsinstrument mit einer konkreten Minderungsverpflichtung von Treibhausgas-Emissionen folgte: Am 1. Januar 2005 trat der EU-Emissionshandel in Kraft, mit dem Ziel, die Treibhausgas-Emissionen innerhalb der EU bis zum Jahr 2012 um 8%, bezogen auf die Emissionen des Jahres 1990, zu senken. Dieser betrifft zunächst nur emissionsintensive Bereiche der Industrie sowie die Energiewirtschaft und beschränkt sich einstweilen auf das Treibhausgas Kohlendioxid.

Neben diesem europaweiten umweltpolitischen Instrument, welches direkt auf die Verminderung von Treibhausgasen abzielt, existieren in Deutschland weitere Instrumente, die ebenfalls direkt oder indirekt zur Verringerung von Treibhausgas-Emissionen beitragen. Erwähnt seien z.B. für den Verkehrssektor die ökologische Steuerreform, die Förderung erneuerbarer Energien im Bereich der Kraftstoffe sowie die LKW-Maut, im Haushaltssektor das CO₂-Minderungsprogramm sowie das CO₂-Gebäudesanierungsprogramm der Kreditanstalt für Wiederaufbau.

Die Landwirtschaft stellt neben den bereits genannten Sektoren einen gewichtigen Verursacher von Treibhausgas-Emissionen in Deutschland dar. Dem Verursacherprinzip folgend sollte sie aus diesem Grund auch in Anstrengungen zur Verminderung von Treibhausgas-Emissionen mit einbezogen werden. Da es sich bei den landwirtschaftlichen Emissionen allerdings oftmals um natürliche Prozessemissionen handelt, die sich mit technischen Maßnahmen nur sehr eingeschränkt verhindern lassen, ist eine Verminderung von Treibhausgas-Emissionen ohne Reduktion der Produktivität schwierig. Einen Ausweg zur technischen Umsetzung von Treibhausgasminderungen in der Landwirtschaft bietet die energetische Nutzung von Biomasse, die durch den Gesetzgeber auf Grundlage des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG) gefördert wird. Durch den Einsatz von Biomasse zur Energieerzeugung können fossile Energieträger substituiert werden, aus denen die Treibhausgas-Emissionsminderungen resultieren. Auf diese Weise kann die Landwirtschaft neben der Erschließung neuer Geschäftsfelder auch einen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Ziel des EEG ist unter anderem die Förderung einer nachhaltigen Energieversorgung im Interesse des Klimaschutzes sowie die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien. Zwei Jahre nach der Novellierung des EEG ist eine kritische Überprüfung dieser Ziele angebracht. Die vorliegende Monographie beschäftigt sich aus unterschiedlichen Blickwinkeln mit der Treibhausgas-Emissionsproblematik in der Landwirtschaft. Der erste Teil gibt einen Überblick hin-

sichtlich der Quellen und Senken von Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft und deren Bedeutung. Im zweiten Teil wird das Emissionsminderungspotenzial der Landwirtschaft durch die energetische Verwertung von landwirtschaftlicher Biomasse aufgezeigt. Im dritten Teil werden verschiedene Technologien zur Kraft-Wärme-Kopplung in Bezug auf ihren Beitrag zur Emissionsreduktion verglichen. Auf Grundlage dieser drei Teile lassen sich einige kritische Anmerkungen zum EEG ableiten.

I. Teil:
Landwirtschaftliche Treibhausgas-Emissionen

Zusammenfassung

Der Zielbeitrag Deutschlands im Rahmen der im Kioto-Protokoll eingegangenen Verpflichtung zur Reduktion von Treibhausgasen (THG) im Zeitraum von 1990 bis 2012 beträgt 21 %. Bis 2004 sind die Emissionen um 17,5 % verringert worden. Je nach dem welche Datenbasis zu Grunde gelegt wird, hat die Landwirtschaft im Zeitraum von 1990 bis 2004 ihre THG-Emissionen um insgesamt 16,4-18,5 % verringert. Diese Entwicklung ist vorwiegend auf strukturelle Änderungen zurückzuführen.

In allen Sektoren wie auch dem der Landwirtschaft sind zur Umsetzung der Kioto-Verpflichtung Deutschlands bis zum Jahr 2012 weitere Emissionsminderungen zu realisieren. Emissionen innerhalb der Landwirtschaft bzw. solche, die ihr zugerechnet werden, entstehen in den Bereichen „Tierische Verdauung“, „Wirtschaftsdünger-Management“, „Landwirtschaftlich genutzte Böden“, „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ sowie „Energieemissionen“. Da es sich dabei vorwiegend um Emissionen aus natürlichen Prozessen handelt, sind technische Reduktionsmöglichkeiten nur begrenzt umsetzbar. Insgesamt bewegt sich der Anteil der landwirtschaftlichen Freisetzen von THG an den deutschen Gesamtemissionen je nach betrachtetem Bilanzraum zwischen 6,3 % und 11,1 %. Damit stellt die Landwirtschaft einen bedeutenden Emittenten dar.

Es gibt z. T. erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Emissionsquellen bzw. den Bereichen in Bezug auf ihren Emissionsbeitrag. So emittieren vier der in dieser Arbeit insgesamt genannten 33 Einzelquellen bzw. -senken bereits 58,7 % der gesamten landwirtschaftlichen Emissionen. Dabei handelt es sich um Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Moorflächen, der Verdauungstätigkeit von Rindern, entwässerten organischen Grünlandstandorten und dem Einsatz von Mineraldünger. Die Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen, repräsentiert durch die Bereiche „Landwirtschaftlich genutzte Böden“ sowie „Landnutzung und Landnutzungsänderung“, verursachen 68,6 % aller in der Landwirtschaft vorkommenden Emissionen.

1 Einleitung

Mit der Ratifizierung des Kioto-Protokolls im Jahr 2002 hat sich Deutschland zu einer erheblichen Reduzierung seines Ausstoßes an Treibhausgasen (THG) verpflichtet. Ziel ist es, nach Maßgabe des EU-Lastenausgleichs (EU 2002) in Deutschland eine Minderung um 21 %, basierend auf der Emissionsmenge von 1990, bis zum Jahr 2012 zu erreichen. Weltweit ist die Landwirtschaft mit einer Vielzahl von Quellen und Senken am Ausstoß und der Bindung von THG beteiligt (Klein & Ledgard 2005, Oenema et al. 2005, Jungkunst et al. 2006). In der Systematik des Nationalen Inventarberichts, der die THG-Emissionen in Deutschland erfasst, ist die Landwirtschaft mit 6,3 % der zweitgrößte Emittent hinter den energiebedingten Emissionen mit einem Anteil von über 80 % an den Gesamtemissionen (UBA 2006). Tatsächlich sind die Emissionen, welche den Prozessen in der Landwirtschaft zuzurechnen sind, aber deutlich höher. Dies liegt daran, dass in der „Quellgruppe Landwirtschaft“ des Nationalen Inventarberichts nur über Emissionen aus der „tierischen Verdauung“, des „Wirtschaftsdünger-Managements“ und aus „landwirtschaftlich genutzten Böden“ berichtet wird. Weitere Emissionsquellen wie beispielsweise „Energieemissionen“, welche zum Teil ebenfalls der Landwirtschaft zuzurechnen sind, werden anderen Quellgruppen zugeordnet. Im Folgenden soll anhand einer Auswertung von Sekundärquellen des Umweltbundesamtes eine detaillierte Zusammenfassung der Emissionen erstellt werden, die einen Bezug zur Landwirtschaft aufweisen. Diese werden hinsichtlich ihrer Art, ihrer Zusammensetzung, ihres Ursprungs und ihrer Entwicklung im Zeitraum von 1990 bis 2004 analysiert, sowie in Relation zu den Gesamtemissionen an THG in Deutschland gesetzt.

Es soll geklärt werden, welche Anteile einzelne thematisch gegliederte Bereiche der Landwirtschaft an den Gesamtemissionen der Landwirtschaft haben und ob es nennenswerte Unterschiede zwischen den Bereichen gibt. Des Weiteren sollen die Zielbeiträge landwirtschaftlicher Einzelemissionsquellen und -senken bestimmt und ihr Einfluss auf die Gesamtemissionen der Landwirtschaft untersucht werden. Darüber hinaus soll der Anteil landwirtschaftlicher Emissionen am deutschen Gesamtemissionsaufkommen für das Jahr 2004 bestimmt werden sowie deren Entwicklung im Zeitraum von 1990 bis 2004, um Ursachen für Emissionsminderungen in der Vergangenheit abzuleiten.

2 Material und Methoden

2.1 Verwendete Quellen

Die Ermittlung aller Emissionsdaten beschränkt sich auf zwei Quellen, den Nationalen Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2004 (UBA 2006) sowie den ausführlichen Teilbericht für die Quellgruppe Landwirtschaft (Dämmgen 2006a/2006b), der eine Grundlage des genannten Nationalen Inventarberichts ist. Zunächst soll kurz dargelegt werden, warum diese Einschränkung bei der Wahl der Literatur vorgenommen wird.

Deutschland ist als Vertragsstaat der Klimarahmenkonvention dazu verpflichtet, jährlich einen so genannten Nationalen Inventarbericht (NIR) zu Veröffentlichen. Darin wird ausgehend von 1990 über die jährlichen Freisetzungen von THG in den Bereichen „Energie“, „Industrieprozesse“, „Lösungsmittel und andere Produktverwendung“, „Landwirtschaft“, „Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft“, „Abfall und Abwasser“ und „Andere“ berichtet. Die in den einzelnen Bereichen verwendeten Modelle und Methoden zur Kalkulation der Emissionsmengen sowie die den Berechnungen zugrunde liegenden statistischen Daten werden jedes Jahr weiter verfeinert und unterliegen einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess. Ziel des NIR ist es, die Unsicherheiten bezüglich der Datengenauigkeit so weit wie praktikabel zu reduzieren. Die im jeweils jüngsten NIR erhobenen Emissionsdaten geben somit den aktuellsten Stand der Datenerhebung wieder, was bedingt durch Rückrechnungen auch für die jährlich publizierten Zeitreihen der Emissionsentwicklungen seit 1990 gilt. Da es sich letztlich bei den Daten um Hochrechnungen, basierend auf statistischen Daten und Modellen, bzw. da, wo kein geeignetes Zahlenmaterial zur Verfügung steht, um Expertenschätzungen handelt, weisen die zitierten Daten zum Teil erhebliche Unsicherheitsfaktoren auf. Dennoch erscheint eine Zusammenfassung und Analyse dieser Daten sinnvoll, da die der Landwirtschaft zurechenbaren Emissionen dort bereits quantifiziert sind (Datenverfügbarkeit), diese innerhalb der Bereiche nach einheitlichen Regeln ermittelt wurden (Datenkonsistenz) und die Unsicherheiten bezüglich der ermittelten Ergebnisse angegeben werden (Datentransparenz).

Ein Teil der im NIR dargestellten Daten ist ein Extrakt aus ausführlicheren eigenständigen Publikationen. Dies gilt auch für die im NIR dargestellten Abschnitte der „Quellgruppe Landwirtschaft“. Er beruht auf dem ausführlichen Teilbericht der deutschen Landwirtschaft (Dämmgen 2006a/2006b), in dem die Emissionsdaten wesentlich besser aufgelöst sind als im NIR. Aus diesem Grund wird dieser ebenfalls zur Erfassung der landwirtschaftlichen Emissionen herangezogen.

2.2 Vorgehensweise

Zunächst werden auf Grundlage der genannten Quellen die Emissionen mehrerer Bereiche für die Jahre 1990 und 2004 zusammengetragen, die der Landwirtschaft zurechenbar sind. Aus den so ermittelten absoluten Mengen werden die relativen Anteile innerhalb des jeweils betrachteten Bereichs berechnet. Auf Basis dieser Emissionsdaten findet eine Auswertung statt, um die Eingangs erwähnten Fragestellungen zu beantworten. Dazu werden zunächst die Emissionsdaten der einzelnen Bereiche für das Jahr 2004 nach ihrem absoluten Gesamtbeitrag in CO₂-Äquivalenten absteigend geordnet und ihr relativer Anteil an den berichteten landwirtschaftlichen Gesamtemissionen berechnet. Für jeden Bereich wird zusätzlich dargestellt, wie sich die absoluten Gesamtemissionen des jeweiligen Bereichs hinsichtlich der Emissionen von einzelnen THG zusammensetzen.

Danach erfolgt eine Untersuchung der Einzelemissionsquellen und -senken, die ebenfalls nach ihrem Treibhausgaspotential absteigend geordnet werden. In Anlehnung an eine ABC-Analyse wird der relative Emissionsbeitrag einzelner Quellen und Senken kumuliert, um auf Grundlage der Zielbeiträge einzelner Quellen zum Gesamtemissionsaufkommen der Landwirtschaft eine Gruppierung nach der Relevanz der Quellen vorzunehmen. Dabei soll eine Unterteilung der Quellen in die Kategorie A, B, C und D vorgenommen werden. Die Kategorie A umfasst alle Quellen, deren Ausstoß größer als 10.000 Gg a⁻¹ ist. Alle Quellen, die mehr als 1.000 Gg a⁻¹ und weniger als 10.000 Gg a⁻¹ emittieren, werden zur Kategorie B zusammengefasst. In die Kategorie C fallen alle Quellen, deren Emissionsbeitrag unter 1.000 Gg a⁻¹ liegt. Senken werden in der Kategorie D zusammengefasst.

Im nächsten Schritt erfolgt soweit möglich eine Zuordnung der Einzelquellen auf die beiden Produktionsbereiche Ackerbau und Tierhaltung, um den Emissionsbeitrag dieser Segmente zu ermitteln. Als letztes werden die relativen und absoluten Emissionsänderungen, die zwischen 1990 und 2004 stattgefunden haben, innerhalb der einzelnen Bereiche bzw., soweit Daten vorhanden, auf Ebene der Einzelquellen und -senken, erhoben.

2.3 Datenumrechnung

Die Emissionsdaten werden jeweils anhand des originären Ausstoßes eines THG sowie anhand ihres Treibhausgaspotenzials dargestellt. Die Bestimmung des Treibhausgaspotenzials erfolgt durch Multiplikation der originären Emissionsmenge mit dem Global Warming Potential (GWP¹). Durch diese Umrechnung in CO₂-Äquivalente kann die

¹ Das Global Warming Potential (=Treibhausgaspotenzial) ist ein (relatives) Maß für die Klimawirksamkeit eines Treibhausgases. Es drückt die mittlere Erwärmungswirkung eines Gases über einen bestimmten Zeithorizont aus. Per Definition hat CO₂ einen GWP von 1. Das Treibhausgaspotenzial von CH₄ beträgt für einen Zeithorizont von 100 Jahren 23, d.h. eine Tonne CH₄ trägt in diesem Zeitraum 23-mal stärker zum Treibhauseffekt bei als eine Tonne CO₂. N₂O hat bezogen auf 100 Jahre ein GWP von 296 (IPCC 2001).

Klimawirksamkeit verschiedener THG miteinander verglichen werden. In der vorliegenden Arbeit wird mit den aktuellen GWP-Faktoren von 2001 gerechnet. Danach haben CO₂-Emissionen den Faktor 1, CH₄-Emissionen den Faktor 23 und N₂O-Emissionen den Faktor 296 (IPCC 2001).

In den zitierten Quellen, in denen keine originären Emissionsmengen angegeben sind und die angegebenen Treibhausgaspotenziale auf den GWP-Faktoren von 1995² basieren (IPCC 1995), erfolgt eine Umrechnung auf die Faktoren von 2001. Aus diesem Grund können geringe Abweichungen hinsichtlich des in der vorliegenden Arbeit berechneten Treibhausgaspotenzials und denen, die im NIR 2006 (UBA 2006) angegeben werden, auftreten.

Die Umrechnung der Daten bezüglich der aktuellen GWP wurde für alle landwirtschaftlichen Emissionsdaten aus dem Jahr 1990 vorgenommen. Dies gilt ebenfalls für die deutschen Gesamtemissionen an Treibhausgasen im Jahr 1990 sowie die des Jahres 2004. Dort ist diese Vorgehensweise allerdings nicht vollständig konsistent umsetzbar, da sich aus dem vorhandenen Datenmaterial nicht alle Werte mit Hilfe der aktuellen GWP umrechnen lassen. Die Treibhausgaspotenziale auf Basis der neuen GWP von CO₂, CH₄, N₂O und SF₆ lassen sich aufgrund der vorhandenen Daten problemlos bestimmen. Die Stoffgruppe der teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffe und der perfluorierten Kohlenwasserstoffe lässt sich dagegen nicht umrechnen, da jeder einzelne Stoff einen anderen GWP hat, das Treibhausgaspotenzial aber nur für die gesamte Stoffgruppe angegeben wird. Auf entsprechende Abweichungen und Inkonsistenzen wird im Text hingewiesen.

2.4 Bemerkungen

Bei den zitierten Quellen handelt es sich um Hochrechnungen basierend auf statistischen Daten, Modellen und Expertenschätzungen für die Jahre 2004 und 1990. Zur Art der Datenerfassung sowie zur Abschätzung der Datengenauigkeit wird auf die Originalquellen verwiesen (UBA 2006, Dämmgen 2006a/2006b).

Zwischendaten werden nicht erhoben, da die im NIR dargestellten Zeitreihen aufgrund von quellenspezifischen Rückrechnungen mit jedem neuen Inventar aktualisiert werden, historische Daten aber nicht in der selben Auflösung wie die des aktuell betrachteten Jahres wiedergegeben werden. Aus diesem Grund ist eine detaillierte Darstellung von Zwischendaten nicht möglich.

Bei den Energieemissionen der Landwirtschaft wurde zum Teil auf Daten für das Jahr 2003 zurückgegriffen, da die Datenauflösung im Gegensatz zu den Daten von 2004 wesentlich detaillierter ist. Emissionen sind nach Energieträgern und THG differenziert dargestellt, wohingegen die Daten für 2004 nur über die Höhe der THG-Emissionen für

² Im NIR 2006 wird das Treibhausgaspotential für CH₄ mit einem GWP von 21, für N₂O mit einem GWP von 310 und CO₂ mit einem GWP von 1 berechnet (vgl. UBA 2006, S. 54).

alle Energieträger zusammen berichtet. Auf eventuelle Abweichungen zu den Daten von 2004 wird hingewiesen.

3 Emissionsdatenerfassung

Im Folgenden werden vorhandene Daten zum Emissionsaufkommen in der Landwirtschaft für die Jahre 1990 und 2004 dargestellt. Dabei wird bereits eine erste Analyse hinsichtlich der relativen Anteile einzelner Emissionsquellen vollzogen, um wiederholte tabellarische Darstellungen im Ergebnisteil zu vermeiden.

Um die Rolle der landwirtschaftlichen Emissionen am Gesamtemissionsaufkommen in Deutschland zu bewerten, ist zunächst eine Darstellung der Emissionen aller THG in Deutschland notwendig, bevor speziell auf die durch Landwirtschaft verursachten Emissionen eingegangen wird.

3.1 Gesamtemissionen an Treibhausgasen in Deutschland

Tabelle 1: Gesamtemissionen an Treibhausgasen in Deutschland im Jahr 1990 aufgeschlüsselt nach den einzelnen Treibhausgasen Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF₆), ihrem relativen Anteil sowie ihrem jeweiligen Treibhausgaspotenzial.

<i>Treibhausgas</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen [Gg]</i>	<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
CO ₂	83,4	1.030.231	1.030.231
CH ₄	8,8	4.752	109.299
N ₂ O	6,6	273	80.955
HFC	0,5	- ³	6.556*
PFC	0,1	-	1.750*
SF ₆	0,5	0,3	6.710
Summe	100		1.235.500

*Diese Werte stellen die Treibhausgaspotentiale auf Grundlage des Global Warming Potential (GWP) nach (IPCC 1995) dar. Alle übrigen Werte diese Spalte sind auf Grundlage der aktuellen GWP nach (IPCC 2001) berechnet.

Quelle: Veränderte Darstellung nach UBA (2006)

Die THG-Emissionen Deutschlands für das Kioto-Basisjahr 1990/95⁴ betragen nach **Tabelle 1** in Summe 1.235.500 Gg CO₂-Äquivalent. Kohlendioxid (CO₂) stellt mit einem Anteil von 83,4 % und einem Treibhausgaspotenzial von 1.030.231 Gg CO₂-Äquivalent das bedeutendste THG dar. Mit weitem Abstand folgt Methan (CH₄) mit

³ Eine Berechnung der tatsächlichen Emissionen von HFCs sowie PFCs ist nicht möglich, da es sich um Stoffgruppen mit einer Vielzahl von einzelnen Verbindungen handelt.

⁴ Für die Treibhausgase CO₂, CH₄ und N₂O gilt das Jahr 1990 als Basisjahr, für die Gruppe der teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffe, der perfluorierten Kohlenwasserstoffe sowie für Schwefelhexafluorid das Jahr 1995.

einem Anteil von 8,8 % und einem Treibhausgaspotenzial von 109.299 Gg CO₂-Äquivalent sowie Distickstoffoxid (N₂O) mit einem Anteil von 6,6 % und einem Treibhausgaspotenzial von 80.955 Gg CO₂-Äquivalent. Die übrigen THG, die teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), die perfluorierten Kohlenwasserstoffe (PFC) sowie das Schwefelhexafluorid (SF₆) spielen mit einem summierten Anteil von 1,1 % an den Gesamtemissionen eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 2: Gesamtemissionen an Treibhausgasen in Deutschland im Jahr 2004 aufgeschlüsselt nach den einzelnen Treibhausgasen Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC) und Schwefelhexafluorid (SF₆), ihrem relativen Anteil sowie ihrem jeweiligen Treibhausgaspotenzial.

<i>Treibhausgas</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen [Gg]</i>	<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
CO ₂	87,1	885.854	885.854
CH ₄	5,5	2.450	56.342
N ₂ O	6,0	207	61.378
HFC	0,9	- ⁵	8.802*
PFC	0,1	-	831*
SF ₆	0,4	0,2	4.162
Summe	100		1.017.369

*Diese Werte stellen die Treibhausgaspotentiale auf Grundlage des Global Warming Potential (GWP) nach (IPCC 1995) dar. Alle übrigen Werte dieser Spalte sind auf Grundlage der aktuellen GWP nach (IPCC 2001) berechnet.

Quelle: Veränderte Darstellung nach UBA (2006)

Bis zum Jahr 2004 ist der Gesamtausstoß an THG bezogen auf die Emissionen von 1990 um 17,7 % auf 1.017.400 Gg CO₂-Äquivalent verringert worden (**Tabelle 2**). Dabei trägt der Rückgang der CO₂-Emissionen um 14,0 % bzw. 218.131 Gg auf ein Niveau von 885.854 Gg in absoluten Zahlen am stärksten bei. Insgesamt hat sich der Anteil der CO₂-Emissionen an den Gesamtemissionen allerdings von 1990 auf 2004 um 3,7 % auf 87,1 % erhöht. Die CH₄-Emissionen sind im selben Zeitraum um 48,5 % gesunken. Diese in relativen Zahlen deutliche Emissionseinsparung entspricht einer Senkung des Treibhausgaspotenzials um 52.957 Gg CO₂-Äquivalent. Damit ist auch der Anteil der CH₄-Emissionen an den Gesamtemissionen um 3,3 % auf nunmehr 5,5 % gefallen. Bei den N₂O-Emissionen entspricht die relative Emissionsminderung um 24,2 % einer Verminderung des Treibhausgaspotenzials um 19.567 Gg CO₂-Äquivalent. Der Anteil an den Gesamtemissionen sinkt dadurch um 0,6 % auf 6,0 %. Bei der Stoffgruppe der HFC hat dagegen eine Ausweitung der Emissionen um 34,3 % stattgefunden. In absoluten Zahlen hat sich dadurch das Treibhausgaspotenzial dieser Verbindungen um 2.247 Gg CO₂-Äquivalent erhöht. Der relative Anteil an den Gesamtemissionen steigt damit um 0,4 % auf 0,9 %. Die größte relative Einsparung hat dagegen mit 52,5 % bei der Stoffgruppe der PFC stattgefunden. In absoluten Zahlen haben sich die Emissionen dadurch lediglich um 919 Gg CO₂-Äquivalent vermindert. Der An-

⁵ Eine Berechnung der tatsächlichen Emissionen von HFCs sowie PFCs ist nicht möglich, da es sich um Stoffgruppen mit einer Vielzahl von einzelnen Verbindungen handelt.

teil an den Gesamtemissionen bleibt mit 0,1 % konstant. Das gilt auch für die SF₆-Emissionen, die weiterhin ebenfalls einen Anteil an den Gesamtemissionen von 0,1 % haben. Trotzdem wurden mit 38,0 % auch hier große relative Einsparungen erzielt, die gemessen am Treibhausgaspotenzial einer Verminderung von 2.548 Gg CO₂-Äquivalent entsprechen.

3.2 Emissionen der Quellgruppe Landwirtschaft

In der Systematik des Nationalen Inventarberichts werden die Emissionen aus den Bereichen „tierische Verdauung“, „Wirtschaftsdünger-Management“, „landwirtschaftlich genutzte Böden“, „Reisanbau“, „Brandrodung“ sowie „Verbrennung von Ernterückständen“ der Landwirtschaft zugerechnet. Diese werden zur so genannten „Quellgruppe Landwirtschaft“ zusammengefasst, in der für Deutschland über Emissionen der Treibhausgase CH₄ und N₂O berichtet wird. Im Folgenden werden die einzelnen Bereiche kurz erläutert und die Emissionsdaten für die Einzelemissionsquellen der jeweiligen Bereiche für die Jahre 1990 und 2004 aufgezeigt.

3.2.1 Tierische Verdauung

In den Mägen von Nutztieren, insbesondere in denen von Wiederkäuern, finden sich Mikroorganismen, die in der Lage sind, unter den vorherrschenden anaeroben Bedingungen CH₄ als Stoffwechselprodukt zu erzeugen. Dieses wird von den Nutztieren an die Umwelt abgegeben und trägt mit zu den THG-Emissionen bei. Die Höhe der Emissionen pro Zeiteinheit wird im Wesentlichen beeinflusst durch die Tierart, die individuelle Leistung der Tiere sowie die Nahrungszusammensetzung der Futtermittel.

Im Folgenden wird die Emissionsentwicklung des Bereichs „tierische Verdauung“ anhand der Daten von 1990 und 2004 dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass in den dargestellten Daten die Emissionen für die Tiergruppe „Geflügel“ nicht berücksichtigt sind, da ihre Emissionen für den Bereich der tierischen Verdauung als irrelevant angesehen werden (Dämmgen 2006).

Tabelle 3: Originäre Methan- (CH₄) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale aus der tierischen Verdauung im Jahr 1990 nach Tierarten und Untergruppen und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.

<i>Tierart/Untergruppe</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen [Gg CH₄]</i>	<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
Milchkühe	52	603	13.869
Andere Rinder	42	488	11.226
Andere Tiere	6	72	1.655
Gesamtsumme	100	1.163	26.750

Quelle: UBA (2006)

Die Emissionen im Bereich der „tierischen Verdauung“ haben im Jahr 1990 zusammen ein Treibhausgaspotenzial von 26.750 Gg CO₂-Äquivalent (**Tabelle 3**). Hauptverursacher sind wie bereits erwähnt die Wiederkäuer, ausgewiesen in der **Tabelle 3** als

„Milchkühe“ und „Andere Rinder“, die in Summe einen relativen Anteil von 94 % ausmachen. Die restlichen 6 % verteilen sich auf alle anderen Nutztiere außer Geflügel, die aus oben genannten Gründen nicht berücksichtigt sind.

Tabelle 4: Originäre Methan- (CH₄) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale aus der tierischen Verdauung im Jahr 2004 nach Tierarten und Untergruppen und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.

<i>Tierart/Untergruppe</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen [Gg CH₄]</i>	<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
Milchkühe	54,2	478,4	11.003
Kälber	0,5	4,7	108
Färsen	17,7	156,0	3.588
Mastbullen	14,9	131,3	3.020
Mutterkühe	4,3	37,7	867
Zuchtbullen	1,0	8,9	205
Summe Rinder	92,6	817,0	18.791
Sauen	0,5	4,2	97
Aufzuchtferkel	0,2	1,8	41
Mastschweine	2,7	23,7	545
Eber	0,0	0,1	2
Summe Schweine	3,4	29,8	685
Kleinpferde	0,3	10,8	248
Großpferde	1,2	2,7	62
Summe Pferde	1,5	13,4	308
Schafe	2,5	21,7	499
Ziegen	0,1	0,8	18
Büffel	0,0	0,1	1
Gesamtsumme	100	882,9	20.303

Quelle: Dämmgen (2006)

Im Gegensatz zu den Emissionsdaten von 1990 sind die des Jahres 2004 wesentlich besser aufgelöst (**Tabelle 4**). Alle relevanten Nutztierarten sind teilweise sogar mit Untergruppen bezüglich ihres Emissionsbeitrags ausgewiesen. Das Treibhausgaspotenzial beträgt in Summe 20.303 Gg CO₂-Äquivalent, wobei die Wiederkäuer mit einem Gesamtanteil von 92,6 % immer noch die wesentlichen Emittenten in diesem Bereich stellen. Emissionen von Schweinen mit einem Anteil von 3,4 %, Schafen mit 2,5 % und Pferden mit 1,5 % spielen nur eine untergeordnete Rolle, die von Ziegen und Büffeln sind nahezu irrelevant.

3.2.2 Wirtschaftsdünger-Management

Bei der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern entstehen durch biologische Abbauprozesse sowohl CH₄- als auch N₂O-Emissionen. CH₄ entsteht als Stoffwechselprodukt bei der anaeroben Vergärung organischer Bestandteile in den Exkrementen durch Mikroorganismen. Ebenfalls unter anaeroben Bedingungen wird über Denitrifikation der im Wirtschaftsdünger enthaltenden N-Spezies N₂O gebildet. Einflussfaktoren für diese Emissionen im „Wirtschaftsdünger-Management“ stellen im

wesentlichen die tierischen Exkremente selbst, die Stallanlagen, die Lagerung, die Behandlung und die Art der Ausbringung dar.

Tabelle 5: Originäre Methan- (CH₄) und Distickstoffoxid- (N₂O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenzial aus dem „Wirtschaftsdünger-Management“ im Jahr 1990 nach Tierarten und Untergruppen und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.

<i>Tierart/Untergruppe</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen</i>		<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
		<i>[Gg CH₄]</i>	<i>[Gg N₂O]</i>	
Milchvieh	31	91	4,1	3.301
Andere Rinder	37	110	4,6	3.892
Summe Rinder	68	201	8,7	7.193
Schweine	23	77	2,3	2.448
Geflügel	5	-	1,7	493
Andere Tiere*	4	11	0,6	451
Gesamtsumme	100	289	13,3	10.585

* Schafe, Pferde, Ziegen, Esel, Maultiere, Pelztiere, Büffel etc.

Quelle: UBA (2006)

In **Tabelle 5** finden sich die Emissionsdaten für das Jahr 1990. Insgesamt entstand hier ein Treibhausgaspotenzial von 10.585 Gg CO₂-Äquivalent. Auch im Wirtschaftsdünger-Management sind die Rinder mit einem Emissionsbeitrag von 68 % ein wesentlicher Emittent. Aber auch Schweine mit einem Beitrag von 23 % spielen eine tragende Rolle. Alle weiteren Kategorien wie „Geflügel“ und „Andere Tiere“ sind mit einem Anteil von 5 % bzw. 4 % weitaus weniger bedeutsam.

Im Jahr 2004 ändert sich wenig an der Aufteilung der Emissionen auf die einzelnen Tiergruppen (**Tabelle 6**). Rinder und Schweine mit einem Anteil von 62 % bzw. 24 % stellen immer noch die Hauptursache für Emissionen aus dem „Wirtschaftsdünger-Management“ dar. Starke relative Zuwächse sind beim Geflügel mit 9 % zu verzeichnen. Die Pferdehaltung spielt mit 4 % noch eine geringe Rolle, alle anderen Tierarten sind bezüglich ihrer Emissionen aus dem „Wirtschaftsdünger-Management“ irrelevant.

Tabelle 6: Originäre Methan- (CH₄) und Distickstoffoxid- (N₂O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenzial aus dem „Wirtschaftsdünger-Management“ im Jahr 2004 nach Tierarten und Untergruppen und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.

<i>Tierart/Untergruppe</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen</i>		<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
		<i>[Gg CH₄]</i>	<i>[Gg N₂O]</i>	
Milchkühe	30	84,4	2,0	2.533
Kälber	2	0,4	0,5	157
Färsen	20	51,2	1,8	1.710
Mastbullen	6	18,5	0,3	514
Mutterkühe	2	2,1	0,5	196
Zuchtbullen	1	4,7	-	108
Summe Rinder	62	161,3	5,1	5.220

Tabelle 6 (Fortsetzung)

<i>Tierart/Untergruppe</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen</i>		<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
		<i>[Gg CH₄]</i>	<i>[Gg N₂O]</i>	
Sauen	5	9,9	0,6	405
Aufzuchtferkel	1	3,5	0,0	92
Mastschweine	18	59,7	0,6	1.551
Eber	0	0,2	0,0	8
Summe Schweine	24	73,3	1,3	2.056
Kleinpferde	3	2,4	0,7	262
Großpferde	1	0,6	0,2	73
Summe Pferde	4	2,9	0,8	304
Legehennen	3	3,0	0,7	70
Masthähnchen	3	4,3	0,6	98
Junghennen	1	1,3	0,1	29
Gänse	0	0,0	0,0	1
Enten	0	0,2	0,0	5
Puten	2	0,8	0,4	19
Summe Geflügel	9	9,6	1,9	780
Schafe	0	0,5	0,1	44
Ziegen	0	0,0	0,0	5
Büffel	0	0,0	0,0	0
Pelztiere	0	-	0,0	2
Gesamtsumme	100	247,6	9,2	8.410

Quelle: Dämmgen (2006)

3.2.3 Landwirtschaftlich genutzte Böden

Durch natürliche Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse von N-Spezies landwirtschaftlichen Ursprungs entstehen in den landwirtschaftlich genutzten Böden N₂O-Emissionen. Die N-Spezies werden vorwiegend durch den Einsatz von Mineraldünger und Wirtschaftsdünger eingetragen. Die Ausbringung von Klärschlamm, der Anbau von Leguminosen, Ernterückstände sowie der Anfall von Exkrementen bei der Weidehaltung von Nutztieren stellen weitere N-Quellen dar. Aber auch in bewirtschafteten organischen Böden findet durch die Mineralisierung organischer Substanz eine Freisetzung von N₂O statt. Alle diese genannten Quellen tragen zu den direkten N₂O-Emissionen bei (Hellebrand et al. 2003/2005, Klein & Ledgard 2005, Oenema et al. 2005). Indirekte N₂O-Emissionen entstehen dagegen durch Auswaschungen und Oberflächenabfluss von N-Spezies auf landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie durch den atmosphärischen Eintrag von N-Spezies landwirtschaftlicher Quellen. Daneben hat der landwirtschaftlich genutzte Boden aber auch eine Senkenfunktion für atmosphärisches CH₄ (Dendoncker et al. 2004), da dieses durch spezialisierte Mikroorganismen im Rahmen des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs in CO₂ umgewandelt wird.

Mit einem relativen Anteil von 65 % an den Gesamtemissionen im Bereich „landwirtschaftlich genutzte Böden“ im Jahr 1990 haben die direkten Emissionen den größten Stellenwert (Tabelle 7). Indirekte Emissionen folgen mit einem relativen Anteil von

33 %. Des Weiteren wird die Tierproduktion im Datensatz von 1990 mit einem Anteil von 4 % aufgeführt. Die Kategorie „Andere“ umfasst die Senken, welche Emissionen in Höhe von 2 % des Gesamtanfalls binden. Insgesamt entstehen 1990 im Bereich „landwirtschaftlich genutzte Böden“ Emissionen mit einem Treibhausgaspotenzial von 41.612 Gg CO₂-Äquivalent.

Tabelle 7: Originäre Methan- (CH₄) und Distickstoffoxid- (N₂O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale aus dem Bereich „landwirtschaftlich genutzte Böden“ im Jahr 1990 nach Quellen/Senken und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.

<i>Quelle/Senke</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen</i>		<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
		<i>[Gg CH₄]</i>	<i>[Gg N₂O]</i>	
Direkte Emissionen	65	-	91,6	27.118
Tierproduktion	4	-	5,5	1.630
Indirekte Emissionen	33	-	46,0	13.600
Andere	-2	-32,0	-	-736
Gesamtsumme	100	-32,0	143,1	41.612

Quelle: UBA (2006)

Im Jahr 2004 beträgt das Treibhausgaspotenzial der Emissionen des Bereichs „landwirtschaftlich genutzte Böden“ zusammen 35.618 Gg CO₂-Äquivalent (**Tabelle 8**). Der Anteil der direkten Emissionen, der im Datensatz für 2004 in die Positionen „Mineraldünger“, „Wirtschaftsdünger“, „Klärschlamm“, „Organische Böden“, „Ernterückstände“, „Leguminosen“, „Weidegang“ und „Methan-Konsumption“ aufgeschlüsselt ist, beträgt zusammen 68 %. Die indirekten Emissionen, aufgegliedert in „Auswaschung“ und „Deposition“ betragen 32 %. Anstelle der Positionen „Tierproduktion“ und „Andere“ aus dem Datensatz von 1990 (**Tabelle 7**) finden sich die Positionen „Weidegang“ bzw. „Methan-Konsumption“, welche den direkten Emissionen zugeschlagen sind (**Tabelle 8**).

Tabelle 8: Originäre Methan- (CH₄) und Distickstoffoxid- (N₂O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale im Bereich „landwirtschaftlich genutzte Böden“ im Jahr 2004 nach Quellen/Senken und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.

<i>Quelle/Senke</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen</i>		<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
		<i>[Gg CH₄]</i>	<i>[Gg N₂O]</i>	
Mineraldünger	30	-	35,9	10.626
Wirtschaftsdünger	17	-	20,1	5.950
Klärschlamm	0	-	0,6	169
Organische Böden	15	-	17,8	5.269
Ernterückstände	3	-	4,0	1.184
Leguminosen	1	-	1,7	503
Weidegang	4	-	4,5	1.332
Methan-Konsumption	-2	-30,1	-	-692
Summe direkter Bodenemissionen	68	-30,1	169	24.340

Tabelle 8 (Fortsetzung)

<i>Quelle/Senke</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen</i>		<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
		<i>[Gg CH₄]</i>	<i>[Gg N₂O]</i>	
Auswaschung	25	-	29,9	8.850
Deposition	7	-	8,2	2.427
Summe indirekter Bodenemissionen	32	-	38,1	11.278
Gesamtsumme	100	-30,1	122,7	35.618

Quelle: Dämmgen (2006)

Wichtigste Emittenten im Bereich der „landwirtschaftlich genutzten Böden“ sind in Reihenfolge nach ihrem relativen Emissionsbeitrag der Mineraldüngereinsatz (30 %), die Auswaschungen und der Oberflächenabfluss von N-Spezies (25 %), der Wirtschaftsdüngereinsatz (17 %) und die Mineralisierung organischer Böden (15 %). Alle anderen Quellen kommen auf einen Gesamtbeitrag von 15 %. Die Methan-Konsumption als Senke liefert einen Beitrag von -2 % zur Senkung der Emissionslast.

3.2.4 Reisanbau, Brandrodung und Verbrennung von Ernterückständen

Da Reis nicht zu den in Deutschland kultivierten Pflanzen gehört, Brandrodung nicht praktiziert wird und die Verbrennung von Ernterückständen auf der Fläche in Deutschland bis auf wenige genehmigte Ausnahmen, die mengenmäßig irrelevant sind, untersagt ist, wird im Nationalen Inventarbericht über diese Bereiche nicht berichtet.

3.2.5 Zusammenfassung

Das Treibhausgaspotential der Emissionen aus der „Quellgruppe Landwirtschaft“ beträgt für das Jahr 1990 zusammen 78.947 Gg CO₂-Äquivalent (**Tabelle 9**). Der größere Anteil stammt aus den N₂O-Emissionen mit einem Treibhausgaspotenzial von 46.283 Gg CO₂-Äquivalent. Im Verhältnis zu den N₂O-Gesamtemissionen in Deutschland entspricht dies einem relativen Anteil von 57,2 %. Das Treibhausgaspotenzial der CH₄-Emissionen beträgt hingegen 32.664 Gg CO₂-Äquivalent und entspricht einem relativen Anteil an den gesamtdeutschen CH₄-Emissionen von 29,9 %.

Tabelle 9: Emissionen der „Quellgruppe Landwirtschaft“ im Jahr 1990 aufgeschlüsselt nach den Gasen Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O), ihrem Anteil an den gesamten deutschen Treibhausgas-Emissionen der jeweiligen Stoffgruppe im Jahr 1990 und ihrem Treibhausgaspotenzial.

<i>Gas</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen [Gg]</i>	<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
CH ₄	29,9	1.420	32.664
N ₂ O	57,2	156	46.283
Summe	-	-	78.947

Quelle: UBA (2006)

Im Jahr 2004 ist das Treibhausgaspotenzial der „Quellgruppe Landwirtschaft“ auf 64.438 Gg CO₂-Äquivalent gesunken (**Tabelle 10**). Der größere Anteil entfällt wieder-

um auf die N₂O-Emissionen, deren Treibhausgaspotenzial nunmehr 39.131 Gg CO₂-Äquivalent beträgt. Der relative Anteil am Gesamtausstoß von N₂O macht 63,8 % aus. Das Treibhausgaspotenzial von CH₄ liegt im Jahr 2004 bei 25.307 Gg CO₂-Äquivalent, was einem Anteil von 44,9 % der insgesamt emittierten Menge an CH₄ entspricht.

Tabelle 10: Emissionen der „Quellgruppe Landwirtschaft“ im Jahr 2004 aufgeschlüsselt nach den Gasen Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O), ihrem Anteil an den gesamten deutschen Treibhausgas-Emissionen der jeweiligen Stoffgruppe im Jahr 2004 und ihrem Treibhausgaspotenzial.

<i>Gas</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen [Gg]</i>	<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
CH ₄	44,9	1.100	25.307
N ₂ O	63,8	132	39.131
Summe	-	-	64.438

Quelle: UBA (2006)

3.3 Sonstige Emissionen der Landwirtschaft

Neben den Emissionen, welche direkt aus der „Quellgruppe Landwirtschaft“ stammen, entstehen weitere der Landwirtschaft anzurechnende Emissionen, die in der „Quellgruppe Landwirtschaft“ aber nicht erfasst sind. Dazu gehören Emissionen aus der Nutzung von Betriebsmitteln, über die im NIR im Abschnitt „Energie“ berichtet wird. Zusätzliche Emissionen entstehen durch die Nutzung von Grün- und Ackerland, die sich im NIR im Abschnitt „Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft“ wieder finden (UBA 2006).

3.3.1 Energieemissionen

In der Landwirtschaft werden gasförmige, flüssige und feste fossile Brennstoffe eingesetzt, wobei die flüssigen Brennstoffe überwiegen. Daneben wird auch ein zunehmender Anteil an Biomasse für energetische Zwecke genutzt. Bei der Verbrennung entstehen neben dem Hauptprodukt CO₂ auch geringe Mengen an CH₄ und N₂O als Nebenprodukte. Die Höhe der Emissionen ist dabei abhängig vom Brennstoff, der Technik, den Verbrennungsbedingungen und den betrachteten Bilanzgrenzen. So werden die CO₂-Emissionen bei der Nutzung von Biomasse als neutral angesehen, da nur so viel CO₂ entsteht, wie die Biomasse zuvor gebunden hat. Emissionen, die beispielsweise mit dem Anbau der Biomasse im Zusammenhang stehen, werden in anderen Bereichen erfasst.

Tabelle 11: Originäre Kohlendioxid- (CO₂), Methan- (CH₄) und Distickstoffoxid- (N₂O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale aus dem Bereich „Energieemissionen“ in der Landwirtschaft im Jahr 1990 nach Quellen und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.

<i>Quelle</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen</i>			<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
		<i>[Gg CO₂]</i>	<i>[Gg CH₄]</i>	<i>[Gg N₂O]</i>	
Alle Brennstoffe	100	10.917	8,4	0,1	11.150

Quelle: UBA (2006)

Für das Jahr 1990 liegt keine Aufschlüsselung der Daten in Bezug auf einzelne Brennstoffarten vor. Hier werden nur die Gesamtemissionen nach THG angegeben (**Tabelle 11**). In diesem Bereich entstehen hauptsächlich CO₂-Emissionen, während die anfallenden CH₄- und N₂O-Emissionen nahezu unbedeutend sind.

Tabelle 12: Originäre Kohlendioxid- (CO₂), Methan- (CH₄) und Distickstoffoxid- (N₂O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale aus dem Bereich „Energieemissionen“ in der Landwirtschaft im Jahr 2003 nach Quellen und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.

<i>Quelle</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen</i>			<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
		<i>[Gg CO₂]</i>	<i>[Gg CH₄]</i>	<i>[Gg N₂O]</i>	
Biomasse	0	-	1	0	22
Gasförmige Brennstoffe	13	848	-	0	849
Flüssige Brennstoffe	86	5.731	0	0	5.799
Feste Brennstoffe	1	76	0	0	78
Summe	100	6.655	1	0	6.748

Quelle: UBA (2006)

In **Tabelle 12** sind die Emissionen nach THG und Brennstoffen dargestellt. Im Gegensatz zu allen anderen Daten, wird hier auf den Datensatz von 2003 zurückgegriffen. Grund dafür ist die nach Energieträger differenzierte Darstellung der Emissionsmengen, die für den Datensatz des Jahres 2004⁶ nicht vorliegt. Der mengenmäßige Unterschied zwischen den Gesamtemissionen des Bereichs „Energieemissionen“ von 2003 (6.748 CO₂-Äquivalent) und 2004 (6.741 Gg CO₂-Äquivalent) ist mit 7 Gg CO₂-Äquivalent bzw. weniger als 1 ‰ vernachlässigbar gering.

3.3.2 Landnutzung und Landnutzungsänderung

Die landwirtschaftliche Nutzung von Böden hat vielfache Effekte auf die Freisetzung von THG-Emissionen. Die wirtschaftliche Nutzung von Flächen geht oftmals mit bestimmten Maßnahmen einher, welche zum einen die Bewirtschaftung teilweise überhaupt erst ermöglichen, zum anderen aber Einfluss auf die Bodenchemie nehmen. So wird durch die Entwässerung von Moor- und Grünlandflächen ein gesteigerter organischer Abbau verursacht, durch den vermehrt CO₂ freigesetzt wird. Andere qualitätserhaltende Maßnahmen wie der Eintrag von Kalk in den Boden führen ebenfalls durch chemische Umsetzungen zu CO₂-Emissionen. Weitere Emissionsänderungen ergeben sich aus der Umnutzung von bewirtschafteten Flächen. Die Umwandlung organischer Böden in Ackerland bzw. die Umstellung perennierender auf einjährige Kulturen und umgekehrt führt ebenfalls zu einer Veränderung der CO₂-Emissionen. Weitere CO₂- und N₂O-Emissionen entstehen bei der Umwandlung von Grünland, Brachland, Dauerkultur- und Waldflächen in Ackerland durch den Verlust oberirdischer Biomasse.

⁶ Im Datensatz von 2004 sind die Emissionen wie in dem Datensatz für 1990 (vgl. Tabelle 11) zwar aufgeschlüsselt nach unterschiedlichen THG, nicht aber nach unterschiedlichen Brennstoffen. Es gibt nur Angaben zu den Summen einzelner THG über alle Brennstoffe.

Daneben wirkt die landwirtschaftliche Nutzfläche aber auch als CO₂-Senke bzw. wird CO₂ durch Nutzungsumstellungen von Acker- in Grünland gebunden (Garcia-Oliva & Masera 2004, UBA 2006).

Tabelle 13: Originäre Methan- (CH₄) und Distickstoffoxid- (N₂O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale aus dem Bereich „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ im Jahr 1990 nach Quellen/Senken und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.

<i>Quelle/Senke</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen</i>		<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
		<i>[Gg N₂O]</i>	<i>[Gg CO₂]</i>	
Ackerland	59,2	1,2	26.534	26.892
Grünland	40,8	-	18.555	18.555
Summe	100	1,2	45.089	45.447

Quelle: UBA (2006)

Eine Zusammenstellung der genannten Emissionen aus dem Bereich „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ in absoluten Zahlen sowie dem relativen Emissionsbeitrag der Einzelquellen im Bereich für das Jahr 1990 findet sich in **Tabelle 13**. In dem dargestellten Datensatz wird allerdings nur zwischen Emissionen aus der Nutzung von Ackerland und Grünland unterschieden. Insgesamt entstanden dort 45.447 Gg CO₂-Äquivalent, die sich mit 18.55 Gg CO₂-Äquivalent zu 40,8 % auf die Grünlandbewirtschaftung und mit 26.892 Gg CO₂-Äquivalent zu 59,2 % auf den Ackerbau verteilen.

Tabelle 14: Originäre Methan- (CH₄) und Distickstoffoxid- (N₂O) Emissionen und deren Treibhausgaspotenziale aus dem Bereich „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ im Jahr 2004 nach Quellen/Senken und deren jeweilige Anteile an den Gesamtemissionen des Bereichs.

<i>Quelle/Senke</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen</i>		<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
		<i>[Gg N₂O]</i>	<i>[Gg CO₂]</i>	
Ackerbaulich genutzte Moore	48	-	20.264	20.264
Nutzungsänderungen mineralischer Böden	8	-	3.226	3.226
Kalkung	4	-	1.554	1.554
Fixierung oberirdischer Biomasse	0	-	-36	-36
Flächenumwandlung in Ackerland	1	1,4	-	403
Summe Ackerland	61	1,4	25.008	25.411
Entwässerung org. Grünlandböden	40	-	16.670	16.670
Umnutzung von Acker- in Grünland	-2	-	-998	-998
Verlust oberirdischer Biomasse	2	-	859	859
Summe Grünland	39	-	16.531	16.531
Gesamtsumme	100	1,4	41.539	41.942

Quelle: UBA (2006)

Die Emissionsdaten für das Jahr 2004 sind dagegen weitaus differenzierter (**Tabelle 14**). Dort finden sich alle beschriebenen Einzelemissionsquellen und –senken wieder. Die beiden größten Quellen bilden die Ackerbauliche Nutzung von Mooren mit 20.264 Gg CO₂-Äquivalent sowie die Entwässerung von Grünlandböden mit 16.670 Gg CO₂-Äquivalent. Alle weiteren Quellen und Senken spielen eine wesentlich geringere Rolle. Um eine bessere Vergleichbarkeit mit den Daten für 1990 zu gewährleisten, wurden für die Positionen, die dem Ackerland bzw. dem Grünland zuzuordnen sind, jeweils die Summe gebildet.

3.3.3 Zusammenfassung

In den beiden zusätzlich betrachteten Bereichen wird neben den bereits in der „Quellgruppe Landwirtschaft“ erfassten Treibhausgasen CH₄ und N₂O auch über CO₂-Emissionen berichtet. Diese machen fast den gesamten Anteil der hinzukommenden Emissionen aus.

Im Jahr 1990 beträgt das Treibhausgaspotenzial für die Bereiche „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ sowie „Energieemissionen“ 56.597 Gg CO₂-Äquivalent (**Tabelle 15**). Der mit Abstand größte Anteil entfällt auf CO₂-Emissionen, die ein Treibhausgaspotenzial von 56.006 Gg CO₂-Äquivalent ausmachen. Dies entspricht einem Anteil an den gesamtdeutschen CO₂-Emissionen von 5,4 %. Die Freisetzungen an CH₄ und N₂O fallen mit 194 Gg CO₂-Äquivalent bzw. 397 Gg CO₂-Äquivalent dagegen kaum ins Gewicht. Das spiegelt sich auch an ihrem Emissionsanteil an den Gesamtemissionen der Stoffgruppen mit 0,2 % beim CH₄ und 0,5 % beim N₂O wieder.

Tabelle 15: Sonstige zurechnungsfähige Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft im Jahr 1990 aus der Nutzung von Betriebsmitteln und der Nutzung von Grün- und Ackerland aufgeschlüsselt nach den Gasen Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O), ihren Anteilen an den gesamten deutschen Treibhausgas-Emissionen der jeweiligen Stoffgruppen, ihren Emissionshöhen und ihren Treibhausgaspotenzialen.

<i>Gas</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen [Gg]</i>	<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
CO ₂	5,4	56.006	56.006
CH ₄	0,2	8,4	194
N ₂ O	0,5	1,3	397
Summe	-	-	56.597

Quelle: UBA (2006)

Dasselbe gilt für die Daten des Jahres 2004 (**Tabelle 16**). Das Treibhausgaspotenzial aller THG in Summe beträgt 48.682 Gg CO₂-Äquivalent, wovon die CO₂-Emissionen mit 48.219 Gg CO₂-Äquivalent wesentlicher Bestandteil sind. Der Anteil an den nationalen Gesamtemissionen von CO₂ ändert sich mit 5,4 % nicht. Die CH₄-Emissionen mit nunmehr 31 Gg CO₂-Äquivalent und einem Anteil von 0,1 % bzw. die N₂O-Emissionen mit 433 Gg CO₂-Äquivalent und einem Anteil von 0,7 % sind weiterhin vergleichsweise unbedeutend.

Tabelle 16: Sonstige zurechnungsfähige Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft im Jahr 2004 aus der Nutzung von Betriebsmitteln und der Nutzung von Grün- und Ackerland aufgeschlüsselt nach den Gasen Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O), ihren Anteilen an den gesamten deutschen Treibhausgas-Emissionen der jeweiligen Stoffgruppen, ihren Emissionshöhen und ihren Treibhausgaspotenzialen.

<i>Gas</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen [Gg]</i>	<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
CO ₂	5,4	48.219	48.219
CH ₄	0,1	1,3	31
N ₂ O	0,7	1,4	433
Summe	-	-	48.682

Quelle: UBA (2006)

4 Ergebnisse

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Datengrundlage präsentiert wurde, wird diese in den nachfolgenden Abschnitten analysiert. Dabei werden zunächst die Gesamtemissionen nach THG sowie die einzelnen Bereiche hinsichtlich ihres Emissionsbeitrags untersucht, bevor in einem nächsten Schritt die Betrachtung auf die Einzelquellen und –senken erweitert wird und eine Zuordnung der Emissionsquellen auf die Produktionsbereiche Ackerbau und Tierproduktion erfolgt. Daran anknüpfend wird die Emissionsentwicklung im Zeitraum von 1990 bis 2004 näher beleuchtet, um unterschiedliche Zielbeiträge aufzudecken.

4.1 Emissionsbeitrag der Landwirtschaft

Tabelle 17: Summe aller zurechnungsfähiger Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft im Jahr 2004 aufgeschlüsselt nach den Gasen Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O), ihren Anteilen an den gesamten deutschen Treibhausgas-Emissionen der jeweiligen Stoffgruppen, ihren Emissionshöhen und ihren Treibhausgaspotenzialen.

<i>Gas</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen [Gg]</i>	<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
CO ₂	5,4	48.219	48.219
CH ₄	45,0	1.102	25.338
N ₂ O	64,3	133	39.457
Summe	-	-	113.014

Zählt man alle der Landwirtschaft zurechnungsfähigen THG-Emissionen zusammen, so trägt die Landwirtschaft im Jahr 2004 mit einem Treibhausgaspotenzial von 113.014 Gg CO₂-Äquivalent zu den Gesamtemissionen bei (**Tabelle 17**). In Bezug auf den Anteil der einzelnen THG bedeutet dies, dass 5,4 % aller CO₂-Emissionen landwirtschaftlichen Ursprungs sind. Bei den CH₄- und den N₂O-Emissionen stellt die Landwirtschaft mit 45,0 % bzw. 64,3 % den Hauptemittenten dar.

Tabelle 18: Summe aller zurechnungsfähiger Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft im Jahr 1990 aufgeschlüsselt nach den Gasen Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O), ihren Anteilen an den gesamten deutschen Treibhausgas-Emissionen der jeweiligen Stoffgruppen, ihren Emissionshöhen und ihren Treibhausgaspotenzialen.

<i>Gas</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Emissionen [Gg]</i>	<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
CO ₂	5,4	56.006	56.006
CH ₄	30,1	1.429	32.858
N ₂ O	57,7	158	46.680
Summe	-	-	135.544

Im Jahr 1990 betrug der Anteil an den CO₂-Emissionen ebenfalls 5,4 %. Dagegen lagen die jeweiligen Anteile beim CH₄ und N₂O mit 30,1 % bzw. 57,7 % deutlich unter den Werten von 2004 (**Tabelle 18**). Dennoch war die Landwirtschaft auch schon 1990 Hauptverursacher dieser Emissionen.

4.2 Emissionsbeitrag der einzelnen Bereiche

Tabelle 19: Kohlendioxid- (CO₂), Methan- (CH₄) und Distickstoffoxid- (N₂O) Emissionen der deutschen Landwirtschaft im Jahr 2004 und deren Treibhausgaspotenziale nach Bereichen.

<i>Treibhausgas</i>	<i>Anteil [%]</i>		<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
	<i>Einzel</i>	<i>Kumuliert</i>	
Landnutzung, -sänderung			
Summe N ₂ O	0,4	0,4	403
Summe CO ₂	36,8	37,1	41.539
Summe Gesamt	37,1		41.942
Landwirtschaftl. gen. Böden			
Summe CH ₄	-0,6	36,5	-692
Summe N ₂ O	32,1	68,6	36.310
Summe Gesamt	31,5		35.618
Tierische Verdauung			
Summe CH ₄	18,0	86,6	20.303
Summe Gesamt	18,0		20.303
Wirtschaftsd.-Management			
Summe CH ₄	5,0	91,6	5.696
Summe N ₂ O	2,4	94,0	2.714
Summe Gesamt	7,4		8.410
Energieemissionen			
Summe CO ₂	5,9	99,9	6.655
Summe CH ₄	0,0	100,0	29
Summe N ₂ O	0,0	100,0	64
Summe Gesamt	6,0		6.748
Gesamtemissionen			113.014

Quelle: Dämmgen (2006b), UBA (2006)

In **Tabelle 19** sind die Emissionsbeiträge der einzelnen Bereiche „tierische Verdauung“, „Wirtschaftsdünger-Management“, „landwirtschaftlich genutzte Böden“, „Energieemissionen“ sowie „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ differenziert nach Art und Höhe des Treibhausgaspotenzials ihrer Emissionen dargestellt. Die Reihenfolge der aufgelisteten Bereiche richtet sich dabei absteigend nach ihrem Anteil am Treibhausgaspotenzial der landwirtschaftlichen Emissionen.

Von der Gesamtemissionsmenge der Landwirtschaft entfallen 37,1 % auf den Bereich „Landnutzung und Landnutzungsänderung“. Es folgt „landwirtschaftlich genutzte Böden“ mit einem relativen Anteil von 31,5 %. Die Nutzung der Ressource Boden, repräsentiert durch diese beiden Bereiche, spielt hinsichtlich der Produktion von THG-Emissionen die bedeutsamste Rolle. Hier werden insgesamt 68,6 % aller landwirtschaftlichen Emissionen generiert. Mit deutlichem Abstand folgt der Bereich „tierische Verdauung“, dessen Emissionsanteil mit 18,0 % noch im zweistelligen Bereich liegt. Zu den weniger bedeutenden Bereichen zählt das „Wirtschaftsdünger-Management“, welches mit 7,4 % ungefähr denselben Stellenwert wie die Summe der „Energieemissionen“ mit 6,0 % hat.

4.3 Emissionsbeitrag der Einzelquellen und -senken

Insgesamt existieren in den vorgestellten Bereichen 33 Einzelquellen und –senken, die der Landwirtschaft zugerechnet werden können. Da diese sehr unterschiedliche Emissionsbeiträge generieren, wird in **Tabelle 20** eine Rangfolge nach dem Niveau ihres Treibhausgaspotenzials vorgenommen. Zusätzlich wird in Anlehnung an eine ABC-Analyse eine Kategorisierung der Quellen und Senken vorgenommen. Die Zuordnung zu den Kategorien erfolgt nach einem eigenen Ansatz mit folgenden Kriterien:

- Kategorie A: Quellen die mehr als 10.000 Gg CO₂-Äquivalent a⁻¹ emittieren.
- Kategorie B: Quellen die weniger als 10.000 Gg CO₂-Äquivalent a⁻¹, aber mehr als 1.000 Gg CO₂-Äquivalent a⁻¹ emittieren.
- Kategorie C: Quellen die weniger als 1.000 Gg CO₂-Äquivalent a⁻¹ emittieren.
- Kategorie D: Senken

Aufgrund der besseren Datenauflösung für den Bereich der „Energieemissionen“, wird in der **Tabelle 20** der Datensatz für das Jahr 2003 verwendet (vgl. Kap. 2.4). Alle anderen Daten stammen aus dem Jahr 2004.

Aus **Tabelle 20** geht hervor, dass nur vier A-Quellen mit 58,7 % den weitaus größten Emissionsanteil ausmachen. Die 11 B-Quellen emittieren 37,9 % des Treibhausgaspotenzials, während die 15 C-Quellen nur noch auf einen Anteil von 4,9 % kommen. Die landwirtschaftlichen Senken binden zusammen 1,5 % des Treibhausgaspotenzials und haben damit kaum nennenswerten Effekt.

Tabelle 20: Rangfolge der landwirtschaftlichen Einzelemissionsquellen und –senken aus den Bereichen „tierische Verdauung“ (TV), „Wirtschaftsdünger-Management“ (WdM), „landwirtschaftlich genutzte Böden“ (LB), „Energieemissionen“ (EE) sowie „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ (LN) gewichtet nach ihrem Emissionsbeitrag anhand des Treibhausgaspotenzials für das Jahr 2004.

<i>Quelle/Senke</i>	<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>	<i>Anteil [%]</i>		<i>Kategorie</i>
		<i>Einzel</i>	<i>Kumuliert</i>	
LN/Moore	20.264	17,9	17,9	A
TV/Rinder	18.791	16,6	34,6	A
LN/Entwässerung org. Grünlandböden	16.670	14,7	49,3	A
LB/Mineraldünger	10.626	9,4	58,7	A
LB/Auswaschungen	8.850	7,8	66,5	B
LB/Wirtschaftsdünger	5.950	5,3	71,8	B
EE/flüssige Brennstoffe*	5.799	5,1	76,9	B
LB/organische Böden	5.269	4,7	81,6	B
WdM/Rinder	5.220	4,6	86,2	B
LN/Nutzungsänderungen min. Böden	3.226	2,9	89,1	B
LB/Deposition	2.427	2,1	91,2	B
WdM/Schweine	2.056	1,8	93,0	B
LN/Kalkung	1.554	1,4	94,4	B
LB/Weidegang	1.332	1,2	95,6	B
LB/Ernterückstände	1.184	1,0	96,6	B
LN/Verlust oberirdischer Biomasse	859	0,8	97,4	C
EE/gasförmige Brennstoffe*	849	0,8	98,1	C
WdM/Geflügel	780	0,7	98,8	C
TV/Schweine	685	0,6	99,4	C
LB/Leguminosen	503	0,4	99,9	C
TV/Schafe	499	0,4	100,3	C
LN/Flächenumwandlung in Ackerland	403	0,4	100,7	C
TV/Pferde	308	0,3	101,0	C
WdM/Pferde	304	0,3	101,2	C
LB/Klärschlamm	169	0,1	101,4	C
EE/feste Brennstoffe*	78	0,1	101,4	C
WdM/Schafe	44	0,0	101,5	C
EE/Biomasse*	22	0,0	101,5	C
TV/Sonstige	20	0,0	101,5	C
WdM/Sonstige	7	0,0	101,5	C
LN/Fixierung oberirdischer Biomasse	-36	0,0	101,5	D
LB/CH ₄ -Konsumption	-692	-0,6	100,9	D
LB/Umnutzung Acker- in Grünland	-998	-0,9	100,0	D

* Daten für 2003

A > 10.000 Gg CO₂-Äquivalent a⁻¹

1.000 Gg CO₂-Äquivalent a⁻¹ < B < 10.000 Gg CO₂-Äquivalent a⁻¹

C < 1.000 Gg CO₂-Äquivalent a⁻¹

D = Senken

Quelle: Veränderte Darstellung nach Dämmgen (2006b), UBA (2006)

Betrachtet man die Kategorie der A-Quellen, so fällt auf, dass hier drei Themenkomplexe eine besondere Rolle spielen. Erstens gibt es bestimmte landwirtschaftliche Bodennutzungsformen, deren Bewirtschaftung überproportional viele Emissionen verursachen. So stellt die größte landwirtschaftliche Einzelemissionsquelle die ackerbauliche Nutzung von Mooren dar, die hingegen nur 4 % der gesamten ackerbaulichen Fläche ausmachen (UBA 2005). Auf Platz drei wird diese gefolgt von den Emissionen, die bei der Entwässerung von organischen Grünlandstandorten entstehen.

Die Emissionen aus der tierischen Verdauung von Rindern stellen die zweitgrößte landwirtschaftliche Emissionsquelle dar. Alle anderen Tierarten sind in dieser Hinsicht weitestgehend unbedeutend und finden sich erst im Bereich der C-Quellen wieder.

Das vierte Gebiet ist der in der Landwirtschaft verwendete Mineraldünger. Der Verlust von N-Verbindungen bei dessen Anwendung stellt die viertgrößte Einzelemissionsquelle dar.

In der B-Kategorie finden sich weitere Quellen, die dem Bereich des landwirtschaftlichen Eintrags von N-Verbindungen zufallen. Es sind dies indirekte Emissionen durch Auswaschungen und Oberflächenabfluss von N-Verbindungen, die sowohl mineralischen als auch organischen Ursprungs sind, auf Platz fünf. Des Weiteren sind dort Emissionen aus der Anwendung von Wirtschaftsdünger auf Platz sechs sowie Emissionen aus der N-Mineralisierung bei der Bewirtschaftung organischer Böden auf Platz acht.

Emissionen aus der Anwendung flüssiger Brennstoffe sind die ersten energiebedingten Emissionen, die sich in den B-Quellen auf Platz sieben wieder finden. Alle weiteren landwirtschaftlich genutzten Brennstoffe spielen als C-Quelle keine große Rolle.

In der Kategorie der B-Quellen finden sich ebenfalls erstmals Emissionen aus dem „Wirtschaftsdünger-Management“. Die wesentlichen Emittenten dieser Kategorie liegen auf Platz neun (Rinder) und Platz 12 (Schweine). Andere Tierarten spielen bezogen auf die Emissionen bei der Lagerung von Wirtschaftsdünger keine besondere Rolle und finden sich erst in den C-Quellen wieder. Alle weiteren B-Quellen entspringen der landwirtschaftlichen Flächennutzung. Auf Platz zehn finden sich CO₂-Emissionen, die infolge der Nutzungsänderungen mineralischer Böden in Ackerland oder der Umstellung von perennierender auf einjährige Kulturen bzw. umgekehrt entstehen. Des Weiteren finden sich auch hier wieder N-Einträge durch die atmosphärischen Depositionen von NH₃ und NO_x landwirtschaftlichen Ursprungs auf Platz 11, durch den Eintrag von Tierexkrementen beim Weidegang auf Platz 14 und die Einarbeitung von Pflanzenrückständen in den Boden auf Platz 15. Eine letzte B-Quelle stellt die Kalkung landwirtschaftlicher Flächen auf Platz 13 dar.

4.4 Emissionen nach Produktionsbereichen

In **Tabelle 21** wurden alle Emissionsquellen und –senken, die eindeutig auf die beiden landwirtschaftlichen Produktionsbereiche Ackerbau und Tierhaltung zuzuordnen sind, zusammengefasst. Da für die Einzelquelle „Deposition“ sowie für alle Arten von Energieemissionen auf Grundlage der vorliegenden Zahlen keine eindeutige Zuordnung möglich ist, werden diese aus den beiden Bereichen ausgeklammert und unter der Rubrik „Sonstige“ gesondert ausgewiesen.

Der größere Emissionsanteil entfällt demnach mit 50,6 % bzw. 57.130 Gg CO₂-Äquivalent auf den Ackerbau, 41,3 % bzw. 46.715 Gg CO₂-Äquivalent entstehen durch die Tierproduktion und 8,1 % bzw. 9.175 Gg CO₂-Äquivalent sind keinem der beiden Produktionsbereiche eindeutig zuzuordnen.

Tabelle 21: Zuordnung der landwirtschaftlichen Einzelquellen und –senken zu den Produktionsbereichen „Ackerbau“ und „Tierproduktion“.

<i>Quelle/Senke</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
<i>Ackerbau</i>		
LN/Moore		20.264
LB/Mineraldünger		10.626
LB/Auswaschungen		8.850
LB/Wirtschaftsdünger		5.950
LB/organische Böden		5.269
LN/Nutzungsänderungen min. Böden		3.226
LN/Kalkung		1.554
LB/Ernterückstände		1.184
LN/Verlust oberirdischer Biomasse		859
LB/Leguminosen		503
LN/Flächenumwandlung in Ackerland		403
LB/Klärschlamm		169
LN/Fixierung oberirdischer Biomasse		-36
LB/CH ₄ -Konsumption		-692
LB/Umnutzung Acker- in Grünland		-998
Summe	50,6	57.130
<i>Tierproduktion</i>		
TV/Rinder		18.791
LN/Entwässerung org. Grünlandböden		16.670
WdM/Rinder		5.220
WdM/Schweine		2.056
WdM/Geflügel		780
TV/Schweine		685
TV/Schafe		499
TV/Pferde		308
WdM/Pferde		304
WdM/Schafe		44
TV/Sonstige		20
WdM/Sonstige		7
Summe	41,3	46.715
<i>Sonstige</i>		
LB/Deposition		2.427
EE/flüssige Brennstoffe*		5.799
EE/gasförmige Brennstoffe*		849
EE/feste Brennstoffe*		78
EE/Biomasse*		22
Summe	8,1	9.175

* Daten für 2003

4.5 Entwicklung landwirtschaftlicher Gesamtemissionen

Die Bereiche, die in der „Quellgruppe Landwirtschaft“ dieser zugerechnet werden, setzen im Jahr 1990 zusammen Emissionen mit einem Treibhausgaspotenzial von 78.947 Gg CO₂-Äquivalent frei (**Tabelle 22**). Dies entspricht einem Anteil von 6,4 % an den gesamten THG-Emissionen in Deutschland im selben Jahr. Die zusätzlich der Landwirtschaft anrechnungsfähigen Emissionen der Bereiche „Energieemissionen“ sowie „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ emittieren im Jahr 1990 Emissionen in Höhe von 56.597 Gg CO₂-Äquivalent. In Bezug auf die Gesamtemissionen entspricht dies einem Anteil von 4,6 %. Insgesamt ist die Landwirtschaft im Jahr 1990 mit 11,0 % an den deutschen THG-Emissionen beteiligt, was einem Treibhausgaspotenzial von 135.544 Gg CO₂-Äquivalent entspricht.

Im Jahr 2004 beträgt das Treibhausgaspotenzial der Landwirtschaft 113.014 Gg CO₂-Äquivalent. Der Anteil der Landwirtschaft an den Gesamtemissionen in Deutschland beträgt 11,1 %. Davon werden ihr 6,3 % im Rahmen der „Quellgruppe Landwirtschaft“ zugerechnet, was einem Treibhausgaspotenzial von 64.331 Gg CO₂-Äquivalent entspricht. Die zusätzlich anrechnungsfähigen Emissionen machen einen Anteil von 4,8 % aus. Deren Treibhausgaspotenzial beträgt 48.682 Gg CO₂-Äquivalent.

Tabelle 22: Treibhausgaspotenziale der Emissionen der „Quellgruppe Landwirtschaft“ („Angerechnete“) sowie der sonstigen anrechnungsfähigen Emissionen in der Landwirtschaft aus den Bereichen „Energieemissionen“ sowie „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ („Anrechnungsfähige“) für die Jahre 1990 und 2004 sowie deren jeweilige Anteile bezogen auf den Gesamtausstoß aller Treibhausgase (THG) in Deutschland.

<i>THG</i>	<i>Anteil [%]</i>	<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
<i>1990</i>		
Angerechnete	6,4	78.947
Anrechnungsfähige	4,6	56.597
Gesamt	11,0	135.544
<i>2004</i>		
Angerechnete	6,3	64.331
Anrechnungsfähige	4,8	48.682
Gesamt	11,1	113.014

Quelle: Veränderte Darstellung nach UBA (2006)

Im Zeitraum von 1990 bis 2004 konnte der Emissionsbeitrag der Landwirtschaft bei Betrachtung über alle in **Tabelle 23** aufgeführten Bereiche insgesamt um 22.531 Gg CO₂-Äquivalent gesenkt werden. Dies entspricht einer Minderungsleistung um 16,6 % und liegt damit unterhalb der durchschnittlich erbrachten Minderungsleistung in Deutschland, die im selben Zeitraum 17,7 % beträgt (vgl. Kap. 3.1). Aus diesem Grund erhöht sich auch der relative Anteil aller der Landwirtschaft zurechnungsfähigen Emissionen von 1990 auf 2004 um 0,1 % auf 11,1 % (**Tabelle 22**).

Betrachtet man dagegen nur die Bereiche „tierische Verdauung“, „Wirtschaftsdünger-Management“ und „landwirtschaftlich genutzte Böden“, die im NIR zur „Quellgruppe Landwirtschaft“ gehören, beträgt die Minderung im Betrachtungszeitraum 14.616 Gg CO₂-Äquivalent (**Tabelle 23**) bzw. 18,5 %. Da dies oberhalb der durchschnittlichen Minderungsleistung in Deutschland liegt, sinkt der Anteil der „Quellgruppe Landwirtschaft“ am Emissionsaufkommen um 0,1 % auf 6,3 % (**Tabelle 22**). Die zusätzlich anrechnungsfähigen Emissionen in den Bereichen „Energieemissionen“ sowie „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ sind dagegen im selben Zeitraum zusammen nur um 14,0 % bzw. 7.915 Gg CO₂-Äquivalent gesunken (**Tabelle 23**). Dadurch steigt ihr relativer Anteil von 1990 bis 2004 um 0,2 % auf 4,8 % an (**Tabelle 22**).

Tabelle 23: Emissionsentwicklung von 1990 bis 2004 für die Gase CO₂, CH₄ und N₂O in den Bereichen „tierische Verdauung“ (TV), „Wirtschaftsdünger-Management“ (WdM), „landwirtschaftlich genutzte Böden“ (LB), „Energieemissionen“ (EE) sowie „Landnutzung und Landnutzungsänderung“ (LN).

<i>Bereich</i>	<i>Emissionen 1990</i> <i>[Gg CO₂-Äquiv.]</i>	<i>Emissionen 2004</i> <i>[Gg CO₂-Äquiv.]</i>	<i>Delta</i> <i>[Gg CO₂-Äquiv.]</i>	<i>Delta</i> <i>[%]</i>
TV Summe (CH ₄)	26.750	20.303	6.447	24,1
WdM CH ₄	6.650	5.696	954	14,3
WdM N ₂ O	3.935	2.714	1.221	31,0
WdM Summe	10.585	8.410	2.175	20,5
LB CH ₄	736	692	44	5,9
LB N ₂ O	42.348	36.310	6.038	14,3
LB Summe	41.612	35.618	5.994	14,4
Teilsumme	78.947	64.331	14.616	18,5
LN CO ₂	45.089	41.539	3.550	7,9
LN N ₂ O	358	403	44	12,4
LN Summe	45.448	41.942	3.506	7,0
EE CO ₂	10.917	6.680	4.237	38,8
EE CH ₄	194	31	163	84,1
EE N ₂ O	39	30	9	22,2
EE Summe	11.150	6.741	4.409	39,5
Teilsumme	56.597	48.682	7.915	14,0
Gesamtsumme	135.544	113.014	22.531	16,6

Quelle: UBA (2006)

Die Minderungsverpflichtung Deutschlands zur Senkung von THG-Emissionen in Höhe von 21% bis 2012 wird in keinem der dargestellten Szenarien von der Landwirtschaft erreicht.

Ausgehend von den Daten der **Tabelle 23** fällt auf, dass die erbrachten Emissionsreduktionen in den einzelnen Bereichen relativ weit auseinander liegen. Im Folgenden werden die Gründe für die unterschiedlichen Minderungsleistungen näher betrachtet.

4.5.1 Tierische Verdauung

Die Emissionen in dem Bereich „tierische Verdauung“ sind mit 24,1 % im Zeitraum von 1990 bis 2004 um 6.447 Gg CO₂-Äquivalent gesunken. Die dort entstehenden CH₄-Emissionen werden vorwiegend durch die Haltung von Wiederkäuern verursacht, die 2004 einen Anteil an den Emissionen aus der tierischen Verdauung von 92,6 % ausmachen (**Tabelle 4**). Aus diesem Grund ist die Reduktion auch vorwiegend auf die rückläufigen Bestände zurückzuführen. Diese haben sich von 19.488.000 Tieren im Jahr 1990 (UBA & Statistisches Bundesamt 2003) auf 13.612.400 Tiere im Jahr 2003 (Statistisches Bundesamt 2004) verringert, was einem Rückgang von 30 % entspricht.

4.5.2 Wirtschaftsdünger-Management

Der bereits erwähnte Rückgang an Wiederkäuern stellt auch im „Wirtschaftsdünger-Management“ die Hauptursache für den Rückgang der Emissionen um 20,5 % dar. Auffällig an den Daten in **Tabelle 23** ist, dass die einzelnen Emissionsminderungen der jeweiligen Gase CH₄ und N₂O mit 14,3 % bzw. 31,0 % recht unterschiedlich ausfallen. Dies lässt sich jedoch mit den jeweils unterschiedlichen spezifischen Emissionsbeiträgen einzelner Tierarten sowie den ungleichmäßigen Veränderungen der Viehbestände erklären (Dämmgen 2004, UBA & Statistisches Bundesamt 2003, Statistisches Bundesamt 2004). Darüber hinaus haben eine Vielzahl weiterer Begleitfaktoren wie Tierleistung, Ernährung, Aufenthaltsräume, verbrachte Zeiten, artspezifisches Verhalten beim Absetzen von Kot und Harn, Stalltyp, Stroheinsatz, Lagerungstyp und -dauer, Ausbringungsart, -ort und -zeitpunkt sowie die Einarbeitung einen Einfluss auf die Höhe der anfallenden Emissionen (Dämmgen 2004). Insgesamt fielen die Emissionen von 1990 bis 2004 um 2.175 Gg CO₂-Äquivalent, wobei der Beitrag beider Gase gemessen am Treibhausgaspotenzial in etwa gleich groß ist.

4.5.3 Landwirtschaftlich genutzte Böden

Im Bereich „landwirtschaftlich genutzte Böden“ ist im Zeitraum von 1990 bis 2004 ein Emissionsrückgang um insgesamt 14,4 % zu verzeichnen. Dies entspricht einer Menge von 5.994 Gg CO₂-Äquivalent, die fast ausschließlich aus der Verminderung von N₂O-Emissionen resultieren. Die Reduzierung ist überwiegend das Ergebnis der Verringerung des Eintrages von N-Verbindungen. Geht man davon aus, dass der Mineraldüngereinsatz mit dem Inlandsabsatz korreliert, dann ist ein leicht rückläufiger Einsatz von Mineraldünger als eine Ursache zu verzeichnen (Statistisches Bundesamt 2003). Hauptgrund dürfte aber der starke Rückgang der Wirtschaftsdüngermengen (KTBL 2004) gekoppelt an die insgesamt sinkenden Tierbestände (UBA & Statistisches Bundesamt 2003) sein. Der größte Teil des Rückgangs der Tierbestände ist auf die gravierenden Umbrüche im Zusammenhang mit der Wiedervereinigung zurückzuführen, so dass ein großer Teil der Minderungen mit diesem einmaligen Ereignis in Verbindung stehen. Der danach zu verzeichnende allgemeine Trend beim Rückgang der Tierzahlen spielt eine wesentlich geringere Rolle. Der Boden als Emissionssenke für CH₄ spielt für die Gesamtemissionen des Bereichs „landwirtschaftlich genutzte Böden“ nur eine unterge-

ordnete Rolle. Die Methankonsumption hat von 1990 bis 2004 um 44 Gg CO₂-Äquivalent abgenommen, was einem Rückgang von 5,9 % entspricht.

4.5.4 Energieemissionen

Brennstoffe werden in der Landwirtschaft hauptsächlich für den Einsatz von Maschinen sowie der Beheizung von landwirtschaftlichen Gebäuden, Getreidetrocknungen und Gewächshäusern genutzt. Je nach THG haben die daraus resultierenden Emissionen mit einem Rückgang von 22,2-84,1 % im Zeitraum von 1990 bis 2004 stark abgenommen. Die Höhe der Einsparungen beträgt 4.409 Gg CO₂-Äquivalent, wobei der weitaus größte Teil mit 4.237 Gg CO₂-Äquivalent auf die Verminderung von CO₂-Emissionen entfällt. Die absoluten Emissionsminderungen im Bereich von CH₄ und N₂O fallen dagegen kaum ins Gewicht. Ursache für diesen Rückgang ist nach **Tabelle 12** ein stark verminderter Einsatz von Festbrennstoffen, der zum Teil auf einen Wechsel zu emissionsärmeren gasförmigen Brennstoffen und den Einsatz von Biomasse zurückzuführen sein dürfte. Hinzu kommt ein Emissionsrückgang um 29 % aus dem Gebrauch flüssiger Brennstoffe, der mit einem Rückgang der Schlepperbestände um 37 % von 1990 bis 2005 (BMELV 2006) einhergeht. Eine höhere Energieeffizienz durch bessere Technik sowie energiesparendere Bewirtschaftungsverfahren liegen als weitere Ursachen nahe.

4.5.5 Landnutzung und Landnutzungsänderung

Der Rückgang der CO₂-Emissionen aus der Acker- und Grünlandbewirtschaftung trägt mit 3.148 Gg CO₂-Äquivalent ebenfalls stark zur Emissionsminderung bei. Da im NIR (UBA 2006) für diese Emissionen für das Jahr 1990 statt einer Aufgliederung in einzelne Quellen nur die jeweiligen Gesamtsummen genannt werden, lassen sich die Ursachen für den Rückgang bezogen auf die genannten Einzelquellen der beiden Bereiche daraus nicht ableiten.

5 Diskussion

Laut des vorliegenden Zahlenmaterials sind in den betreffenden Bereichen, die in dieser Arbeit dem Sektor Landwirtschaft zugeordnet wurden, 16,4 % der THG-Emissionen im Zeitraum von 1990 bis 2004 vermindert worden. Die Gesamtemissionen Deutschlands sind im gleichen Zeitraum um 17,7 % gesunken, so dass die Emissionsreduktion in der Landwirtschaft um 1,3 % unter dem Durchschnitt liegt. Geht man davon aus, dass die von Deutschland angestrebte Emissionsminderung in Höhe von 21 % bis zum Jahr 2012 von allen Sektoren mit gleichem Zielbeitrag erreicht werden sollte, müsste die Landwirtschaft zur Zielerreichung ihre Emissionen um weitere 5,6 % bzw. ca. 7.500 Gg CO₂-Äquivalent vermindern. Beschränkt man dagegen die Betrachtung auf die Bereiche, die im Nationalen Inventar der „Quellgruppe Landwirtschaft“ zugerechnet werden („tierische Verdauung“, „Wirtschaftsdünger-Management“ und „landwirtschaftlich genutzte Böden“ ohne die Emissionen aus „Landnutzung und Landnutzungsände-

rung“ sowie den „Energieemissionen“), dann liegt die Emissionsreduktion von 18,5 % über dem Durchschnitt, und es würden nur noch ca. 3.300 Gg CO₂-Äquivalent fehlen, um eine Verminderung um 21 % herbeizuführen. Aus dem Vergleich dieser beiden Zielbeiträge wird aber auch das Problem einer solchen Betrachtung deutlich: Das Ergebnis hängt entscheidend von den gewählten Systemgrenzen ab. Werden diese noch ausgeweitet, um Emissionen aus Vorketten der landwirtschaftlichen Produktion mit einzubeziehen, beispielsweise für die Produktion von Mineraldünger, Kraftstoffen, Pflanzenschutzmitteln, Saatgutaufbereitung etc., dann würde sich der Anteil der mit der Landwirtschaft im Zusammenhang stehenden Emissionen weiter erhöhen. Darüber hinaus würde sich wahrscheinlich der Grad der Emissionsreduktion nochmals verändern.

Des Weiteren spielt die Genauigkeit der verwendeten Daten, die zum Teil auf Expertenschätzungen, Hochrechnungen und Emissionsfaktoren mit Unsicherheiten beruhen (Jungkunst et al. 2006), eine wichtige Rolle für die Ermittlung der Emissionshöhe. So unterscheidet sich zum Beispiel der verwendete Emissionsfaktor für die Berechnung der CH₄-Emissionen aus dem „Wirtschaftsdünger-Management“ für das Nationale Inventar 2005 wesentlich von dem, der im Nationalen Inventar 2006 zur Anwendung gekommen ist. Dies hatte zur Folge, dass die absoluten Werte im Nationalen Inventar 2006 nur noch rund ein Viertel der berichteten Emissionen des Inventars des Vorjahres ausmachen (Dämmgen 2006). Da auf Grundlage der verwendeten Methodik jedes Jahr eine Relativierung der absoluten Datenlage in Form einer Rückrechnung der Daten bis 1990 stattfindet, ist jedoch die Unsicherheit bezüglich der relativen Emissionsänderungen als gering anzunehmen.

Aus den Daten der historischen Emissionsentwicklung lässt sich schließen, dass die bereits realisierten Emissionsminderungen vorwiegend auf strukturelle Veränderungen innerhalb der Landwirtschaft zurückzuführen sind. Dabei haben einzelne Ursachen aber sehr unterschiedliche Auswirkungen auf die Höhe der erzielten Emissionsminderungen sowie auf die davon betroffenen Bereiche. Die strukturell bedingte Abnahme der Schlepperbestände wirkt sich z.B. einzig auf die Verringerung der Emissionen aus der Anwendung flüssiger Brennstoffe im Bereich der „Energieemissionen“ aus. Der Rückgang der Tierbestände hat dagegen weit reichende Konsequenzen auf mehrere Bereiche. So vermindern sich als direkte Folge die Emissionen aus den Bereichen „tierische Verdauung“ und „Wirtschaftsdünger-Management“. Darüber hinaus sinken auch die N₂O-Emissionen aus dem Bereich „landwirtschaftlich genutzte Böden“ auf Grund der geringeren N-Einträge sowie vermutlich wegen der gestiegenen Erträge. Diese relativ einfachen Wirkungszusammenhänge lassen sich anhand der präsentierten Daten gut ableiten. Für tiefer gehende Analysen ist der Auflösungsgrad der Daten allerdings nicht ausreichend und es müssten weitere Faktoren wie z.B. die Ertragsentwicklung mit einbezogen werden.

Die durch die Analyse vorgenommene Kategorisierung und Sortierung der Quellen nach Emissionshöhe zeigt die sehr unterschiedliche Bedeutung einzelner Quellen für die landwirtschaftlichen Emissionen auf. Dabei prägt natürlich die Auswahl und Gruppenbildung entscheidend die Rangfolge der betrachteten Quellen. Aus der hier gewählten

Gruppenbildung, die sich weitgehend an den genannten Einzelquellen im Nationalen Inventar orientiert, wird aber deutlich, wie der Emissionsbeitrag einzelner landwirtschaftlicher Quellen zu beurteilen ist. Die vorgeschlagene Kategorisierung nach Emissionsmenge gibt Anhaltspunkte, um einen ersten Überblick zur Relevanz einer Quelle zu bekommen. Werden an dieser Stelle andere Methoden zur Bildung der Kategorien gewählt, hat dies natürlich entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis. Trotz der genannten Möglichkeiten zur unterschiedlichen Datenauslegung wird mit der gewählten Methodik ein Weg aufgezeigt, die Relevanz einzelner Quellen zum Emissionsaufkommen in der Landwirtschaft zu bewerten.

Wie in zahlreichen überregionalen Studien gezeigt (Smith et al. 2001, Schulze et al. 2002, Lal 2004, Weersink et al. 2005) soll die dargestellte Datenanalyse als Grundlage zur Erschließung von zukünftigen THG-Reduktionspotenzialen für die deutsche Landwirtschaft dienen. Eine weitergehende, detaillierte Betrachtung erfordert tiefgreifende Analysen, in denen die Wirkungszusammenhänge zwischen den Emissionen einer Einzelquelle und deren Ursachen aufgezeigt werden. Daraus ist abzuleiten, welche Parameter einen entscheidenden Einfluss auf die Emissionsentwicklung haben, und mit Hilfe welcher Strategien - struktureller, technischer und/oder organisatorischer Art - diese vermindert werden können. So stellen beispielsweise ausgehend von der durchgeführten Datenanalyse landwirtschaftlich genutzte Moore die größte landwirtschaftliche Einzel-emissionsquelle dar. Da der Ausstoß an THG-Emissionen von einer Vielzahl von Faktoren wie zum Beispiel dem Grundwasserpegel, der Torfmächtigkeit, der Torfart, der Temperatur und dem Niederschlag sowie dem Bewirtschaftungsverfahren abhängt, müssen zunächst die anthropogenen Einflussmöglichkeiten bestimmt werden. Darauf aufbauend können dann Strategien entwickelt werden, mit deren Hilfe Emissionsminderungen umgesetzt werden können, wobei etwaige Rückkopplungen auf andere Einzel-emissionsquellen zu beachten sind. Außerdem ist bei diesem Beispiel zu berücksichtigen, dass naturbelassene Moorflächen durch natürliche Prozesse ebenfalls THG emittieren, was bilanziell zu berücksichtigen ist. Eine monetäre Bewertung der so entwickelten Strategien kann letztlich darüber Auskunft geben, in wie fern die Realisierung solcher Maßnahmen volkswirtschaftlich sinnvoll ist (Garcia-Quinjano et al. 2005). Mit der vorliegenden Studie werden Möglichkeiten zur Minderung klimarelevanter Gasemissionen aus der Landwirtschaft aufgezeigt und Lösungsansätze zur Erfüllung der Vorgaben des Kioto-Protokolls gegeben.

II. Teil:

Minderungspotenziale durch die energetische Nutzung von Biomasse

Zusammenfassung

Die Nutzung von vorhandenen landwirtschaftlichen Biomassen zur Erzeugung von Energie kann erhebliche Beiträge zur Minderung von Treibhausgas-Emissionen liefern. Die Höhe der realisierbaren Reduktionen hängt dabei allerdings maßgeblich von den verwendeten Biomasse-Nutzungspfaden ab. Grundsätzlich gibt es eine Vielzahl verschiedener Verfahren, um aus Biomasse Energie zu erzeugen. Diese kann sowohl in Form von Primärenergieträgern (gasförmiger, fester oder flüssiger Art) oder als Sekundärenergieträger in Form von Strom und Wärme zur Verfügung gestellt werden. Kombiniert man die zur Verfügung stehenden Biomassepotenziale mit den Nutzungspfaden, die dafür technisch geeignet sind und unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes maximale Treibhausgasminderungen erzielen, dann lässt sich auf Grundlage der in dieser Arbeit aufgezeigten vereinfachten Berechnungen ein Minderungspotenzial von bis zu 50.341 Gg CO₂-Äquivalent a⁻¹ ableiten. Damit könnten 44,5 % der primären landwirtschaftlichen Treibhausgas-Emissionen kompensiert werden. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Schwerpunkte zur Förderung von Biomassekonversionsverfahren an ihrem Beitrag zum Klimaschutz ausgerichtet werden.

1 Einleitung

Die „Quellgruppe Landwirtschaft“ ist im Jahr 2004 mit 6,3 % bzw. 64.331 Gg CO₂-Äquivalent an den nationalen THG-Emissionen beteiligt gewesen und ist damit ein bedeutender Emittent. Rechnet man andere Bereiche, die ebenfalls der Landwirtschaft primär zugerechnet werden können, hinzu, erhöht sich dieser Anteil auf 11,1 % bzw. 113.014 Gg CO₂-Äquivalent (Wegener et al. 2006). Dies wirft die Frage auf, ob die Landwirtschaft über Möglichkeiten verfügt, Emissionen zu vermeiden und wie hoch ein solches Potenzial sein kann. Im Folgenden soll untersucht werden, welche Möglichkeit zur Produktion von Energie aus Biomasse innerhalb der Landwirtschaft bestehen und zu welchen Emissionsminderungen der Einsatz der Biomasse führen kann.

Dazu werden zwei verschiedene Biomassepotenziale für Deutschland aus unterschiedlichen Quellen herangezogen. Die dort getroffenen Aussagen werden als Grundlage für die Untersuchung genutzt. In einem weiteren Schritt werden die verschiedenen Verfahren zur energetischen Nutzung von Biomasse im Hinblick auf ihr THG-Minderungspotenzial analysiert und ihre Anforderungen an die Eigenschaften der Inputstoffe dargestellt. Im Sinne der Maximierung von THG-Minderungen werden anschließend die Verfahrenswege mit den höchsten THG-Minderungsvermögen mit den jeweils dafür in Frage kommenden Inputstoffen gepaart, um daraus den maximalen THG-Minderungsbeitrag aus der energetischen Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse abzuleiten. Das so berechnete THG-Minderungspotenzial wird anschließend ins Verhältnis zum Emissionsbeitrag der Landwirtschaft gesetzt.

2 Material und Methoden

2.1 Biomasseanfall in der Landwirtschaft

In Deutschland steht nach einer Publikation der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) insgesamt ein Biomassepotenzial von 671 PJ a⁻¹ zur Vergärung in Biogasanlagen (BGA) zur Verfügung (**Abbildung 1**). Davon entstammen ca. 85 % aus der Landwirtschaft. Im Einzelnen handelt es sich dabei um „Tierische Exkremente und Einstreu“ (96,5 PJ a⁻¹), „Ernterückstände aus der Landwirtschaft“ (13,7 PJ a⁻¹), „Landschaftspflegematerial“ (12 PJ a⁻¹), „Summe Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle“ (254 PJ a⁻¹) sowie „Energiepflanzen auf 2 Mio. ha“ (236 PJ a⁻¹). Aufsummiert entspricht dies einem Energiegehalt von 612,2 PJ a⁻¹ (FNR 2005a).

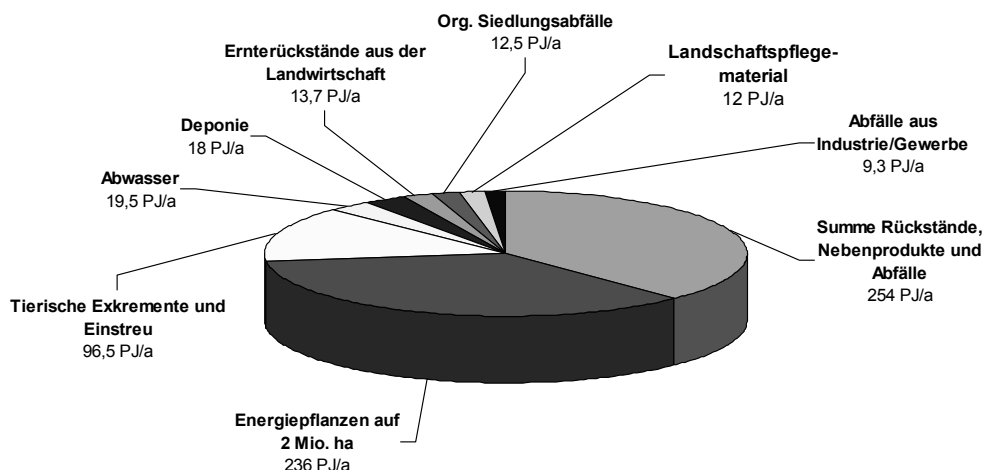


Abbildung 1: Nutzbares Energiepotential an Bio-, Klär- und Deponiegas in Deutschland, aufgeschlüsselt nach Herkunft der zur Verfügung stehenden technisch nutzbaren Biomassekapazitäten. Quelle: FNR (2005a).

Auf etwas andere Ergebnisse kommt eine Studie zu den vorhandenen Biomassepotenzialen des Instituts für Energetik und Umwelt (IE). Im Gegensatz zu der FNR Publikation werden hier neben den Energieausbeuten für den Verwendungszweck Biogas auch die Energieausbeuten bei alternativer Nutzung als biogener Festbrennstoff angegeben (Tabelle 24). So bringt z.B. „Gras aus Dauergrünland“, welches bei der Nutzung als Biogassubstrat ein Energieträgerpotenzial von 19 PJ a^{-1} besitzt, bei der Verwendung als Festbrennstoff ein Energieträgerpotenzial von 46 PJ a^{-1} . Weitere Inputstoffe, wie beispielsweise Stroh, können aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften in BGA nicht verwertet werden und stehen somit nur der Nutzung als Festbrennstoff zur Verfügung. Für andere Inputstoffe gilt dasselbe mit der Einschränkung, dass diese nur für die Vergärung geeignet erscheinen. In der Kategorie „Energiepflanzen“ beschränkt sich die Studie auf die „freien“ Flächen, die zur Zeit keiner Konkurrenznutzung durch andere Energiepflanzen (z.B. Raps) unterliegen. Das zur Verfügung stehende Flächenpotenzial wird mit 0,5 Mio. ha angegeben (IE 2006).

Tabelle 24: Übersicht der landwirtschaftlichen Biomassepotenziale in Deutschland, getrennt nach den Verwertungsrichtungen „biogene Festbrennstoffe“ sowie „Biogassubstrate“.

Inputstoffe	Energieausbeute bei Verwertung als...	
	biogener Festbrennstoff [PJ a ⁻¹]	Biogassubstrat [PJ a ⁻¹]
Stroh	130	Nicht relevant
Gras aus Dauergrünland	46*	19*
Landschaftspflegematerial	17*	12*
Exkremente und Einstreu	Nicht relevant	96
Ernterückstände	Nicht relevant	18
Energiepflanzen (0,5 Mio. ha)	101*	86*
Gesamtsumme	max. 294 (min. 130)	max. 231 (min. 114)

*Konkurrenznutzung möglich

Quelle: IE (2006)

Die Studie des IE kommt zu dem Ergebnis, dass die Energieausbeute aus dem landwirtschaftlichen Biomassepotenzial durch die alleinige Verwertung als Festbrennstoff maximal 294 PJ a^{-1} beträgt. Schlägt man die Bereiche, in denen eine Konkurrenznutzung möglich wäre, komplett auf die Verwertungsrichtung Biogas, dann bleibt bei den Festbrennstoffen eine Energieausbeute von mindestens 130 PJ a^{-1} übrig. Umgekehrt kann durch die alleinige Biogasnutzung maximal eine Energieausbeute von $259,6 \text{ PJ a}^{-1}$ zur Verfügung gestellt werden, während bei unterstellter Konkurrenznutzung durch Festbrennstoffe mindestens noch eine Energieausbeute in Höhe von 114 PJ a^{-1} durch die Erzeugung von Biogas möglich wäre.

Vergleicht man die beiden Biomassepotenziale von FNR und IE miteinander, so lässt sich folgendes feststellen:

- Die geschätzten Biomassepotenziale für die Kategorie „Landschaftspflegematerial“ sind mit 12 PJ a^{-1} in beiden Quellen identisch.
- Die geschätzten Biomassepotenziale für die Kategorie „Tierische Exkremente und Einstreu“ sind mit $96,5 \text{ PJ a}^{-1}$ (FNR) bzw. 96 PJ a^{-1} (IE) ebenfalls quasi identisch.
- Bei den geschätzten Biomassepotenzialen für die Kategorie „Ernterückstände aus der Landwirtschaft“ ergeben sich mit $13,7 \text{ PJ a}^{-1}$ (FNR) bzw. 18 PJ a^{-1} (IE) größere Unterschiede.
- Bei den geschätzten Biomassepotenzialen für „Energiepflanzen“ in der Verwertungsschiene Biogas ergeben sich aufgrund der Flächenannahme (FNR: 2 Mio. ha; IE: 0,5 Mio. ha) mit 236 PJ a^{-1} (FNR) bzw. 86 PJ a^{-1} (IE) große Unterschiede hinsichtlich der absoluten Potenziale, aber auch im Hinblick auf die spezifischen Energieerträge auf der Fläche (FNR: 118 GJ ha^{-1} ; IE: 172 GJ ha^{-1}).
- Die Kategorien „Stroh“ (130 PJ a^{-1}) und „Gras aus Dauergrünland“ (46 PJ a^{-1} bei Festbrennstoffnutzung, 12 PJ a^{-1} bei Biogasnutzung) aus der Studie der IE Leipzig tauchen in den Energiepotenzialen der FNR nicht auf. Stattdessen gibt es die Kategorie „Summe Rückstände und Nebenprodukte und Abfälle“ (254 PJ a^{-1}). Die Energiepotenziale dieser Kategorien weichen erheblich voneinander ab.
- Die Angaben zum maximalen Potenzial zur Erzeugung von Biogas aus landwirtschaftlicher Biomasse weichen mit $612,2 \text{ PJ a}^{-1}$ (FNR) bzw. $259,6 \text{ PJ a}^{-1}$ (IE) erheblich voneinander ab.

Für die nachfolgende Untersuchung werden die Kategorien, die in beiden Quellen genannt werden, jeweils mit dem kleineren Energiepotenzial herangezogen. Ausnahme bildet die Kategorie „Energiepflanzen“, wo auf das größere Flächenpotenzial (2 Mio. ha) und damit auch auf das höhere Energiepotenzial (236 PJ a^{-1}) zurückgegriffen wird. Grund dafür ist, dass die Betrachtung nicht auf die zurzeit freie Fläche beschränkt wird, sondern dass vielmehr das gesamte Flächenpotenzial für den

Energiepflanzenanbau zur Minderung von THG-Emissionen mit einbezogen werden soll. Zur Bestimmung der Energieausbeute der Kategorie „Energiepflanzen“ zur Festbrennstoffnutzung wird das Energieausbeuteverhältnis zwischen den Verwertungsschienen „biogener Festbrennstoff“ und „Biogassubstrat“ aus **Tabelle 24** herangezogen. Die Kategorie „Summe Rückstände und Nebenprodukte und Abfälle“ bleibt unberücksichtigt, dafür werden die Kategorien „Stroh“ und „Gras aus Dauergrünland“ gewählt. Daraus ergeben sich die in **Tabelle 25** dargestellten Biomassepotenziale für die Untersuchung.

Tabelle 25: Für die Untersuchung gewählte Biomassepotenziale in Deutschland, getrennt nach den Verwertungsrichtungen „biogene Festbrennstoffe“ sowie „Biogassubstrate“.

<i>Inputstoffe</i>	<i>Energieausbeute bei Verwertung als...</i>	
	<i>biogener Festbrennstoff</i> [PJ a ⁻¹]	<i>Biogassubstrat</i> [PJ a ⁻¹]
Stroh	130	Nicht relevant
Gras aus Dauergrünland	46*	19*
Landschaftspflegematerial	17*	12*
Exkrement und Einstreu	Nicht relevant	96
Ernterückstände	Nicht relevant	13,7
Energiepflanzen (2 Mio. ha)	277*	236*
Gesamtsumme	max. 470 (min. 130)	max. 377 (min. 110)

*Konkurrenznutzung möglich

Quelle: IE (2006), FNR (2005a)

2.2 Verfahren zur Produktion von Energie aus Biomasse

Generell ist es möglich, mit verschiedenen Verfahren aus Biomasse unterschiedliche Arten von Energie(-trägern) zu gewinnen. Dabei kann es sich sowohl um feste, flüssige oder gasförmige Primärenergieträger handeln oder aber um Sekundärenergie in Form von Strom und/oder Wärme. Da sich aber nicht jedes Verfahren für alle Arten von Biomasse eignet, muss der Energieträger auf das jeweilige Verfahren abgestimmt sein. Die Anzahl der in der Praxis verwandten Verfahren ist aufgrund der Heterogenität der Biomasse relativ groß. Grundsätzlich lassen sich die Verfahren aber nach folgenden vier Endprodukten unterscheiden:

- Strom
- Wärme
- Gas
- Kraftstoff

In Abhängigkeit davon, in welcher Verwertungsschiene die Biomasse Verwendung findet, können unterschiedliche THG-Minderungsleistungen vollbracht werden. **Abbildung 2** gibt einen quantitativen Einblick über die spezifischen THG-Minderungspotenziale verschiedener Biomasse-Nutzungspfade. Demnach lassen sich

durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) unter Einsatz von Abfallstoffen (Biogas aus Gülle) sowie in Holzheizkraftwerken die höchsten THG-Minderungen pro Kilowattstunde-Endenergie erzielen. Das Holz-Kraftwerk sowie die KWK bei der Synthesegas-Verstromung und der Verstromung von Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen (Nawaro) liegen hinsichtlich ihres THG-Minderungspotenzials im Mittelfeld. Die Wärmeerzeugung bzw. die Kraftstoffproduktion aus Biomasse haben dagegen nur ein vergleichsweise geringes THG-Minderungspotenzial.

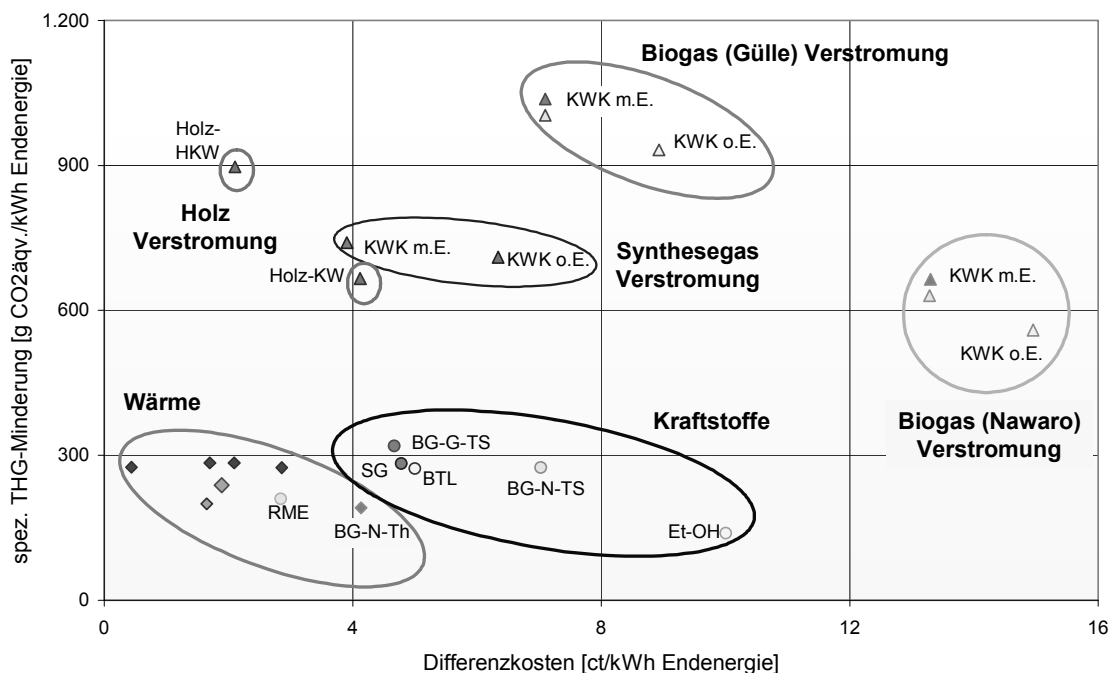


Abbildung 2: Spezifisches Treibhausgas-Minderungspotenzial sowie die Mehrkosten im Vergleich zur konventionellen Endenergie verschiedener Biomasse-Nutzungspfade im Vergleich. Quelle: BGW & DVGW (2006).

Anhand der in **Abbildung 2** dargestellten Zusammenhänge lässt sich ableiten, dass hohe THG-Minderungspotenziale vor allem durch die Erzeugung von Strom und Wärme im KWK-Betrieb zu erzielen sind. Um das maximale Potenzial der Landwirtschaft zur Minderung von THG-Emissionen aus dem Einsatz landwirtschaftlicher Biomasse zu bestimmen, werden nur die Verfahren berücksichtigt, die in der Lage sind, maximale THG-Minderungen bei Verwertung der in den Biomassepotenzialen angegebenen Stoffe zu generieren. Das bedeutet, dass für die vergärungsfähigen Biomassen eine Nutzung in einer BGA bzw. für die Festbrennstoffe eine Verwertung in einem Heizkraftwerk (HKW) unterstellt wird. Liegt eine Konkurrenznutzung zwischen diesen beiden Verfahren vor, so wird das Emissionsminderungspotenzial für beide Systeme ermittelt und die in Bezug auf die THG-Minderung bessere Option gewählt.

2.3 Methodik

2.3.1 Emissionsminderung durch energetische Nutzung

Durch die Nutzung der dargestellten Biomassepotenziale kann Sekundärenergie in Form von Strom und Wärme erzeugt werden. Die dadurch substituierbaren Einsatzmengen an fossilen Energieträgern tragen dazu bei, dass es zu einer Minderung von THG-Emissionen kommt. Der Umfang der einsparungsfähigen Emissionen lässt sich aus den Emissionsfaktoren von Referenzsystemen ableiten. Folgende Faktoren sollen für die Untersuchung verwendet werden:

- 653 gCO₂ kWh_{el}⁻¹ als Referenzwert für den deutschen Kraftwerksmix zur Erzeugung von Strom (Fritsche 2003).
- 254 gCO₂ kWh_{th}⁻¹ als Referenzwert für die Erzeugung von Wärme in einer Erdgas-Brennwerttherme (Öko 2004).

Um aus den genannten Energieträgerpotenzialen die daraus erzeugbaren Mengen an Strom und Wärme abzuleiten, müssen für die beiden betrachteten Verfahren BGA und HKW die Wirkungsgrade bestimmt werden. Es werden folgende Annahmen getroffen:

Biogasanlage:

- elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{el} = 0,35$
- thermischer Wirkungsgrad $\eta_{th} = 0,45$

Heizkraftwerk:

- elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{el} = 0,30$
- thermischer Wirkungsgrad $\eta_{th} = 0,55$

Da beide Verfahren, die BGA sowie das HKW, zur Energieproduktion ihrerseits Energie benötigen, werden folgende Annahmen bezüglich der notwendigen Prozessenergie getroffen:

Biogasanlage:

- Eigenenergiebedarf elektrisch: 8 % der erzeugten elektrischen Energie
- Eigenenergiebedarf thermisch: 40 % der erzeugten thermischen Energie

Heizkraftwerk

- Eigenenergiebedarf elektrisch: 10 % der erzeugten elektrischen Energie

Mit der in **Formel 1** dargestellten Gleichung lassen sich aus den zuvor beschriebenen Energieträgerpotenzialen der einzelnen Biomassekategorien die Minderungsleistungen bei der energetischen Verwendung durch die Substitution von fossilen Energieträgern berechnen. Es wird von einer vollständigen Nutzung der erzeugten Energie in Form von Strom und Wärme ausgegangen.

$$\text{Formel 1: } \text{EMP} = \text{EP} * (\eta_{\text{el}} * (1 - \text{P}_{\text{el}}) * \text{EF}_{\text{el}} + \eta_{\text{th}} * (1 - \text{P}_{\text{th}}) * \text{EF}_{\text{th}})$$

Mit

EMP	Emissionsminderungspotenzial [tCO_2]
EP	Energieträgerpotenzial einer Biomassekategorie [kWh]
η	Wirkungsgrad bei der Erzeugung von Sekundärenergie [%]
P	Eigenenergiebedarf des Prozesses [%]
EF_{el}	Emissionsfaktor des elektrischen Referenzsystems [$\text{tCO}_2 \text{ kWh}_{\text{el}}^{-1}$]
EF_{th}	Emissionsfaktor des thermischen Referenzsystems [$\text{tCO}_2 \text{ kWh}_{\text{th}}^{-1}$]

2.3.2 Emissionen aus Vorketten

Die betrachteten Biomassekategorien „Stroh“, „Landschaftspflegematerial“, „Ernterückstände“ und „tierische Exkremente und Einstreu“ stellen weitgehend Abfallprodukte dar, die aufgrund der in der Landwirtschaft durchgeführten Prozesse anfallen. Aus diesem Grund werden dieser Biomasse keine THG-Emissionen aus der Gesteungskette angerechnet. Anders ist es dagegen bei den Kategorien „Gras aus Dauergrünland“ bzw. „Energiepflanzen“, die speziell zum Zweck der energetischen Nutzung kultiviert werden. Hier müssen die entstehenden THG-Emissionen der Pflanzenproduktion mit bilanziert werden.

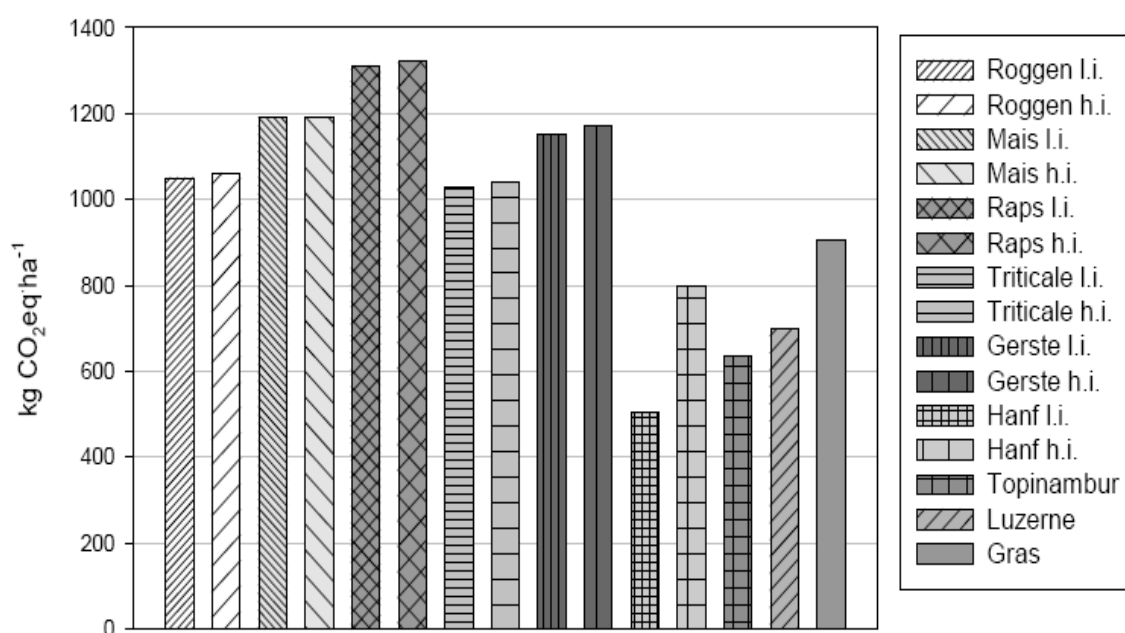


Abbildung 3: Die durch pflanzenbauliche Maßnahmen verursachten Treibhausgas-Emissionen unterschiedlicher Kulturarten für die energetische Verwertung auf Basis der organischen Trockenmasse, (l.i. = low intensity, h.i. = high intensity), Quelle: Plöchl & Heiermann (2002).

Abbildung 3 zeigt die entstehenden THG-Emissionen bei der Kultivierung verschiedener Energiepflanzen, wobei die dargestellten Unterschiede in erster Linie auf die Höhe der N-Düngergaben zurückzuführen sind (Plöchl & Heiermann 2002). Die stärker gedüngten Getreidearten und Raps liegen bei Werten zwischen $1.000\text{--}1300 \text{ kgCO}_2 \text{ ha}^{-1}$, die schwächer gedüngten Kulturarten Hanf, Topinambur, Luzerne und Gräser dagegen nur bei $500\text{--}900 \text{ kgCO}_2 \text{ ha}^{-1}$.

Zur Bilanzierung der entstehenden THG-Emissionen im Anbau von „Gras aus Dauergrünland“ sowie „Energiepflanzen“ wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Die zur Erzeugung des genannten Energieträgerpotenzials von Gras notwendige Fläche beträgt 410.000 ha (IE 2006).
- Der Emissionsfaktor für Gras wird mit $900 \text{ kg}_{\text{CO}_2} \text{ ha}^{-1}$ angenommen (Plöchl & Heiermann 2002).
- Die zur Erzeugung von Energiepflanzen zur Verfügung stehende Fläche wird mit 2 Mio. ha angenommen (FNR 2005a).
- Der Emissionsfaktor für die Energiepflanzen wird mit $1.200 \text{ kg}_{\text{CO}_2} \text{ ha}^{-1}$ (Referenzwert für Mais) angenommen.

Die THG-Emissionen aus der Pflanzenproduktion bestimmen sich als Produkt von Anbaufläche und Emissionsfaktor.

2.3.3 Emissionsminderung durch veränderte Prozessketten

Tabelle 26: Emissionen im Wirtschaftsdüngermanagement im Jahr 2004 und deren Verteilung auf die Tierarten Rinder und Schweine bezogen auf die Tierbestandsdaten von 2000.

<i>Emissionen</i>	<i>Anteil Rinder</i> [%]	<i>Anteil Schweine</i> [%]	<i>Gesamtausstoß Jahr</i> [Mg]
CH ₄	60	39	250.000
N ₂ O	62	14	9.000

Quelle: UBA (2006), Dämmgen (2004)

In der Kategorie „Tierische Exkrementen“ entstehen durch die Fermentierung in Biogasanlagen weitere Emissionsminderungen, die sich mit dem veränderten Ausgasungsverhalten des Gärrestes im Gegensatz zu unbehandelten Exkrementen ergeben. Um das daraus resultierende THG-Minderungspotenzial zu bestimmen, werden zunächst die Emissionen, die im Zusammenhang mit Tierischen Exkrementen entstehen, erfasst. Es handelt sich dabei um CH₄- sowie N₂O-Emissionen, die im Nationalen Treibhausgasinventar Deutschlands in der Kategorie „Wirtschaftsdünger-Management“ aufgeführt sind (UBA 2006). Diese werden für jedes THG anteilmäßig auf die beiden Hauptemittenten (Rinder und Schweine) aufgeteilt (**Tabelle 26**).

Tabelle 27: CH₄- und N₂O-Emissionsänderungsfaktoren für vergorene Gülle im Vergleich zur Rohgülle.

<i>Substrat</i>	<i>Emissionsänderungen im Vergleich zur Rohgülle</i>	
	<i>CH₄</i>	<i>N₂O</i>
Milchviehgülle vergoren	- 67%	+ 30%
Schweinegülle vergoren	- 75%	+ 38%

Quelle: Amon & Döhler (2005)

Anschließend werden Emissionsminderungsfaktoren (**Tabelle 27**) herangezogen, welche die mögliche Emissionsvermeidung bei Lagerung und Ausbringung von in Biogas-

anlagen vergorener Gülle gegenüber Rohgülle widerspiegeln. Um die unterschiedlichen Emissionen auf eine Gemeinsame Bezugsbasis zu bringen, erfolgt eine Umrechnung in CO₂-Äquivalente. Dabei wird für CH₄ der Faktor 23, für N₂O der Faktor 296 angewendet (IPCC 2001).

Die Berechnung der Emissionsminderungspotenziale erfolgt für jede Tierart und für jedes THG nach **Formel 2**. Das Gesamtpotenzial der möglichen Emissionsminderung wird durch Aufsummieren der Einzelposten pro Tierart und THG bestimmt.

Formel 2: $EMP = E_0 * A * MF * GWP$

Mit

EMP	Emissionsminderungspotenzial [Mg]
E ₀	Gesamtausstoß des spezifischen THG im Wirtschaftsdüngermanagement [Mg]
A	Anteil der spezifischen Tierart am Gesamtausstoß des THG [%]
MF	spezifischer Minderungsfaktor durch Vergärung [%]
GWP	spezifischer Umrechnungsfaktor in CO ₂ -Äquivalente

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die einzelnen Kategorien vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Betrachtung des Gesamtpotenzials unter Berücksichtigung des Einsatzes der erzeugten Nutzenergie.

3.1 Stroh

Das Energieträgerpotenzial in Höhe von 130 PJ a⁻¹ von Stroh führt durch die Nutzung als Festbrennstoff in einem Heizkraftwerk unter den genannten Annahmen durch die Substitution von Strom und Wärme nach **Formel 1** insgesamt zur Emissionsminderung in Höhe von 11.411 Gg CO₂-Äquivalent. Davon entfallen 6.367 Gg CO₂-Äquivalent auf die Erzeugung von Strom und 5.045 Gg CO₂-Äquivalent auf die Wärmeerzeugung.

3.2 Gras aus Dauergrünland

Die Emissionen aus dem Anbau von Gras belaufen sich, ausgehend von einer Anbaufläche von 410.000 ha und einem Emissionsfaktor von 900 kg CO₂-Äquivalent ha⁻¹, auf 369 Gg CO₂-Äquivalent.

Bei einer unterstellten Nutzung in der Biogasschiene, bei der ein Energieträgerpotenzial von 19 PJ a⁻¹ zur Verfügung steht, lassen sich nach **Formel 1** bei der Erzeugung von Strom und Wärme durch Substitution von fossilen Energieträgern insgesamt 1.472 Gg CO₂-Äquivalent mindern. Davon entfallen 1.110 Gg CO₂-Äquivalent auf die Stromerzeugung und 362 Gg CO₂-Äquivalent auf die Nutzwärmeerzeugung.

Wird das Gras dagegen als Festbrennstoff in einem Heizkraftwerk genutzt, beträgt das Energieträgerpotenzial 46 PJ a^{-1} . Durch die energetische Nutzung lassen sich dann insgesamt $4.038 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$ einsparen. Davon entfallen bei diesem Verfahren $2.253 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$ auf die Stromerzeugung und $1.785 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$ auf die Nutzwärmeerzeugung.

Zieht man von dem Emissionsminderungspotenzial bei der Verwendung als Festbrennstoff die Emissionen aus dem Anbau ab, so ergibt sich ein maximales Einsparvolumen von $3.669 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$.

3.3 Landschaftspflegematerial

Die Nutzung von Landschaftspflegematerial zur Vergärung kann bei einem Energieträgerpotenzial von 12 PJ a^{-1} durch energetische Verwertung insgesamt nach **Formel 1** zu Emissionsminderungen in Höhe von $929 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$ führen. Davon entfallen $701 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$ auf die Verstromung und $229 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$ auf die Wärmenutzung.

In der Festbrennstoffschiene kann dagegen aus dem Landschaftspflegematerial bei einem Energieträgerpotenzial von 17 PJ a^{-1} nach **Formel 1** eine Menge von $1.492 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$ eingespart werden. In der Stromproduktion entspricht dies einem Emissionsminderungspotenzial von $833 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$ und in der Wärmeherstellung einem von $660 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$.

Da für die Nutzung von Landschaftspflegematerial keine Vorkettenemissionen angesetzt wurden, ergibt sich in dieser Kategorie ein maximales Minderungsvermögen von $1.492 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$.

3.4 Exkreme und Einstreu

Tierische Exkreme und Einstreu sind aufgrund ihrer Eigenschaften nicht als Festbrennstoff geeignet, sie lassen sich aber mit einem Energieträgerpotenzial von 96 PJ a^{-1} in Biogasanlagen verwerten. Dort kann durch die Energieerzeugung nach **Formel 1** ein Emissionsminderungspotenzial von $7.436 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$ erzielt werden, wovon unter den getroffenen Annahmen $5.607 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$ auf die Strom- und $1.829 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$ auf die Wärmeerzeugung entfallen.

Darüber hinaus können nach **Formel 2** durch die Vermeidung von Emissionen bei der Lagerung und Ausbringung von Exkrementen weitere Minderungen in Höhe von $3.356 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$ erzielt werden. Aufsummiert kann so ein maximales Emissionsminderungspotenzial von $10.792 \text{ Gg CO}_2\text{-Äquivalent}$ ausgeschöpft werden.

3.5 Ernterückstände

Ernterückstände werden aufgrund ihrer Eigenschaften ebenfalls nur in der Biogasschiene verwertet. Bei einem Energieträgerpotenzial von $13,7 \text{ PJ a}^{-1}$ können daraus nach

Formel 1 unter den getroffenen Annahmen THG-Emissionen in Höhe von 1.061 Gg CO₂-Äquivalent vermieden werden. Davon entfallen 800 Gg CO₂-Äquivalent auf die Strom- und 261 Gg CO₂-Äquivalent auf die Wärmeerzeugung.

3.6 Energiepflanzen

Die Emissionen aus dem Anbau von Energiepflanzen belaufen sich unter den getroffenen Annahmen bei einer Anbaufläche von 2.000.000 ha und einem Emissionsfaktor von 1.200 kg CO₂-Äquivalent ha⁻¹ (Referenzwert für Mais) auf 2.400 Gg CO₂-Äquivalent. Die dort kultivierte Biomasse kann sowohl vergoren als auch als Festbrennstoff genutzt werden.⁷

Für die Biogasschiene steht ein Energieträgerpotenzial von 236 PJ a⁻¹ zur Verfügung. Für die Energieerzeugung kann nach **Formel 1** ein Emissionsminderungspotenzial von 18.280 Gg CO₂-Äquivalent zur Verfügung gestellt werden. Dies setzt sich zusammen aus 13.784 Gg CO₂-Äquivalent für die Strom- und 4.496 Gg CO₂-Äquivalent für die Wärmeerzeugung.

Bei der energetischen Nutzung als Festbrennstoff mit einem Energieträgerpotenzial von 277 PJ a⁻¹ können nach **Formel 1** dagegen insgesamt 24.315 Gg CO₂-Äquivalent eingespart werden, die sich mit 13.566 Gg CO₂-Äquivalent auf die Strom- und mit 10.749 Gg CO₂-Äquivalent auf die Wärmeerzeugung aufteilen.

Zieht man von dem Emissionsminderungspotenzial bei der Verwendung als Festbrennstoff die Emissionen aus dem Anbau ab, so ergibt sich ein maximales Einsparvolumen von 21.915 Gg CO₂-Äquivalent.

3.7 Gesamtpotenzial

Tabelle 28: Minimales bzw. maximales Treibhausgas-Emissionsminderungspotenzial aus der energetischen Nutzung verschiedener Biomassepotenziale.

<i>Kategorie</i>	<i>Treibhausgas-Minderungspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>			
	<i>Biogas</i>		<i>Festbrennstoff</i>	
	<i>elektrisch</i>	<i>thermisch</i>	<i>elektrisch</i>	<i>thermisch</i>
Stroh	-	-	6.367	5.045
Gras aus Dauergrünland	1.110	362	2.253	1.785
Landschaftspflege	701	229	833	660
Exkremete und Einstreu	5.607	1.829	-	-
Ernterückstände	800	261	-	-
Energiepflanzen	13.784	4.496	13.566	10.749
Gesamtsumme max.				49.754
Gesamtsumme min.				40.590

⁷ Bei der Nutzung als Festbrennstoff würde man allerdings andere Energiepflanzen als Mais anbauen.

Tabelle 28 stellt die Emissionsminderungspotenziale der einzelnen Kategorien gegenüber. Es wird, wo möglich, unterschieden zwischen der Nutzung als Biogassubstrat und Festbrennstoff. Für jede Kategorie ist das jeweils erzielbare Minderungspotenzial durch die Produktion von Strom und Wärme angegeben. Die maximal/minimal mögliche Emissionsminderung ergibt sich aus der Summierung der Verwertungswege, die jeweils für die Summe der Treibhausgas-Minderungspotenziale aus der Strom- und Wärmeproduktion die größtmöglichen/kleinstmöglichen Werte aufweisen. Auf diesem Wege errechnet sich ein maximales Potential von 49.754 Gg CO₂-Äquivalent bzw. ein minimales Potential von 40.590 Gg CO₂-Äquivalent

Zu diesen Summen wird die Minderungsleistung aus der Vergärung von Exkrementen hinzugerechnet, abzüglich der Emissionen aus dem Anbau von Gras und Energiepflanzen, so dass am Ende ein Gesamtpotenzial zur Verminderung von THG-Emissionen in Höhe von 41.177 bis 50.341 Gg CO₂-Äquivalent verbleibt (**Tabelle 29**).

Tabelle 29: Gesamtes Treibhausgas-Emissionsminderungspotenzial aus der Verwertung von Biomasse.

<i>Quelle</i>	<i>Treibhausgaspotenzial [Gg CO₂-Äquivalent]</i>
Maximale Minderung aus energetischer Nutzung	49.754
Minimale Minderung aus energetischer Nutzung	40.590
Minderungsleistung aus Vergärung von Exkrementen	3.356
Emissionen aus Anbau von Gras	-369
Emissionen aus Anbau von Energiepflanzen (Referenz: Mais)	-2.400
Gesamtpotenzial max.	50.341
Gesamtpotenzial min.	41.177

Wird das so abgeleitete maximale THG-Emissionsminderungspotenzial ins Verhältnis zu den durch die Landwirtschaft verursachten THG-Emissionsbeiträgen gesetzt, dann ergibt sich daraus, dass die Eingangs erwähnten Emissionen der „Quellgruppe Landwirtschaft“ in Höhe von 64.331 Gg CO₂-Äquivalent zu 78,3 % kompensiert werden können. Bezogen auf die ebenfalls bereits genannten Emissionen in Höhe von 113.014 Gg CO₂-Äquivalent, die der Landwirtschaft primär zugerechnet werden können, beträgt die mögliche Kompensation noch 44,5 %.

4 Diskussion

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse kann die Landwirtschaft durch die Nutzung vorhandener landwirtschaftlicher Biomassequellen einen entscheidenden Beitrag zur Minderung von THG-Emissionen in Deutschland leisten. Die Höhe der ermittelten THG-Minderungen kann allerdings aufgrund der teilweise stark vereinfachten Annahmen, wie

-
- die Ableitung der Biomassepotenziale auf einfachsten gemeinsamen Nenner der zitierten Quellen,
 - die Festlegung auf nur zwei Verfahren zur energetischen Nutzung,
 - die vereinfachten Annahmen zu den Vorkettenemissionen des Energiepflanzenbaus mit Mais als Referenzpflanze,
 - die vereinfachten Annahmen zu den Emissionen der Abfallstoffe, denen keine Vorkettenemissionen in Rechnung gestellt werden,
 - sowie der unterstellten vollständigen Nutzung der produzierten Energie,

nur einen ungefähren Anhaltspunkt wiedergeben, was an der getroffenen Kernaussage allerdings nichts Entscheidendes verändert.

Bei den zur Verfügung stehenden Biomassekategorien spielen insbesondere die Energieträgerpotenziale der „Energiepflanzen“, von „Stroh“ und von „Exkrementen“ eine wichtige Rolle, da ihre Nutzung erhebliche Potenziale im Hinblick auf die möglichen THG-Minderungen bietet. Darüber hinaus hat die Art des verwendeten Verfahrens erheblichen Einfluss auf die erzielbaren Umwelteffekte. Dies spielt insbesondere dort eine Rolle, wo Biomasse aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften in konkurrierenden Verfahren eingesetzt werden kann. Im Sinne des Klimaschutzes sollte ein Energieträger dort Verwendung finden, wo er die größten Minderungseffekte hervorruft. In der vorliegenden Untersuchung bedeutet dieses unter den getroffenen Annahmen konkret, dass in den Fällen, wo eine Konkurrenznutzungsmöglichkeit zwischen Biogas und Festbrennstoff besteht, der Energieträger aufgrund der größeren Minderungsoption als Festbrennstoff eingesetzt werden sollte. Unter Voraussetzung dieser Aussage folgt, dass der Anbau von Energiepflanzen zur Nutzung in Biogasanlagen unter Klimagesichtspunkten fragwürdig erscheint.

Aus der vorliegenden Untersuchung geht hervor, dass unter technischen Gesichtspunkten die Verwertungsschiene über das Biogas zwei entscheidende Nachteile gegenüber der Biomassenutzung als Festbrennstoff hat. Der Erste liegt darin begründet, dass die im Energieträger gebundene Energie bei der Verbrennung nahezu vollständig umgesetzt werden kann, während bei der Vergärung nur Teile davon genutzt werden können. Der zweite Nachteil ist, dass die in der Untersuchung betrachtete Biogasanlage aufgrund ihres relativ hohen Prozesswärmebedarfs weitaus weniger Nutzwärme als das betrachtete Heizkraftwerk zur Verfügung stellen kann. Dadurch lassen sich in Biogasanlagen wärmeseitig viel weniger Emissionsminderungen umsetzen. Hinzu kommt, dass in vielen Praxisanlagen keine oder nur unzureichende Wärmenutzungskonzepte vorhanden sind, wohingegen Heizkraftwerke ihre Abwärme in der Regel über Nahwärmenetze abgeben können. Dieser Umstand wird in dieser Arbeit allerdings nicht berücksichtigt.

Trotzdem ist der Einsatz der Biogaserzeugung unter Klimagesichtspunkten dort sinnvoll, wo Energieträger aufgrund ihrer stofflichen Eigenschaften als Festbrennstoff nicht genutzt werden können. Dabei kann der Klimanutzen in einigen Fällen sogar über die energetische Bewertung hinausgehen, wenn sich die stofflichen Eigenschaften wie bei

den tierischen Exkrementen hinsichtlich der Emission von THG durch die Vergärung positiv verändern. Ein anderer Punkt, der in diesem Zusammenhang teilweise zu weiteren Emissionsminderungen führen kann, ist die Substitution von Mineraldünger durch die Schließung von Stoffkreisläufen (z.B. Ausbringung von Gärrest aus Energiepflanzenanbau), der in dieser Arbeit aber nicht mit bilanziert wird.

Zur Bewertung, in welchem Kontext die energetische Verwertung von Biomasse zur Senkung von THG-Emissionen ein Rolle spielen kann, müssen aber auch monetäre Maßstäbe mit einbezogen werden, die in dieser Arbeit unberücksichtigt bleiben. Entscheidend für die Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen sind nicht nur die Ertragspotenziale, sondern vor allem auch die Grenzvermeidungskosten der THG-Minderungen. Da das Geld unter umweltökonomischen Gesichtspunkten dort investiert werden sollte, wo maximaler Nutzen gestiftet wird, ist auch diese Dimension mit in die Betrachtung einzubeziehen. Erst wenn die Grenzvermeidungskosten der THG-Minderung durch Biomassenutzung niedriger liegen als die anderer Reduktionsstrategien, erscheint eine Realisierung der ausgemachten Potenziale sinnvoll. Dann kann der Einsatz landwirtschaftlicher Biomasse aber bei einem Reduktionsvolumen von bis zu 50.341 Gg CO₂-Äquivalent einen erheblichen Beitrag zur Umsetzung von Klimaschutzzielen leisten.

III. Teil:
Innovative Technologien zur Biogasnutzung

Zusammenfassung

Die Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität zur Direkteinspeisung in das Erdgasnetz wird als Alternative zur dezentralen Energieerzeugung mit Kraft-Wärme-Kopplung im Motor-BHKW vielfach diskutiert. Obwohl die Direkteinspeisung mit 71,3 % im Vergleich zur dezentralen Energieerzeugung mit Werten zwischen 45,7-57,8 % höhere Energieausbeuten bei der Umsetzung von Primär- in Sekundärenergie liefert, ist das CO₂-Vermeidungspotential bei der Direkteinspeisung mit 187-228 g_{CO2}/kWh_{Biogas} im Vergleich zu dezentralen Varianten mit 245-350 g_{CO2}/kWh_{Biogas} wesentlich geringer.

Grund dafür ist, dass Erdgas, welches bei der Direkteinspeisung von Biogas substituiert wird, vornehmlich zur Wärmeerzeugung herangezogen wird. Da der CO₂-Emissionsfaktor zur Nutzwärmeerzeugung auf Basis von Erdgas erheblich geringer ist als der zur Substitution von Strom aus dem öffentlichen Netz, ist die dezentrale Energieerzeugung mit ihrem deutlich höheren Stromerzeugungsgrad gegenüber der Direkteinspeisung wesentlich im Vorteil.

Im Gegensatz zur Direkteinspeisung von Biogas kann der Einsatz neuer Technologien in Form von Brennstoffzellen-Systemen wesentliche Verbesserungen bei den potenziellen CO₂-Emissionseinsparungen durch Biogasanlagen generieren. Aufgrund höherer elektrischer Wirkungsgrade machen sich die CO₂-Minderungseffekte auf Grundlage der Substitution von Strom aus dem öffentlichen Netz noch deutlicher positiv bemerkbar, als es beim Motor-BHKW der Fall ist. Unter derzeitigen Rahmenbedingungen ist der Einsatz solcher Systeme im Hinblick auf den Klimaschutz selbst im Extremfall, bei dem die gesamte Abwärme am Standort der Biogasanlage ungenutzt bleibt, noch vorteilhaft. Der Einsatz von Brennstoffzellen-Systemen an Biogasanlagen sollte aus diesem Grund verstärkt vorangetrieben werden, da das Emissionsminderungspotential deutlich größer ist, als bei allen anderen untersuchten Systemen, insbesondere im Vergleich zur Direkteinspeisung von Biogas auf Erdgasqualität.

1 Einleitung

Erneuerbare Energien können durch die Substitution von fossilen Energieträgern eine wesentliche Rolle zur Verminderung von Treibhausgas-Emissionen spielen. Der Nutzen einer regenerativen Technologie bemisst sich dabei aus der Differenz zwischen den Treibhausgas-Emissionen, die bei der Produktion, Bereitstellung und dem Einsatz der Technologie entstehen, und dessen Minderungspotenzial im Vergleich zu einer Referenztechnologie.

Im Gegensatz zu den Energieträgern Wind und Sonnenstrahlung, die direkt technologisch nutzbar sind, werden die Einsatzstoffe bei der Biomassenutzung erst durch zusätzlichen energetischen Aufwand verfügbar, der sich negativ auf die Treibhausgasbilanz auswirkt. Dies gilt insbesondere für nachwachsende Rohstoffe, die speziell zur energetischen Verwertung angebaut werden.

Untersuchungen zur Ökobilanz einer großtechnischen Biogasanlage haben gezeigt, dass neben der Auswahl und der Bereitstellung der Inputstoffe auch der elektrische Wirkungsgrad der Konversionstechnologie sowie der Abwärmenutzungsgrad eine wichtige Rolle hinsichtlich der Treibhausgas-Emissionen in der Gesamtbilanz spielt (Hartmann 2006).

Am Beispiel der Umwandlung von Biogas in Nutzenergie soll im Folgenden untersucht werden, welche bestehenden und zukünftig möglichen Konversionstechnologien die größten Treibhausgasminderungen aufweisen. Dabei soll insbesondere die Direkteinspeisung von Biogas auf Erdgasqualität in das Erdgasnetz mit verschiedenen Brennstoffzellen-Systemen verglichen werden.

2 Material und Methoden

Für die Untersuchung wird zunächst ein Bilanzraum definiert, bei dem die Vorketten für die Bereitstellung des eingesetzten Biogases bewusst ausgeschlossen werden. Diese erbringen für die zu betrachtende Fragestellung, welche technische Konversionstechnologie aus vorhandenem Biogas die geringsten THG-Emissionen verursacht, keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn.

Als Systemgrenze dient nach **Abbildung 4** die Bereitstellung des Rohbiogases aus dem Fermenter auf der einen Seite und der Einspeisepunkt der erzeugten Nutzenergie Strom und/oder Wärme auf der anderen Seite. Der Bilanzraum umfasst somit alle Einrichtungen, die notwendig sind, um das Rohbiogas in Nutzenergie zu überführen. Um den Eigenenergiebedarf der Biogasanlage zu decken, wird der Strom- und Wärmebedarf bilanziell berücksichtigt und von der erzeugten Nutzenergie abgezogen.

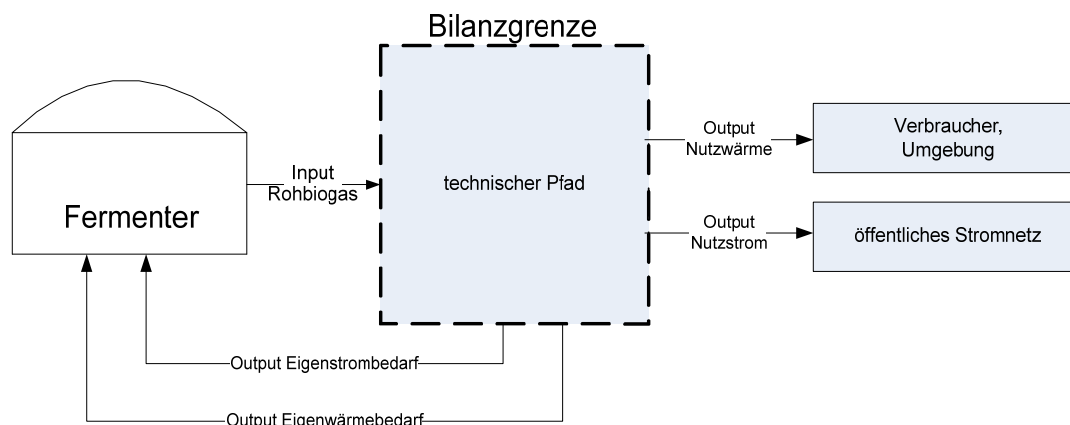


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Bilanzgrenze für die zu untersuchenden Systeme.

Die Untersuchung gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil wird für jeden betrachteten Nutzungspfad ein Energieflussdiagramm erstellt, in dem die Umwandlungsverluste vom Rohbiogas zum Nutzenergieträger Strom und/oder Wärme dargestellt werden. In einem zweiten Schritt wird aus den so ermittelten Nutzenergiemengen mit Hilfe von spezifischen Emissionsfaktoren, welche die erzeugten Emissionen pro Einheit Nutzenergie widerspiegeln, das Emissionsminderungsvermögen berechnet. Dabei werden generell folgende spezifische Emissionsfaktoren als Referenzen⁸ zu Grunde gelegt:

- 653 g_{CO2}/kWh_{el} für die Stromerzeugung im Kraftwerksmix (Fritsche 2003)
- 432 g_{CO2}/kWh_{el} für Strom aus einem Erdgas betriebenen Gas- und Dampfkraftwerk (GuD) (ÖKO 2004)
- 254 g_{CO2}/kWh_{th} für die Nutzwärmeerzeugung in einer Erdgas-Brennwerttherme (ÖKO 2004).

Aus dem Verhältnis von erzeugter Nutzenergie zum Energieinput wird abschließend der Gesamtwirkungsgrad des jeweils betrachteten Systems bestimmt. Dieser errechnet sich nach **Formel 3**.

Formel 3:
$$\eta_{Ges} = \frac{\eta_{el} + \eta_{th}}{E_{input}}$$

Mit

η_{Ges}	Gesamtwirkungsgrad
η_{el}	elektrischer Wirkungsgrad
η_{th}	thermischer Wirkungsgrad
E_{input}	Energieinput [kWh]

⁸ In den Emissionsfaktoren für Strom und Wärme sind die Vorketten mit einbezogen, was für den Untersuchungsgegenstand aber keine weitere Rolle spielt. Nicht die Ermittlung absoluter Emissionsmengen steht im Fokus der Untersuchung sondern die Bestimmung des Technologiepfades der energetischen Verwertung, der bezogen auf die zur Verfügung gestellte Nutzenergie relativ die größten Emissionsminderungen bewirkt.

Um das THG-Minderungspotenzial aus der Direkteinspeisung von Biogas in das Erdgasnetz mit den anderen Technologiepfaden, bei denen durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) Strom und Wärme produziert wird, vergleichen zu können, muss eine gemeinsame Bezugsbasis geschaffen werden. Dazu wird nach einem eigenen Ansatz anhand des deutschen Ergasverbrauch bestimmt, welcher Anteil in die Produktion von Strom und welcher Anteil in die Wärmeproduktion fließt. Mit Hilfe der so ermittelten Verteilung wird das einspeisbare Biogas in Strom- und Wärmeäquivalente umgerechnet. Anhand der oben genannten spezifischen Emissionsfaktoren wird dann aus den Nutzenergieäquivalenten das Emissionsminderungspotenzial kalkuliert.

Grundlage für die Bestimmung des durchschnittlichen Verwendungszwecks von Erdgas in Deutschland bildet die deutsche Energiebilanz 2002 (AGEB 2002) sowie die Struktur des Endenergieverbrauchs 2004⁹ (VDEW 2006).

Tabelle 30: Endenergieverbrauch für den Primärenergieträger Erdgas im Jahr 2004 in Deutschland.

<i>Bereich</i>	<i>Endenergieverbrauch Erdgas [GWh]</i>
Raumwärme	386.650
Warmwasser	58.608
Sonst. Primärwärme ¹	257.244
Wärme Gesamt	702.482
Mech. Energie	3.256
Summe	705.738

¹Bei der „Sonst. Primärwärme“ handelt es sich um Prozesswärme ohne Warmwasser, im wesentlichen um Wärme für Fertigungsprozesse etc., aber auch um Wärmeprozesse im Privathaushalt insbesondere die Lebensmittelzubereitung (z.B. Kochen).

Quelle: VDEW (2006)

In **Tabelle 30** ist der gesamte Endenergieverbrauch für Erdgas nach Anwendungsbereichen aufgeführt. Daraus geht hervor, dass Erdgas in Deutschland hauptsächlich zur Wärmeerzeugung herangezogen wird. Der restliche Anteil für die mechanische Energieerzeugung ist mit weniger als 1 % unbeutend. Neben dem Endenergieverbrauch wird Erdgas aber auch zur Sekundärenergieerzeugung in Kraftwerken eingesetzt. Dieser Anteil, der in **Tabelle 30** nicht mit inbegriffen ist, wird in **Tabelle 31** dargestellt.

Da die deutsche Energiebilanz keinen Aufschluss über die Aufteilung des Erdgaseinsatzes in Kraftwerken auf die Erzeugnisse Strom und Wärme angibt, müssen diese abgeleitet werden. Dazu werden folgende Annahmen zu Produktion und Wirkungsgraden getroffen:

- Öffentliche Wärmekraftwerke: ausschließliche Produktion von Strom.

⁹ In den Energiebilanzen ist Erdgas mit unter der Rubrik Naturgase aufgeführt. Darin finden sich aber auch Gas aus Kohle sowie Gas aus Öl. Da Erdgas aber den überwiegenden Anteil darstellt, wird im Folgenden Erdgas als Synonym für die Gruppe der Naturgase verwendet.

- Industriewärme- und Heizkraftwerke: Kraft-Wärme-Kopplung mit einem Wirkungsgrad für die Stromerzeugung von 40 % und einem Wirkungsgrad für die Wärmeerzeugung von 50 % und 10 % Verluste.
- Öffentliches Heizkraftwerk: Kraft-Wärme-Kopplung mit einem Wirkungsgrad für die Stromerzeugung von 35 % und einem Wirkungsgrad für die Wärmeerzeugung von 55 % und 10 % Verluste.
- Fernheizwärme: Ausschließliche Produktion von Wärme.

Auf Grundlage dieser Annahmen lässt sich berechnen, wie hoch der Anteil des eingesetzten Erdgases an der Produktion der jeweiligen Produkte ist. Bei der Kraft-Wärme-Kopplung werden die Verluste jeweils anteilig auf die Produkte Strom und Wärme angerechnet. **Tabelle 31** stellt die Ergebnisse der Berechnung dar.

Tabelle 31: Naturgaseinsatz für die Strom- und Wärmeproduktion in öffentlichen und industriellen Kraftwerken bei angenommenen Wirkungsgraden nach der Energiebilanz 2002.

<i>Bereich</i>	<i>Erdgaseinsatz</i>		<i>Anteil Strom</i>	<i>Anteil Wärme</i>
	<i>[%]</i>	<i>[GWh]</i>	<i>[GWh]</i>	<i>[GWh]</i>
Öffentl. Wärmekraftwerke	45,9	76.939	76.939	-
Industriewärme- und Heizkraftwerke	21,3	35.743	15.870	19.873
Öffentl. Heizkraftwerke	25,2	42.344	16.472	25.872
Fernheizwärme	7,6	12.731	-	12.731
Summe	100	167.757	109.281	58.476

Quelle: Veränderte Darstellung nach AGEB (2002)

Da in den öffentlichen Wärmekraftwerken nur Strom produziert wird, ist auch der gesamte Erdgaseinsatz in Höhe von 76.939 GWh dem Produkt Strom anzurechnen. Bei der Fernheizwärme wird der komplette Erdgaseinsatz in Höhe von 12.731 GWh dem Produkt Wärme angerechnet. Da im Industriewärme- und im öffentlichen Heizkraftwerk sowohl Strom und Wärme erzeugt werden, müssen die Verluste auf die Produkte verteilt werden. Nach **Formel 4** sind beim Industriekraftwerk 44,4 % des Erdgaseinsatzes dem Produkt Strom zuzurechnen, dem Produkt Wärme dagegen 56,4 %. Daraus ergibt sich ein Anteil für Strom in Höhe von 15.870 GWh und für Wärme in Höhe von 19.873 GWh. Bei öffentlichen Heizkraftwerken beträgt der Anteil für Strom 38,9 % bzw. 16.472 GWh und für Wärme 61,1 % bzw. 25.872 GWh.

Formel 4:
$$x = \frac{\eta_y}{\eta_{\text{Gesamt}}} \cdot 100\%$$

Mit

x = Primärenergieanteil am Sekundärenergieträger.

η_y = Wirkungsgrad für Strom- oder Wärmeerzeugung

η_{Gesamt} = Summe aus Wirkungsgrad für Strom- und Wärmeerzeugung

Insgesamt errechnet sich nach **Tabelle 30** und **Tabelle 31** ein Erdgasverbrauch in Höhe von 873.495 GWh, der sich zu 87 % auf die Wärme- und zu 13 % auf die Stromproduktion aufteilt.

3 Untersuchte Systeme

Hinsichtlich ihres Minderungspotentials an THG-Emissionen beim Einsatz von Biogas sollen folgende Systeme untersucht werden:

- Ein Motor-BHKW am Standort der Biogasanlage, welches gleichzeitig als Referenzsystem zur Bestimmung des Eigenenergiebedarfs der Anlage dient.
- Eine Anlage zur Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität am Standort der Biogasanlage, bei der das Biogas in das Erdgasnetz eingespeist wird.
- Eine Anlage zur Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität am Standort der Biogasanlage, bei der das Biogas in das Erdgasnetz eingespeist wird und nach Durchleitung durch das Erdgasnetz an einem anderen Ort mit einem Motor-BHKW energetisch genutzt wird (Fernabnahme).
- Eine Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle am Standort der Biogasanlage.
- Eine Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle, die durch Fernabnahme mit Biogas auf Erdgasqualität versorgt wird.
- Ein Brennstoffzellen/Gasturbinen-Hybridsystem am Standort der Biogasanlage.
- Ein Brennstoffzellen/Gasturbinen-Hybridsystem, das durch Fernabnahme mit Biogas auf Erdgasqualität versorgt wird.
- Ein Brennstoffzellen-Hausenergiesystem, das durch Fernabnahme mit Biogas auf Erdgasqualität versorgt wird.

Dabei werden für die Biogasanlage, an denen diese Systeme betrieben werden und die das Rohbiogas liefert, folgende allgemeine Annahmen getroffen:

- Der Eigenstrombedarf der Biogasanlage beträgt 8% des produzierten Stromanteils, der bei der Variante mit dem Motor-BHKW am Standort der Biogasanlage erzeugt wird. Die so ermittelten absoluten Werte werden auf alle anderen Beispiele übertragen.
- Der Eigenwärmebedarf der Biogasanlage beträgt 40% des produzierten Wärmeanteils, der bei der Variante mit dem Motor-BHKW am Standort der Biogasanlage erzeugt wird. Die so ermittelten absoluten Werte werden auf alle anderen Beispiele übertragen.
- Es werden keine Methanverluste für die Gastrocknung und Grobentschwefelung des Rohbiogases angenommen.
- Es wird unterstellt, dass 30% der im Referenzfall Motor-BHKW am Anlagenstandort erzeugten thermischen Energie vor Ort einer Wärmenutzung zugeführt werden kann. Dies wird ebenfalls als konstante

Bedingung für alle anderen Systeme angenommen. Die ggf. darüber hinaus zur Verfügung stehende Abwärme wird ungenutzt an die Umgebung abgegeben.

- Im Fall der Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität, bei dem keine Abwärme für den Fermenter aus energetischen Umwandlungsprozessen zur Verfügung steht, wird angenommen, dass die benötigte Prozesswärme mit Hilfe einer Brennwerttherme erzeugt wird. Die notwendige elektrische Prozessenergie wird aus dem öffentlichen Netz bezogen.

Im Folgenden werden die Systeme kurz beschrieben, für jedes System ein Energieflussdiagramm abgeleitet und die Emissionsminderungspotentiale pro Kilowattstunde Energiegehalt im Rohbiogas berechnet.

3.1 Motor-BHKW im dezentralen Betrieb

Die energetische Verwendung von Biogas in einem Motor-BHKW mit Kraft-Wärme-Kopplung gehört heute zum Stand der Technik. Dabei kommen sowohl Zündstrahlmotoren als auch Gas-Otto-Motoren zum Einsatz. Die in der Praxis geforderte elektrische Leistung liegt im Bereich von 30 kW bis zu 2 MW, wobei der elektrische Wirkungsgrad je nach Anlagengröße etwa zwischen 30-41 % liegt. Zur wirtschaftlichen Verstromung des Biogases sind eine Gastrocknung und meist auch eine Grobentschwefelung sinnvoll. Der eingespeiste Strom substituiert konventionell produzierten Strom im öffentlichen Netz. Ein Teilstrom der bei der Kraft-Wärme-Kopplung entstehenden Nutzwärme wird zur Beheizung des Fermenters benötigt. Der Rest kann zur weiteren Verwendung ausgekoppelt werden und zusätzlich fossile Brennstoffe ersetzen. Es werden folgende Annahmen getroffen:

- Ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 35 % für die Verstromung im BHKW
- Ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 45 % für die Wärmeauskopp- lung im BHKW

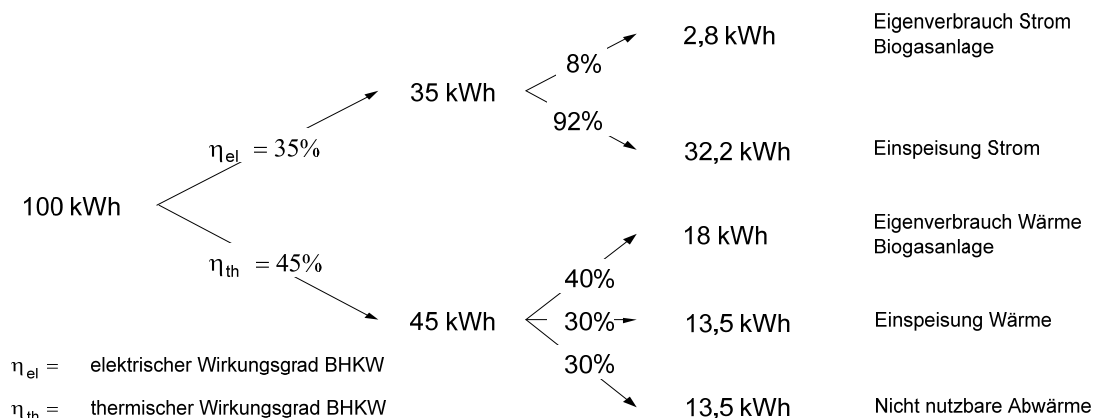


Abbildung 5: Energieflussdiagramm bei der dezentralen Energieerzeugung mit Biogas in einem Motor-BHKW.

Abbildung 5 zeigt den Energiefluss im Motor-BHKW bei einer Inputmenge von $100 \text{ kWh}_{\text{Biogas}}$ unter Zugrundelegung der zuvor getroffenen Annahmen.

Bei einem Energiegehalt von 100 kWh des aus dem Fermenter kommenden Biogases werden unter oben genannten Annahmen 35 kWh in Strom und 45 kWh in Wärme umgewandelt. Der davon abzuziehende Eigenenergiebedarf der Biogasanlage beträgt $2,8 \text{ kWh}_{\text{el}}$ und $18 \text{ kWh}_{\text{th}}$, so dass letztlich $32,2 \text{ kWh}_{\text{el}}$ und $13,5 \text{ kWh}_{\text{th}}$ zur weiteren Nutzung eingespeist werden können. Der nicht verwertbare Abwärmeanteil beträgt ebenfalls $13,5 \text{ kWh}_{\text{th}}$.

Bei einer Einspeisung von $32,2 \text{ kWh}_{\text{el}}$ können bei einem Kraftwerksmix von $653 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$ Emissionen in Höhe von $21.027 \text{ g}_{\text{CO}_2}$ vermieden werden. Weitere Einsparungen in Höhe von $3.429 \text{ g}_{\text{CO}_2}$ fallen bei der Einspeisung von $13,5 \text{ kWh}_{\text{th}}$ als Nutzwärme bei den zugrunde gelegten $254 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{th}}$ an. Bezogen auf das eingespeiste Rohbiogas können so pro Kilowattstunde Energiegehalt im Rohbiogas $245 \text{ g}_{\text{CO}_2}$ eingespart werden. Bezieht man nach **Formel 3** diese erzeugte Nutzenergie auf den Energieinput, so erhält man einen Systemwirkungsgrad von $45,7 \%$.

Geht man entgegen den getroffenen Annahmen davon aus, dass am Standort keine Abwärme genutzt werden kann, dann beträgt die Emissionseinsparung gegenüber dem Referenzsystem nur noch $210 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{Biogas}}$.

Die in diesem Beispiel ermittelten Eigenenergieverbräuche von $2,8 \text{ kWh}_{\text{el}}$ und $18 \text{ kWh}_{\text{th}}$ sowie die Wärmeeinspeisung in Höhe von $13,5 \text{ kWh}_{\text{th}}$ werden für alle anderen Beispiele als Referenz herangezogen.

3.2 Direkteinspeisung von Biogas in das Erdgasnetz

Biogas kann durch die Abtrennung von enthaltenen Schad- und Inertgasen auf Erdgasqualität aufbereitet werden und dann direkt in das Erdgasnetz eingespeist werden. Anlagentechnisch ist dazu am Standort der Biogasanlage eine Aufbereitungsanlage notwendig, um die geforderte Gasqualität nach DVGW-Richtlinie G 260 zu erreichen. Für einen Einsatz an Biogasanlagen eignen sich die Verfahren der Druckwasserwäsche und der Druckwechselabsorption, wobei die Methanverluste bei der Aufbereitung je nach System zwischen 2% und 5% liegen (FNR 2005b). Durch die Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz wird der fossile Energieträger Erdgas substituiert. Darüber hinaus ist ein zusätzliches Heizsystem zur Bereitstellung der notwendigen Prozesswärme im Fermenter notwendig. Es werden folgende Annahmen getroffen:

- Es wird ein Wirkungsgrad für die Aufbereitung in Höhe von 98% angesetzt, d.h. der Methanverlust beträgt 2% .
- Zur Prozesswärmeversorgung wird eine Erdgas-Brennwerttherme mit einem Wirkungsgrad von 98% eingesetzt, die mit auf Erdgasqualität aufbereitetem Biogas betrieben wird.

- Der Eigenenergiebedarf der Biogasanlage beträgt $2,8 \text{ kWh}_{\text{el}}$ und $18 \text{ kWh}_{\text{th}}$.

Abbildung 6 zeigt den Energiefluss für die Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität bei einer Inputmenge von $100 \text{ kWh}_{\text{Biogas}}$ bis zur Nutzenergieerzeugung.

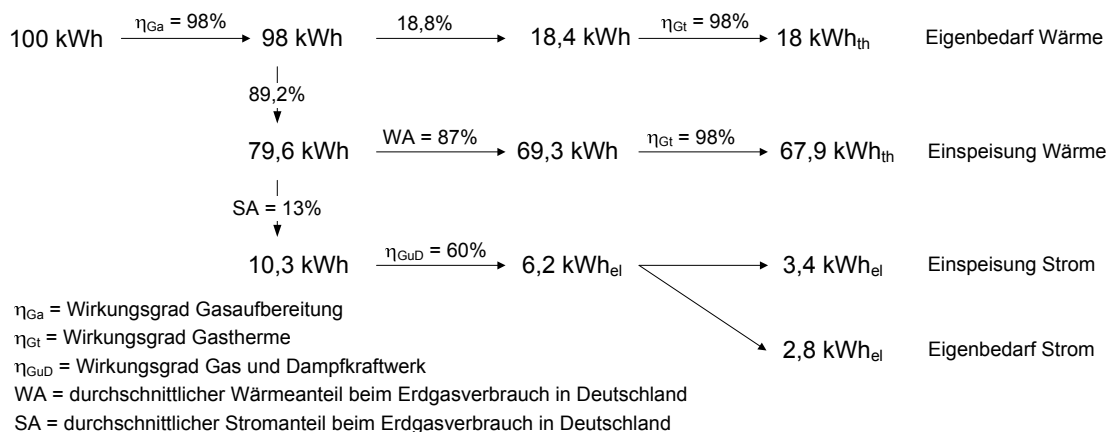


Abbildung 6: Energieflussdiagramm für eine Anlage zur Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität.

Ausgehend von einem Energiegehalt von 100 kWh des aus dem Fermenter kommenden Biogases, werden unter oben genannten Annahmen 98% in Biogas auf Erdgasqualität umgewandelt. Dies entspricht einem Energiegehalt von 98 kWh . Davon wird ein Teilstrom von 18 kWh für die Beheizung des Fermenters benötigt. Bei dem angenommenen Wirkungsgrad der Erdgas-Brennwerttherme von 98% ist dafür Erdgas mit einem Energiegehalt von $18,4 \text{ kWh}$ notwendig. Das übrige Biogas auf Erdgasqualität mit einem Energiegehalt von $79,6 \text{ kWh}$ kann zur weiteren energetischen Verwendung in das Erdgasnetz eingespeist werden. Nach den genannten Annahmen zum Erdgasverbrauch in Deutschland werden durchschnittlich 87% für die Wärmenutzung bereitgestellt. Die daraus resultierenden $69,3 \text{ kWh}$ können mit der Erdgas-Brennwerttherme zu Nutzwärme in Höhe von $67,9 \text{ kWh}_{\text{th}}$ umgesetzt werden. 13% des eingespeisten Biogases auf Erdgasqualität werden durchschnittlich für die Stromproduktion verwendet. Im vorliegenden Fall entspricht dies einem Energiegehalt von $10,3 \text{ kWh}$. Unterstellt man eine Verstromung in einem Gas- und Dampfkraftwerk (GuD), lassen sich daraus $6,2 \text{ kWh}_{\text{el}}$ erzeugen. Davon ist der Eigenenergieanteil der Biogasanlage in Höhe von $2,8 \text{ kWh}_{\text{el}}$ abzuziehen, so dass $3,4 \text{ kWh}_{\text{el}}$ als Nutzenergie im Netz zur Verfügung stehen.

Bei der Produktion von $67,9 \text{ kWh}_{\text{th}}$ können unter Zugrundelegung des Emissionsfaktors von $254 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{th}}$ für die Erdgas-Brennwerttherme Emissionen in Höhe von $17.247 \text{ g}_{\text{CO}_2}$ vermieden werden. Für die Produktion von $3,4 \text{ kWh}_{\text{el}}$ können bei einem Emissionsfaktor für ein GuD-Kraftwerk von $432 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$ weitere $1.469 \text{ g}_{\text{CO}_2}$ vermieden werden. In Summe lassen sich dadurch $18.716 \text{ g}_{\text{CO}_2}$ einsparen. Das bedeutet für

die Direkteinspeisung von Biogas auf Erdgasqualität eine spezifische Einsparung in Höhe von $187 \text{ gCO}_2/\text{kWh}_{\text{Biogas}}$. Der Systemwirkungsgrad nach **Formel 3** beträgt 71,3 %.

3.3 Motor-BHKW bei Fernabnahme

Wird Biogas in das Erdgasnetz eingespeist, kann auch ein Motor-BHKW an einem anderen Standort mit dem durchgeleiteten Biogas auf Erdgasqualität betrieben werden. Dies ist z.B. dann sinnvoll, wenn am Ort der Biogasanlage keine Möglichkeit zur Abwärmeverwertung besteht, welche an einem anderen Standort aber gegeben ist. Nachfolgend wird aufbauend auf die vorangegangenen Beispiele eine Fernabnahme von Biogas untersucht. Dabei befindet sich das Erdgasnetz, das zur Übertragung des Biogases zum Motor-BHKW notwendig ist, innerhalb der nach **Abbildung 4** aufgezeigten Bilanzgrenze. Es werden folgende Annahmen getroffen:

- Es gibt keine Leitungs- und Transportverluste innerhalb des Erdgasnetzes von der Biogasanlage zum Motor-BHKW.
- Das BHKW hat im konstanten Erdgasbetrieb mit 37 % einen um 2 % höheren Wirkungsgrad als das BHKW im Biogasbetrieb.
- Der durchschnittliche Wirkungsgrad für die Wärmeauskopplung im BHKW beträgt 45 %.
- Am Standort des BHKW kann die Wärme vollständig genutzt werden.
- Ein besteht ein Eigenenergiebedarf der Biogasanlage in Höhe von $2,8 \text{ kWh}_{\text{el}}$ und $18 \text{ kWh}_{\text{th}}$.

Abbildung 7 zeigt das Energieflussdiagramm für die getroffenen Annahmen.

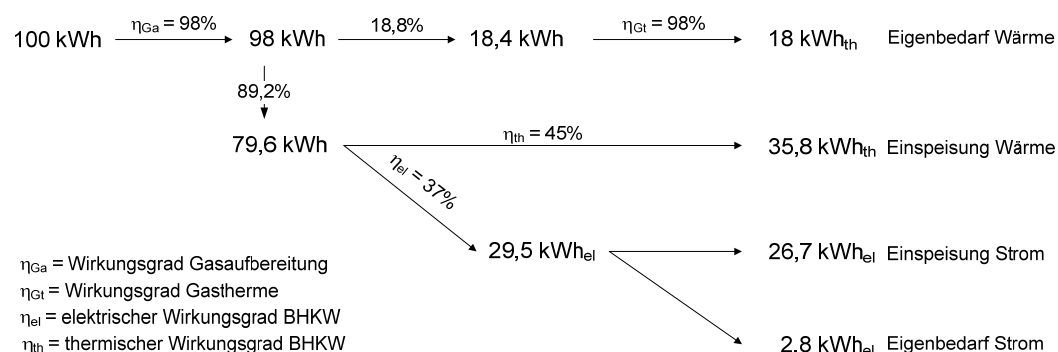


Abbildung 7: Energieflussdiagramm für die Fernabnahme bei Direkteinspeisung von Biogas in einem Motor-BHKW

Die an der Biogasanlage eingespeiste Biogasmenge mit einem Energiegehalt von $79,6 \text{ kWh}$ wird im BHKW bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 37 % zu $29,5 \text{ kWh}_{\text{el}}$ umgewandelt. Zur Deckung des Eigenbedarfs der Biogasanlage müssen davon $2,8 \text{ kWh}_{\text{el}}$ abgezogen werden, somit verbleiben $26,7 \text{ kWh}_{\text{el}}$ als Nutzenergie. Bei

einem thermischen Wirkungsgrad von 45 % entstehen gleichzeitig 35,8 kWh_{th}, die vollständig genutzt werden können, da der Wärmebedarf der Biogasanlage bereits vor der Einspeisung in das Erdgasnetz gedeckt wurde.

Durch die Stromeinspeisung von 26,7 kWh_{el} können im Vergleich zum erdgasbetriebenen GuD-Kraftwerk bei 432 g_{CO2}/kWh_{el} Emissionen in Höhe von 11.534 g_{CO2} eingespart werden. Weitere Emissionsminderungen in Höhe von 9.093 g_{CO2} entstehen durch die Abwärmenutzung von 35,8 kWh_{th} bei 254 g_{CO2}/kWh_{th}. In der Summe können durch die direkte Gaseinspeisung mit Fernabnahme bis zum Einspeisepunkt des BHKW pro Kilowattstunde Energiegehalt im Biogas 206 g_{CO2} vermieden werden. Der Gesamtwirkungsgrad nach **Formel 3** beträgt 62,5 %.

3.4 Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle im dezentralen Betrieb

Im Gegensatz zum Motor-BHKW können Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen (MCFC) bei der Verstromung von Biogas wesentlich höhere elektrische Wirkungsgrade erzielen (Schmack & Nusko 2004). Zudem koppeln diese Abwärme auf einem Temperaturniveau von mehreren Hundert Grad Celsius aus, so dass die Bandbreite möglicher Wärmenutzungskonzepte erheblich gesteigert werden kann.

Die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle der Firma MTU kann im Erdgasbetrieb einen elektrischen Wirkungsgrad von 47 % erreichen, wobei Abwärme mit ca. 400 °C anfällt. Der thermische Wirkungsgrad dieser Brennstoffzelle beträgt 34 %. In der Praxis existieren mehrere solcher Anlagen, die erfolgreich mit Erdgas betrieben werden (MTU 2006). Da bislang keinerlei Erfahrungen zum dauerhaften Biogasbetrieb vorhanden sind und die MCFC auch deutlich höhere Anforderungen an die Gasqualität stellt, wird davon ausgegangen, dass eine Aufreinigung des Biogases auf Erdgasqualität zum Betrieb an einer Biogasanlage notwendig ist. Es werden folgende Annahmen getroffen:

- Die MCFC hat einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von 47 % bei der Verstromung.
- Die MCFC hat einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von 34 % bei der Wärmeauskopplung.
- Es tritt ein Methanverlust in Höhe von 2 % bei der Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität auf.
- Der Eigenenergiebedarf der Biogasanlage beträgt 2,8 kWh_{el} und 18 kWh_{th}.

Abbildung 8 zeigt den Energiefluss für die Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität mit der anschließenden Nutzung in der MCFC bei einer Inputmenge von 100 kWh_{Biogas} unter Zugrundelegung der zuvor getroffenen Annahmen.

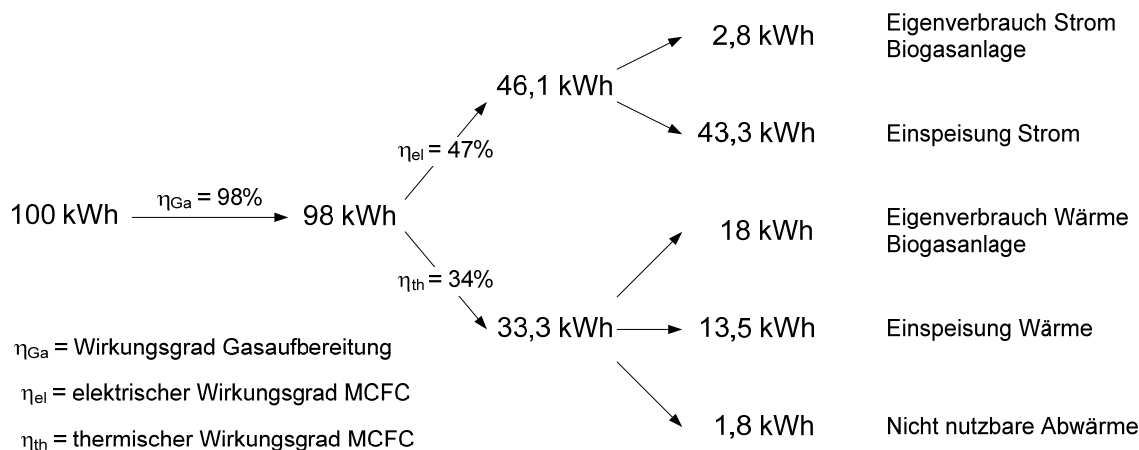


Abbildung 8: Energieflussdiagramm einer Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) bei 100 kWh Energieinput im Rohbiogas.

Von 100 kWh Energiegehalt des aus dem Fermenter kommenden Biogases werden unter oben genannten Annahmen 98 kWh in Form von Biogas auf Erdgasqualität umgewandelt. Bei der energetischen Verwertung in der MCFC werden bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 47 % davon 46,1 kWh in Strom umgewandelt. 43,3 kWh_{el} können in das Stromnetz eingespeist werden, 2,8 kWh_{el} werden für den Eigenverbrauch der Biogasanlage benötigt. Auf der Wärmeseite werden 33,3 kWh_{th} ausgekoppelt, von denen 18 kWh_{th} für die Fermenterbeheizung benötigt werden. Unter der Annahme, dass 13,5 kWh_{th} als Nutzwärme vor Ort verwendet werden, verbleiben 1,8 kWh_{th} als Abwärme (vgl. Kap. 3.1).

Bei einem Kraftwerksmix von 653 g_{CO2}/kWh_{el} und einer Einspeisung von 43,3 kWh_{el} können Emissionen in Höhe von 28.275 g_{CO2} vermieden werden. Bei der Einspeisung von 13,5 kWh_{th} als Nutzwärme mit 254 g_{CO2}/kWh_{th} fallen weitere Einsparungen in Höhe von 3.429 g_{CO2} an. Im Vergleich zur konventionellen Energieversorgung durch den Kraftwerksmix können so bei der dezentralen Energieversorgung in Biogasanlagen mit der MCFC bis zum Punkt der Einspeisung pro Kilowattstunde Energiegehalt im Biogas etwa 317 g_{CO2} eingespart werden. Dies entspricht einem Systemwirkungsgrad nach **Formel 3** von 56,8 %.

Geht man abweichend von den getroffenen Annahmen davon aus, dass am Anlagenstandort keine Abwärme genutzt werden kann, so beträgt die Emissionseinsparung gegenüber dem Referenzsystem nur noch 283 g_{CO2}/kWh_{Biogas}.

3.5 Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle bei Fernabnahme

Die MCFC kann natürlich auch wie das in Kap. 3.1 beschriebene Motor-BHKW an einem Standort außerhalb der Biogasanlage betrieben werden. Dazu müssen die oben genannten Annahmen erweitert werden:

- Es treten keine Leitungs- und Transportverluste innerhalb des Erdgasnetzes von der Biogasanlage zur MCFC auf.

- Am Standort der MCFC kann die Wärme vollständig genutzt werden.

Daraus leitet sich das in **Abbildung 9** dargestellte Energieflussdiagramm ab.

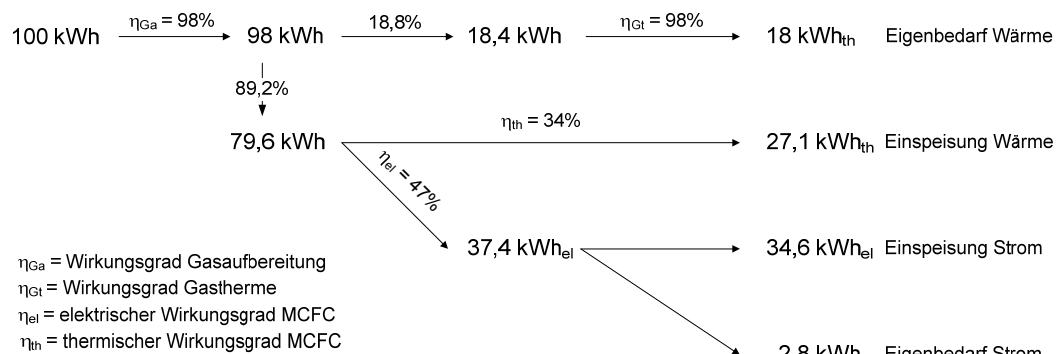


Abbildung 9: Energieflussdiagramm einer Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) bei Fernabnahme von auf Erdgasqualität aufbereitetem Biogas.

Bei der Direkteinspeisung von Biogas auf Erdgasqualität bleiben bei 100 kWh Energiegehalt im Rohbiogas noch 79,6 kWh am Einspeisepunkt übrig (vgl. Kap. 3.2). Ohne Leitungs- und Transportverluste kann daraus in der MCFC bei einem thermischen Wirkungsgrad von 34 % eine Nutzwärmemenge von 27,1 kWh_{th} erzeugt werden. Da es keine Restriktion bezüglich der Wärmeabnahme gibt, kann diese Menge vollständig genutzt werden. Durch den elektrischen Wirkungsgrad in Höhe von 47 % können 37,4 kWh_{el} produziert werden, von denen der Eigenstromanteil der Biogasanlage in Höhe von 2,8 kWh_{el} abzuziehen ist. Es verbleiben 34,6 kWh_{el} zur Einspeisung in das Stromnetz.

Mit einer Einspeisemenge von 34,6 kWh_{el} können bei einem Emissionsfaktor von 432 g_{CO2}/kWh_{el} Emissionen in Höhe von 14.947 g_{CO2} eingespart werden. Durch die Nutzung der Wärme in Höhe von 27,1 kWh_{th} kommen bei 254 g_{CO2}/kWh_{th} weitere 6.883 g_{CO2} hinzu. Insgesamt lassen sich dadurch 218 g_{CO2}/kWh_{Biogas} einsparen. Der Systemwirkungsgrad nach **Formel 3** beträgt 61,7 %.

3.6 Hybridsystem im dezentralen Betrieb

Die Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) erreicht so hohe Abwärmemetemperaturen, dass diese zum Betrieb einer nachgeschalteten Mikroturbine ausreichen. Solche Hybridsysteme erreichen zum einen sehr hohe elektrische Wirkungsgrade, zum anderen kann die Abwärme der Mikroturbine weiterhin für Wärmeanwendungen verwendet werden.

Bei der Festkeramik-Brennstoffzelle der Firma Siemens können bei einem 250 kW Aggregat elektrische Wirkungsgrade von 55 % erreicht werden. Die Abwärme dieses Hybridsystems ist für Heizzwecke weiterhin ausreichend hoch. Die Festkeramik-Brennstoffzelle ist für den Betrieb mit Erdgas ausgelegt, so dass auch in diesem Fall

zunächst eine Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität notwendig ist (Siemens 2006). Es werden folgende Annahmen getroffen:

- Es wird ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 55 % für die Verstromung in der SOFC angesetzt.
- Es wird ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 25 % für die Wärmeauskopplung in der SOFC angesetzt.
- Die Methanverluste bei der Aufbereitung auf Erdgasqualität werden in Höhe von 2 % angenommen.
- Der Eigenenergiebedarf der Biogasanlage beträgt $2,8 \text{ kWh}_{\text{el}}$ und $18 \text{ kWh}_{\text{th}}$.

Abbildung 10 zeigt den Energiefluss für die Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität mit der anschließenden Nutzung in der SOFC bei einer Inputmenge von $100 \text{ kWh}_{\text{Biogas}}$ unter Zugrundelegung der zuvor getroffenen Annahmen.

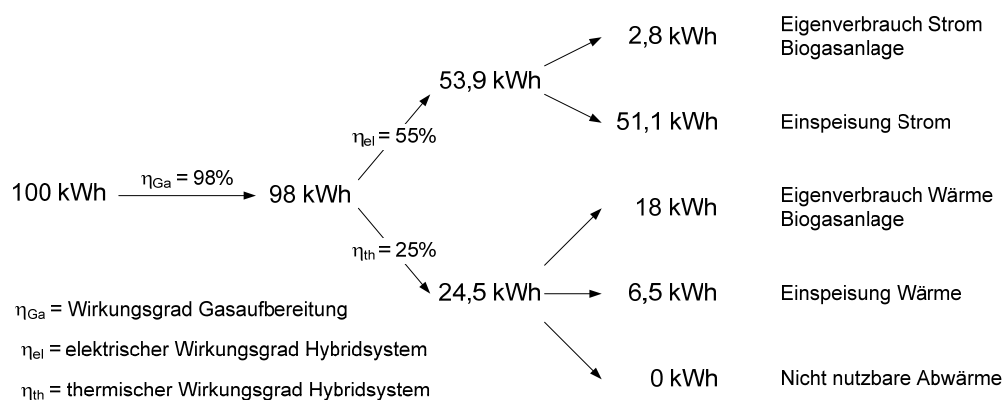


Abbildung 10: Energieflussdiagramm einer Biogasanlage mit einem Festoxid-Brennstoffzellen-Mikroturbinen-Hybridssystem.

Bei der Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität verbleibt von 100 kWh im Rohbiogas ein Energiegehalt von 98 kWh . Davon werden in der SOFC bei der energetischen Verwertung $53,9 \text{ kWh}$ in Strom umgewandelt, von denen der Eigenstrombedarf der Biogasanlage in Höhe von $2,8 \text{ kWh}_{\text{el}}$ abzuziehen ist. Es verbleiben $51,1 \text{ kWh}_{\text{el}}$ zur Einspeisung in das Stromnetz. Im Wärmebereich werden $24,5 \text{ kWh}_{\text{th}}$ ausgekoppelt, von denen $18 \text{ kWh}_{\text{th}}$ für die Fermenterbeheizung benötigt werden. Mit den restlichen $6,5 \text{ kWh}$ kann das Abwärmenutzungspotenzial an der Biogasanlage von $13,5 \text{ kWh}_{\text{th}}$ nur teilweise genutzt werden, so dass keine Überschusswärme an die Umgebung abgegeben werden muss.

Durch die Einspeisung von $51,1 \text{ kWh}_{\text{el}}$ können Emissionen in Höhe von $33.368 \text{ g}_{\text{CO}_2}$ bei einem Kraftwerksmix von $653 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$ vermieden werden. Bei der Einspeisung von $6,5 \text{ kWh}_{\text{th}}$ Nutzwärme bei einem Emissionsfaktor von $254 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{th}}$ können weitere Einsparungen in Höhe von $1.651 \text{ g}_{\text{CO}_2}$ generiert werden. In Summe können so pro Kilowattstunde Energiegehalt im Biogas etwa $350 \text{ g}_{\text{CO}_2}$ eingespart werden. Der Systemwirkungsgrad nach **Formel 3** beträgt in diesem Fall $57,8 \%$.

Geht man abweichend von den getroffenen Annahmen davon aus, dass am Anlagenstandort keine Nutzwärme abgenommen werden kann, beträgt die Emissionseinsparung gegenüber dem Referenzsystem nur noch $334 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{Biogas}}$.

3.7 Hybridsystem bei Fernabnahme

Da die SOFC mit angekoppelter Mikroturbine für den Einsatz mit Erdgas ausgelegt ist, kann diese auch am Erdgasnetz betrieben werden. Eine Fernabnahme von auf Erdgasqualität aufbereitetem Biogas ist auch für dieses Beispiel möglich. Dazu werden folgende Annahmen getroffen:

- Es treten keine Leitungs- und Transportverluste innerhalb des Erdgasnetzes von der Biogasanlage zur SOFC auf.
- Am Standort der SOFC kann die Wärme vollständig genutzt werden.

Daraus ergibt sich das in **Abbildung 11** dargestellte Energieflussdiagramm.

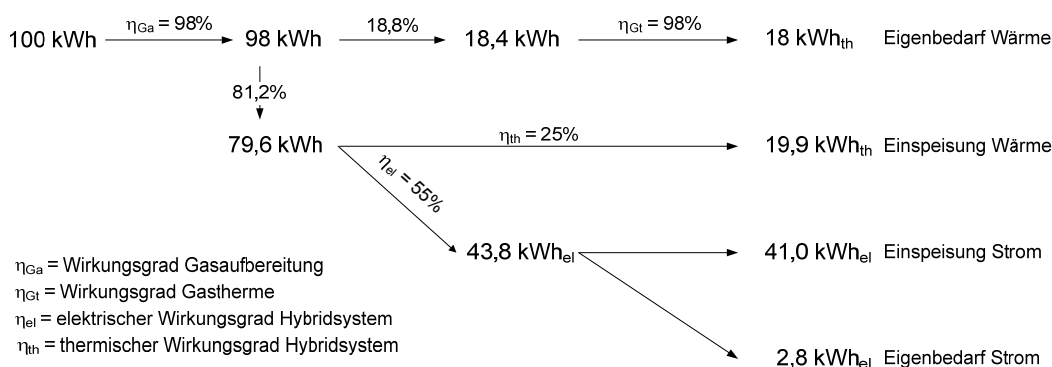


Abbildung 11: Energieflussdiagramm eines Hybridsystems aus Festoxid-Brennstoffzelle und Mikroturbine bei Fernabnahme von auf Erdgasqualität aufbereitetem Biogas.

Von den 98 kWh, die nach der Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität verbleiben, müssen 18,4 kWh abgezogen werden, damit die zur Fermenterbeheizung benötigte Energie von 18 kWh_{th} bereitgestellt werden kann. Die übrigen 79,6 kWh können in das Erdgasnetz eingespeist werden. In dem Hybridsystem werden daraus 19,9 kWh_{th} bei einem thermischen Wirkungsgrad von 25 % erzeugt, die im vorliegenden Beispiel einer vollständigen Nutzung unterliegen. Unter Berücksichtigung des elektrischen Wirkungsgrades von 55 % und dem Abzug der für die Biogasanlage notwendigen Energie verbleiben 41 kWh_{el} zur Einspeisung in das Stromnetz.

Bei einem Referenzemissionsfaktor von $432 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$ können für die erzeugten 41 kWh_{el} Emissionen in Höhe von $17.712 \text{ g}_{\text{CO}_2}$ gutgeschrieben werden. Für die Produktion von 19,9 kWh_{th} können mit dem Emissionsfaktor von $254 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{th}}$ zusätzlich $5.055 \text{ g}_{\text{CO}_2}$ angerechnet werden. Daraus ergibt sich ein Einsparpotenzial von $228 \text{ g}_{\text{CO}_2}$ pro Kilowattstunde Energiegehalt im Rohbiogas. Der Systemwirkungsgrad nach **Formel 3** beträgt 60,9 %.

3.8 Elektrolytmembran-Brennstoffzelle bei Fernabnahme

Neben den größeren Anlagen zur dezentralen Stromerzeugung gibt es auch Bestrebungen zur Entwicklung von Brennstoffzellen-Systemen für die Hausenergieversorgung. Dabei handelt es sich um wesentlich kleinere Anlagen, die bedingt durch ihre Baugröße und der primären Anforderung Wärme zu erzeugen geringere elektrische Wirkungsgrade haben. Durch Vernetzung und zentraler Steuerung einer Vielzahl solcher Geräte kann man aber ein so genanntes „virtuelles Kraftwerk“ errichten, mit dem dezentral Energie mit KWK erzeugt wird. Da diese Geräte zum Betrieb am Erdgasnetz entwickelt werden, soll auch hier eine mögliche Fernabnahme von Biogas auf Erdgasqualität untersucht werden.

Die Firma Vaillant entwickelt eine erdgasbetriebene Elektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC) mit einer Leistung unter 5 kW_{el} (Vaillant 2006). Dieses Gerät kann wärmegeführt betrieben werden, so dass eine 100 %-ige Abwärmenutzung möglich ist. Der dabei produzierte Strom kann zur Deckung des Eigenbedarfs genutzt werden oder in das Stromnetz eingespeist werden. Die Untersuchung geht von folgenden Annahmen aus:

- Der Wirkungsgrad der Aufbereitung beträgt 98 %, d.h. der Methanverlust bei der Aufbereitung wird mit 2 % angesetzt.
- Es entstehen keine Leitungs- und Transportverluste im Erdgasnetz.
- Es wird ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 35 % für die Verstromung in der PEMFC angesetzt (Vaillant 2006).
- Es wird ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 45 % für die Wärmeauskopplung der PEMFC angesetzt (Vaillant 2006).
- 100 %-ige Abwärmenutzung durch wärmegeführten Betrieb.
- Der Eigenenergiebedarf der Biogasanlage beträgt $2,8 \text{ kWh}_{\text{el}}$ und $18 \text{ kWh}_{\text{th}}$.

Daraus ergibt sich das in **Abbildung 12** dargestellte Energieflussdiagramm.

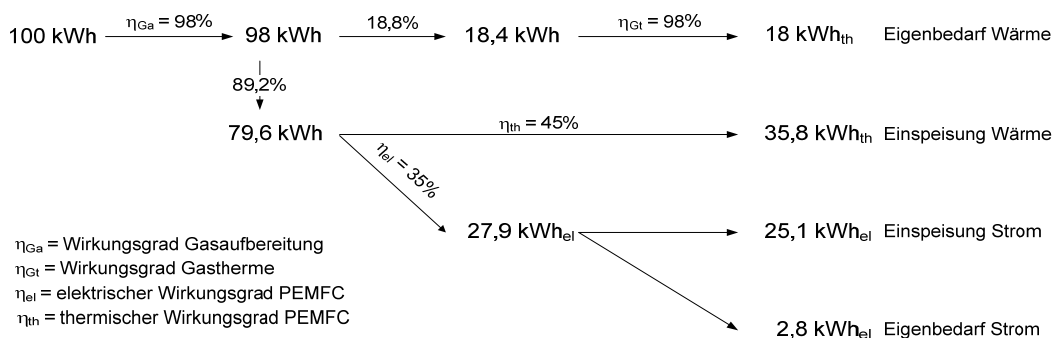


Abbildung 12: Energieflussdiagramm für die Fernabnahme von auf Erdgasqualität aufbereitetem Biogas in einem Elektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC) System für die Hausenergieversorgung.

Bei der hier dargestellten Fernabnahme verbleiben von den 100 kWh Energiegehalt im Biogas 98 kWh nach der Aufreinigung auf Erdgasqualität. Davon werden 18 kWh für den Eigenwärmebedarf des Fermenters benötigt, so dass bei einem Wirkungsgrad von 98 % der Brennwerttherme, die den Fermenter versorgt, 18,4 kWh zur Wärmeerzeugung abgezweigt werden müssen. Damit verbleiben 79,6 kWh zur Einspeisung in das Erdgasnetz und stehen der PEMFC durch die Annahme, dass keine Leitungs- und Transportverluste anfallen, vollständig zur Verfügung. In der Brennstoffzelle werden bei einem thermischen Wirkungsgrad von 45 % daraus 35,8 kWh_{th} erzeugt, die als Nutzenergie zur Verfügung stehen. Bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 35 % entsteht gleichzeitig elektrische Energie in Höhe von 27,9 kWh_{el}, von denen 2,8 kWh_{el} für den Eigenbedarf der Biogasanlage abzuziehen sind. Letztlich können 25,1 kWh_{el} an das Stromnetz abgegeben werden.

Bei einer Stromeinspeisung von 25,1 kWh_{el} können bei 432 g_{CO2}/kWh_{el} Emissionen in Höhe von 10.843 g_{CO2} eingespart werden. Weitere Emissionsminderungen in Höhe von 9.093 g_{CO2} entstehen durch die Abwärmenutzung von 35,8 kWh_{th} bei 254 g_{CO2}/kWh_{th}. In der Summe können durch die direkte Gaseinspeisung mit Fernabnahme bis zum Einspeisepunkt des BHKW pro Kilowattstunde Energiegehalt im Biogas 199 g_{CO2} vermieden werden. Der Gesamtwirkungsgrad nach **Formel 3** beträgt 60,9 %.

4 Ergebnisse

Trotz der stark vereinfachten Annahmen sind gewisse Tendenzen im Hinblick auf das Emissionsverhalten der untersuchten Systeme deutlich erkennbar. Gemessen an den Referenzsystemen der konventionellen Energieerzeugung generieren alle untersuchten Systeme unter Verwendung von Biogas sehr unterschiedliche Emissionseinsparungen.

Tabelle 32: Ergebnisse der Emissionseinsparungen und Systemwirkungsgrade der untersuchten Systeme Brennstoffzellen-Gasturbinen-Hybridsystem (SOFC), Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC), Blockheizkraftwerk (BHKW), Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEMFC) und Direkteinspeisung von Biogas auf Erdgasqualität (Direkteinspeisung) bei Betrieb am Biogasanlagen-Standort (dezentral) sowie bei Betrieb an einem anderen Standort als dem der Biogasanlage (Fernabnahme) im Vergleich.

<i>System</i>	<i>Gesamtwirkungsgrad</i>	<i>Emissionseinsparung pro kWh_{Rohbiogas} mit Abwärmenutzung</i>	<i>Emissionseinsparung pro kWh_{Rohbiogas} ohne Abwärmenutzung</i>
SOFC dezentral	57,8%	350 gCO ₂	334 gCO ₂
MCFC dezentral	56,8%	317 gCO ₂	283 gCO ₂
BHKW dezentral	45,7%	245 gCO ₂	210 gCO ₂
SOFC Fernabnahme	60,9%	228 gCO ₂	-
MCFC Fernabnahme	61,7%	218 gCO ₂	-
BHKW Fernabnahme	62,5%	206 gCO ₂	-
PEMFC Fernabnahme	60,9%	199 gCO ₂	-
Direkteinspeisung	71,3%	187 gCO ₂	-

In der **Tabelle 32** sind die Ergebnisse der Untersuchung zusammen gefasst und absteigend nach ihrem Beitrag zur Emissionseinsparung geordnet. Am besten schneiden in der vorgenommenen Untersuchung die dezentralen Systeme, die direkt an der Biogasanlage betrieben werden, ab. Dies gilt, mit Ausnahme des Motor-BHKW, selbst für den Fall, dass an der Biogasanlage keine Nutzwärme abgenommen werden kann. Innerhalb dieser Gruppe ist das Hybridsystem den anderen Systemen überlegen.

Bei der Fernabnahme, bei dem die Energieerzeugungssysteme mit auf Erdgasqualität aufbereitetem Biogas an einem anderen Standort als dem der Biogasanlage versorgt werden, können im Vergleich zu den Referenzsystemen weitaus weniger Emissionen eingespart werden, als bei der dezentralen Energieerzeugung. Das gilt selbst für den Fall, in dem für den produzierten Strom aus der Fernabnahme der Emissionsfaktor des Kraftwerksmixes herangezogen wird. Das Hybridsystem aus SOFC und Gasturbine ist auch in diesem Fall besser als die anderen Systeme. Des Weiteren schneiden große Systeme mit einem höheren elektrischen Wirkungsgrad besser ab, als kleine Systeme (PEMFC zur Hausenergieversorgung).

Am wenigsten Emissionen werden in dem hier angestellten Vergleich eingespart, wenn Biogas auf Erdgasqualität in das Erdgasnetz eingespeist wird, ohne dass es einen konkreten Abnehmer gibt, dem das Biogas zur energetischen Verwendung zugeführt wird. Gleichzeitig ist aber der Gesamtwirkungsgrad, der beschreibt, wie hoch der Nutzenergieanteil am Energieinput ist, der größte unter allen untersuchten Systemen.

Es lässt sich feststellen, dass die Höhe der möglichen Minderungen im Wesentlichen von dem Verhältnis von Strom- zu Wärmeproduktion abhängt. Je mehr Strom ein System produziert, desto besser steht es in Hinblick auf sein Emissionsminderungsvermögen dar. Grund dafür ist, dass der Referenzfaktor für die Stromerzeugung deutlich höher ausfällt, als für die Wärmeproduktion. Beim Systemwirkungsgrad verhält es sich genau umgekehrt. Je mehr anteilige Wärme ein System produziert, desto besser ist dessen Verhältnis von Energieoutput zu -input. Bei dem Systemvergleich BHKW, MCFC und Hybridsystem kommt dies allerdings nicht zum tragen, da eine mögliche Nutzwärmeabnahme durch die Annahmen gedeckelt wurden. Hier verändert sich von System zu System prinzipiell nur der elektrische Wirkungsgrad. Einen deutlichen Einfluss kann man aber bei der Direkteinspeisung von Biogas erkennen. Hier führt dies zu dem paradoxen Ergebnis, dass das System mit dem höchsten Systemwirkungsgrad die geringsten Treibhausgasminderungen generiert.

5 Diskussion

Da die Höhe des Kraftwerksmixes einen erheblichen Einfluss auf die errechneten Emissionsminderungen hat, stellt das hier vorgestellte Ergebnis nur eine Momentaufnahme dar. Mit steigendem Anteil regenerativer Energien und einem Wechsel zu emissionsärmeren Brennstoffen bzw. Verfahren in der deutschen Stromproduktion sinkt der Emis-

sionsausstoß des Kraftwerksmixes, so dass sich die Aussagen über die Emissionsvermeidungsintensität der hier vorgestellten Systeme verändern können.

Abbildung 13 zeigt die Sensitivität eines sinkenden Kraftwerksmixes auf die spezifischen Emissionseinsparungen der in den Beispielen verwendeten Einsatzmöglichkeiten für Biogas auf. Während die spezifischen Emissionsminderungen für die dezentralen Systeme mit abnehmendem Emissionsfaktor für den Kraftwerksmix beständig sinken, bleiben die Systeme bei der Fernabnahme zunächst konstant. Grund dafür ist, dass bei der Fernabnahme mit dem konstanten Emissionsfaktor für die Erzeugung von Strom im GuD-Kraftwerk gerechnet wird. Sinkt der Emissionsfaktor des Kraftwerksmixes unterhalb des Emissionsfaktors für das GuD-Kraftwerk, wird auch bei diesen Systemen mit dem Emissionsfaktor des Kraftwerksmixes kalkuliert. Aufgrund dieses Umstands ergeben sich in der **Abbildung 13** die plötzlich abknickenden Kurven für die Systeme mit der Fernabnahme.

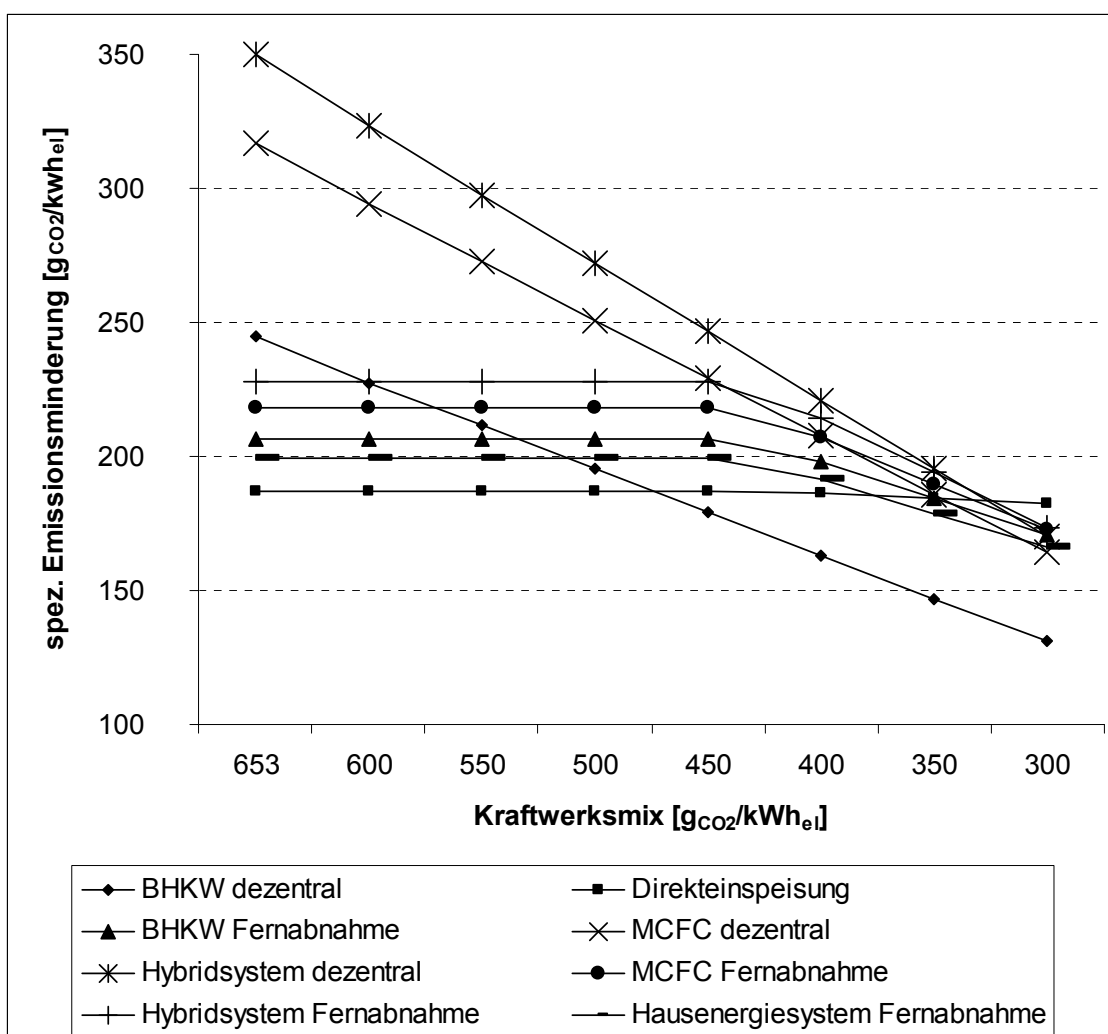


Abbildung 13: Einfluss des sinkenden Kraftwerksmixes auf die spezifischen CO₂-Emissionseinsparungen der betrachteten Verwendungsmöglichkeiten für Biogas.

Betrachtet man mit dem Motor-BHKW die heute übliche Technologie zur Verstromung von Biogas, dann wird deutlich, dass die direkte Gaseinspeisung von Biogas in das Erd-

gasnetz mit anschließender Nutzung im Motor-BHKW erst bei einem Emissionsfaktor des Kraftwerksmixes, der unter $550 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$ liegt, Emissionsvorteile bietet. Die MCFC und das Hybridsystem bieten bei der Fernabnahme bereits bei einem Emissionsfaktor des Kraftwerksmixes von ca. $575 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$ bzw. $600 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$ dieselben Emissionsminderungsoptionen. Deutlich höhere Emissionsminderungen lassen sich bei diesen Systemen allerdings auch bei weiter sinkendem Kraftwerksmix durch die dezentrale Anwendung erreichen. Beim Hybridsystem muss der Emissionsfaktor des Kraftwerksmixes schon unterhalb von $350 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$ fallen, damit das System bei der Fernabnahme zu Emissionsvorteilen kommt. Bei der MCFC stellt sich dieser Punkt bereits bei einem Emissionsfaktor des Kraftwerksmixes von $400 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$ ein.

Die direkte Einspeisung von Biogas auf Erdgasqualität ohne vertraglichen Abnehmer sowie die Verwendung von Biogas aus dem Erdgasnetz in der Hausenergieversorgung, stellen nach **Abbildung 13** keine Alternative zu den anderen betrachteten Systemen im Hinblick auf Emissionseinsparungen dar. Ihr Minderungspotenzial ist im Vergleich zu gering. Selbst wenn man zukünftig eine vermehrte Stromproduktion aus Erdgas unterstellt, da Erdgas unter allen fossilen Energieträgern derjenige mit dem geringsten Treibhausgaspotenzial ist und somit einen Anreiz zum Brennstoffwechsel gibt, würde die Kurve für die Direkteinspeisung allenfalls eine leichte Steigung erfahren.

Aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse lässt sich kein entscheidender Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse ableiten. Die dezentralen Systeme, die sich in der Untersuchung behaupten konnten, werden dies auch noch eine ganze Weile bei sinkendem Emissionsfaktor für den Kraftwerksmix tun. Da sich dieser nur sehr langsam durch die sich wandelnde Energieversorgungsstruktur ändert¹⁰, ist die Direkteinspeisung von Biogas in das Erdgasnetz unter Klimagesichtspunkten nicht die erste Wahl. Stattdessen stellt die dezentrale Energieerzeugung am Ort der Biogasanlage höhere Emissionsminderungspotenziale in Aussicht. Diese lassen sich durch die Anpassung und den Einsatz innovativer Technologien, wie beispielsweise der Brennstoffzelle oder von Hybridsystemen weiter steigern. Aus diesem Grund sollte die Forschung zum Einsatz von Brennstoffzellentechnologie in der Biogasverwertung weiter vorangetrieben werden.

¹⁰ Der für das Jahr 2020 prognostizierte Kraftwerksmix beträgt $563 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$ (Fritsche 2003).

Epilog

Die energetische Nutzung von Biomasse stellt eine Möglichkeit für Landwirte dar, mit der sie Treibhausgas-Emissionen mindern und gleichzeitig neue Erwerbsfelder besetzen könnten. Da die Produktion von Energie aus Biomasse in vielen Bereichen monetär noch nicht mit der konventionellen Energieerzeugung konkurrieren kann, ist eine breite Anschubfinanzierung zur Förderung notwendig. In diesem Sinne hat das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) einen sinnvollen Weg aufgezeigt. Dennoch bleibt die Frage, in wie fern die derzeit bestehenden Förderinstrumente des EEG zur Maximierung der Minderung von Treibhausgas-Emissionen beitragen. Im Biogasbereich sind drei wesentliche Punkte, die sich in der Praxis finden, kritisch zu betrachten:

- Die undifferenzierte Förderung von nachwachsenden Rohstoffen;
- Die undifferenzierte Förderung innovativer Technologien;
- Das zu geringe Vergütungsniveau von Nutzwärme im Verhältnis zum Strom.

Die Förderung des Energiepflanzenanbaus durch die Novellierung des EEG im Jahr 2004 hat zu einem regelrechten Boom beim Bau von Biogasanlagen geführt, die ausschließlich mit nachwachsenden Rohstoffen betrieben werden. Auf Grundlage der in dieser Arbeit aufgezeigten Potenzialanalyse zur Minderung von Treibhausgas-Emissionen stellt die Nutzung von Nachwachsenden Rohstoffen in Biogasanlagen aber nicht den optimalen Weg dar. Stattdessen wäre der Anbau von Energiepflanzen zur Festbrennstoffnutzung unter Klimagesichtspunkten sinnvoller.

Die Förderung des Energiepflanzenanbaus wirft darüber hinaus weitere Probleme auf. Sie hat weit reichende Konsequenzen auf die Höhe der Flächenpachten und beeinflusst somit auch die Rahmenbedingungen zur Produktion von Nahrungsmitteln. Des Weiteren verdrängen in der Praxis Energiepflanzen zunehmend vorhandenen Wirtschaftsdünger als Inputsubstrat in Biogasanlagen, da deren Einsatz oftmals wirtschaftlich interessanter ist. Diese Entwicklung ist unter Klimagesichtspunkten nicht hinnehmbar, da gerade die Verwertung von Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen zu zusätzlichen Emissionsminderungen während der Lagerung und Ausbringung führt. Aus diesem Grund sollte überprüft werden, ob eine Förderung von Nachwachsenden Rohstoffen bei Biogasanlagen durch das EEG unterschiedliche Vergütungssätze für Wirtschaftsdünger und Energiepflanzen aufweisen sollte.

Das EEG sieht in seiner novellierten Form von 2004 einen Innovationsbonus für den Betrieb einer thermochemischen Vergasung, Trockenfermentation, Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität, Brennstoffzellen, Gasturbinen, Dampfmaschinen, Organic-Rankine-Anlagen und Mehrstoffgemisch-Anlagen vor. Diese Technologien unterscheiden sich hinsichtlich des erforderlichen Investitionsbedarfs zum Teil erheblich vonein-

ander. In der Praxis besteht ein wirtschaftliches Interesse daran, den Innovationsbonus mit möglichst geringem Investitionsaufwand „mitzunehmen“.

Anstelle der Förderung von individuellen innovativen Anlagenkonzepten haben sich dadurch teilweise Standardlösungen entwickelt, die im Hinblick auf ihren Innovationscharakter fragwürdig erscheinen. Dies gilt vor allem für einen großen Teil der mit nachwachsenden Rohstoffen betriebenen Trockenfermentations-Anlagen. In diesen wird der Trockenmassegehalt des Inputsubstrats durch Vermischen mit vergorenem Material so herunter gesetzt, dass es mit den herkömmlichen Techniken der Nassfermentation vergoren werden kann. Aus klimapolitischer Sicht ist dieses Konzept aus zwei Gründen zu hinterfragen. Zum einen kann in einer solchen Anlage keine vorhandene Gülle vergoren werden, da sonst die zur Erlangung des Innovationsbonus einzuhaltenen Trockenmassegehalte des Inputsubstratgemisches nicht erreicht werden können. Zum anderen sind Subventionen dieser vermeintlichen Innovation an anderer Stelle zur Senkung von Treibhausgas-Emissionen besser aufgehoben. Das EEG sollte deswegen in Bezug auf die zu fördernden Systeme klarer definiert werden.

Existierende Brennstoffzellen-Systeme sind dagegen noch so teuer, dass sie auch unter Einbeziehung des Innovationsbonus wirtschaftlich nicht zu betreiben sind. Diese Arbeit zeigt aber, dass gerade diese aufgrund des vergleichsweise hohen elektrischen Wirkungsgrades ein signifikant höheres Treibhausgasmindeungspotenzial als beispielsweise das Motor-BHKW oder die Direkteinspeisung von Biogas auf Erdgasqualität aufweisen. Aus diesem Grund sollte die Förderung von Innovationen im EEG zukünftig so ausgerichtet sein, dass die Förderhöhe von der verwendeten Technologie und dem Emissionsvermeidungspotential abhängig ist.

Die Nutzung der anfallenden Abwärme stellt in vielen Biogasanlagen in der Praxis ein ungelöstes Problem dar. Obwohl das Treibhausminderungspotenzial der Wärmenutzung aus Biomasse wesentlich geringer als bei der Stromerzeugung ist, sollte auf diesen Beitrag keinesfalls verzichtet werden. Eine Förderung regenerativer Energiesysteme ohne schlüssiges Wärmekonzept ist klimapolitisch widersinnig. Zwar sparen auch solche Anlagen im Vergleich zur konventionellen Energieerzeugung im zentralen Kraftwerk noch eine Menge THG-Emissionen pro Kilowattstunde-Endenergie ein, das mögliche Potenzial liegt aber mit Wärmenutzung deutlich höher. Da die Förderung regenerativer Energien eine vergleichsweise kostenintensive Maßnahme zur Minderung von THG-Emissionen darstellt, ist es der Gesellschaft gegenüber nicht zu verantworten, wenn Vorhaben finanziert werden, bei denen vorhandene Potenziale ungenutzt bleiben.

Geschieht dies trotzdem, besteht die Gefahr, dass das EEG mehr einem Investitions- und Subventionsprogramm gleicht, als einem gezielten, effizienten und zukunftsweisenden Umweltinstrument. Für einen verbesserten Anreiz sollte die Wärmevergütung erhöht und gleichzeitig die Stromvergütung abgeschmolzen werden. Die Förderung muss letztlich so ausgelegt sein, dass Anlagen ohne schlüssiges Wärmekonzept unwirtschaftlich sind.

Die genannten Entwicklungen in der Praxis zeigen einige Schwachstellen im EEG auf, die durch eine Novellierung behoben werden sollten. Die Zielsetzung der Förderpolitik sollte präziser benannt werden und so zu einem effektiveren Einsatz der Mittel führen. Die anfängliche Förderung in der Breite durch das EEG ist während der Einführungsphase sicherlich gerechtfertigt. Mittlerweile ist allerdings der Zeitpunkt erreicht, wo eine gezieltere Unterstützung der aufgezeigten zukunftssträchtigen Konzepte sinnvoll ist und eine Realisierung in der Praxis technisch machbar erscheint.

Literaturverzeichnis

- AGEB – Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (Hrsg.) (2002): Energiebilanz der Bundesrepublik 2002. In: http://www.ag-energiebilanzen.de/cms/verwaltung/files.php?path=../../daten/1158677324_80.135.76.54.xls&name=Bilanz02dv.xls&mime=application/vnd.ms-excel, Stand 07.12.06.
- Amon, T.; Döhler, H. (2005): Qualität und Verwertung des Gärrestes. In: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR): Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung, Gülzow 2005, 153-165.
- BGW – Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft; DVGW – Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (Hrsg.)(2006): Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse – Band 1: Gesamtergebnisse und Schlussfolgerungen. Wuppertal, Leipzig, Oberhausen, Essen, 83 pp.
- BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2006): Entwicklung des Schlepperbestandes. Daten und Tabellen des Statistischen Monatsberichts. Tabelle 2760.1, letzte Aktualisierung 17.01.06. In : <http://www.bmelv-statistik.de/index.cfm/uuid/000F0FD817BE135E94EA6521C0A8D816/stw/> Entwicklung, Stand 07.12.06.
- Dämmgen, U. (2004): Nationaler Inventarbericht 2004 – Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen: Teilbericht für die Quellgruppe Landwirtschaft. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 260.
- Dämmgen, U. (2006a): Nationaler Inventarbericht 2006 – Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 291.
- Dämmgen, U. (2006b): Berechnungen der Emissionen aus der Landwirtschaft – Nationaler Emissionsbericht (NIR) 2006 für 2004. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 291A.
- Dendoncker, N.; Wesemael, van B.; Rounsevell, M.D.A.; Roelandt, C.; Lettens, S. (2004): Belgium's CO₂ mitigation potential under improved cropland management. *Agriculture Ecosystems & Environment* 103, 101-116.
- EU (2002): Das Kyoto-Protokoll und der Klimawandel. Memo/02/46, Brüssel, 1-2.
- FNR – Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.) (2005a): Basisdaten Biogas Deutschland. In: www.fnr.de/pdf/literatur/pdf_185bd_biogas_03_2005.pdf, Stand 07.12.06.
- FNR (Hrsg.) (2005b): Studie – Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz. Publikation im Rahmen des Projektes FKZ 22021103, 1. Auflage, Leipzig.

Fritsche, U. R. (2003): Energiebilanzen und Treibhausgas-Emissionen für fossile Brennstoffketten und Stromerzeugungsprozesse in Deutschland für die Jahre 2000 und 2020. Bericht für den Rat für Nachhaltige Entwicklung, Darmstadt, 13 pp.

Garcia-Oliva, F.; Masera, O.R. (2004): Assessment and measurement issues related to soil carbon sequestration in land-use, land-use change, and forestry (LULUCF) projects under the Kyoto protocol. *Climatic Change* 65, 347-364.

Garcia-Quijano, J.F.; Deckmyn, G.; Moons, E.; Proost, S.; Ceulemans, R.; Muys, A. (2005): An integrated decision support framework for the prediction and evaluation of efficiency, environmental impact and total social cost of domestic and international forestry projects for greenhouse gas mitigation: description and case studies. *Forest Ecology and Management* 207, 245-262.

Hartmann, J. K. (2006): Life-cycle-assessment of industrial scale biogas plants. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen.

Hellebrand, H.J.; Kern, J.; Scholz, V. (2003): Long-term studies on greenhouse gas fluxes during cultivation of energy crops of sandy soils. *Atmospheric Environment* 37, 1635-1644.

Hellebrand, H.J.; Scholz, V.; Kern, J.; Kavdir, Y. (2005): N₂O release during cultivation of energy crops. *Agricultural Engineering Research* 11, 114-124.

IE – Institut für Energetik und Umwelt gemeinnützige GmbH (2006): Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW. Band 2: Biomassepotenziale in Deutschland, Nutzungstechniken und ökonomisch-ökologische Bewertung ausgewählter Nutzungspfade. Wuppertal, Leipzig, Oberhausen, Essen, 164 pp.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (1995): *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge UK, 572 Seiten.

IPCC (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge UK, 892 pp.

Jungkunst, H.F.; Freibauer, A.; Neufeldt, H.; Bareth, G. (2006): Nitrous oxide emissions from agricultural land use in Germany - a synthesis of available annual field data. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 341-351.

Klein, de C.A.M.; Ledgard, S.F. (2005): Nitrous oxide emissions from New Zealand agriculture - key sources and mitigation strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72, 77-85.

KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2004): *Wirtschaftsdüngeranfall in der Bundesrepublik Deutschland*, 1-2.

Lal, R. (2004): Agricultural activities and the global carbon cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70, 103-116.

- MTU (2006): MTU HotModule technische Daten. In: <http://www.mtu-online.com/cfc/de/hotm/hotmtech.htm>, Stand 07.12.06.
- Oenema, O.; Wrage, N.; Velthof, G.L.; Groenigen, van J.W.; Dolfing, J.; Kuikman, P.J. (2005): Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72, 51-65.
- ÖKO - Institut für angewandte Ökologie e.V. (2004): Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 4.2; Computermodell und Datenbasis - siehe <http://www.oeko.de/service/gemis/>, Stand 07.12.06.
- Plöchl, M.; Heiermann, M. (2002): Ökologische Bewertung der Bereitstellung landwirtschaftlicher Kosubstrate zur Biogaserzeugung. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 32, 97-105.
- Schmack, D.; Nusko, R. (2004): Biogas in Brennstoffzellen – in fünf Jahren Serienreif? Erneuerbare Energien, Heft 6/2004, SunMedia Verlag, Hannover.
- Schulze, E.D.; Valentini, R.; Sanz, M.J. (2002): The long way from Kyoto to Marrakesh: Implications of the Kyoto Protocol negotiations for global ecology. *Global Change Biology* 8, 505-518.
- Siemens (2006): SOFC/Gasturbinen-Hybridsystem. In: <http://www.powergeneration.siemens.com/de/fuelcells/hybrid/index.cfm?session=1710981x78251424>, Stand 07.12.06.
- Smith, P.; Goulding, K.W.; Smith, K.A.; Powlson, D.S.; Smith J.U.; Falloon, P.; Coleman, K. (2001): Enhancing the carbon sink in European agricultural soils: including trace gas fluxes in estimates of carbon mitigation potential. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60: 237-252.
- Statistisches Bundesamt (2003): Inlandsabsatz von mineralischen Düngemitteln in Deutschland. In: *Statistisches Jahrbuch 2003*, Wiesbaden, 738 Seiten.
- Statistisches Bundesamt (2004): *Landwirtschaft in Zahlen 2003*. Wiesbaden, 23 Seiten.
- UBA – Umweltbundesamt (2005): *Deutsches Treibhausgasinventar 1990 – 2003, Nationaler Inventarbericht 2005. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen*. Berlin, 504 Seiten.
- UBA (2006): *Deutsches Treibhausgasinventar 1990 – 2004, Nationaler Inventarbericht 2006. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen*. Berlin, 565 Seiten.
- UBA; Statistisches Bundesamt (2003): *Umweltdaten Deutschland 2002*. Wiesbaden, 60 Seiten.
- Vaillant (2006): Technische Daten Brennstoffzellenheizgerät. In: http://www.vaillant.de/Privatkunden/Zukunftsennergien/Entwicklung/Brennstoffzelle/article/Technische_Daten.html, Stand 07.12.06.

VDEW – Verband der Elektrizitätswirtschaft e.V. (Hrsg.) (2006): Endenergieverbrauch in Deutschland 2004. Berlin.

Weersink, A.; Pannell, D.; Fulton, M.; Meyer-Aurich, A. (2005): Agriculture's likely role in meeting Canada's Kyoto Commitments. *Canadian Journal of Agricultural Economics* 53, 425-441.

Wegener, J.; Lücke, W.; Heinzemann, J. (2006): Analyse und Bewertung landwirtschaftlicher Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. *Agrartechnische Forschung*, Volume 12, Number 6, 103-114.

Danksagung

Mein Dank gilt der Nordzucker AG für die Finanzierung meiner Promotionsstelle, durch die diese Arbeit überhaupt erst ermöglicht wurde. Neben vielen anderen Mitarbeitern, die mich während meiner Zeit bei der Nordzucker AG unterstützt haben, möchte ich insbesondere Herrn Jakobiak und Herrn Buhrmann stellvertretend für ihren Einsatz danken.

Des Weiteren danken möchte ich Professor Lücke und Dr. Heinzemann als Initiatoren, Ideengeber und Mentoren, die mich in den vergangenen Jahren unterstützt, ermutigt und begleitet haben. Ohne die stundenlangen Diskussionen, kritischen Anregungen, aber auch den mir zur Verfügung gestellten Freiraum, wäre es mir nicht möglich gewesen die Promotion in dieser Form durchzuführen. Für seine spontane und unkomplizierte Bereitschaft diese Arbeit zu betreuen, möchte ich auch Professor Van den Weghe danken.

Ich danke meinen Eltern für ihre fortwährende Unterstützung auch in schwierigen Zeiten. Zuletzt möchte ich insbesondere meiner Frau Henrike und meiner kleinen Tochter Hanna-Sophie Danke sagen. Als Quelle steter Freude habt ihr mir gezeigt, was wirklich wichtig ist.

Lebenslauf

Name: Jens-Karl Wegener
 Anschrift: Adelebser Weg 10
 37139 Barterode
 Telefon: 05506 / 89 29 016
 Geburtsdatum/-ort: 31.07.76 / Göttingen
 Familienstand: verheiratet, 1 Kind

Ausbildung:

1993-1994 Woodward High-School, Woodward, Oklahoma
 Abschluss: High School Diploma
 1988-1996 Otto-Hahn-Gymnasium in Göttingen
 Abschluss: Abitur
 1996-1997 Wehrdienst / Instandsetzungsbataillon
 1997-1998 Praktikum
 1998-2004 Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Technischen Universität Clausthal, Schwerpunkt Produktion und Prozesse, Abschluss Diplom-Wirtschaftsingenieur

Berufserfahrung:

03.02.97 - 16.07.98 DATA VITAL Medizinische Software GmbH, Göttingen: Mitarbeit bei der Vorbereitung und Durchführung der QM-Zertifizierung nach DIN ISO 9001.
 01.01.02 -15.07.02 Gesellschaft für Antriebs- und Energietechnik, Regelungs- und Automatisierungssysteme mbH, Clausthal-Zellerfeld: Studienarbeit über die ökonomische und technische Verbesserung eines Windkraftanlagenkonzeptes.
 15.08.03 - 31.01.04 Nordzucker AG, Braunschweig: Angestellter im Bereich Produktion und Verfahrenstechnik, Diplomarbeit zum Thema Emissionshandel.
 Seit 15.04.04 Abteilung Agrartechnik, Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Universität Göttingen: Doktorand zur Bearbeitung und Betreuung des Industrieprojekts „Aufbau und Implementierung eines CO₂-Management-Systems bei der Nordzucker AG.“
 Lehrtätigkeit für die Vorlesung „Regenerative Energien I und II.“

Beständige Referententätigkeiten im Bereich erneuerbare Energien u.a. für die Ländliche Erwachsenen Bildung, Fa. John Deere sowie für die Akademie Rheinischer Genossenschaften.

Seit 2005 Berater- und Gutachtertätigkeit als freier Mitarbeiter für die Fa. Agrar- und Umwelttechnik mbH Göttingen.

Sonstiges:

Fremdsprachen: sehr gute Englischkenntnisse, 5 Jahre Schulfranzösisch.

Aktivitäten: Mitarbeit auf dem landwirtschaftlichen Betrieb der Eltern, Jugendausbilder bei der Freiwilligen Feuerwehrkapelle Barterode, zwei Semester Mitglied des Studentenparlamentes, seit Studienbeginn Engagement in einer studentischen Verbindung.

Interessen/Hobbies: Landwirtschaft, Saxophon, Lesen.