

**Institut für Energetik und Umwelt**  
gemeinnützige GmbH

**Institute for Energy and Environment**



**Endbericht**

**Ökologische Analyse einer Biogasnutzung aus  
nachwachsenden Rohstoffen**

**FKZ: 22014303 (03NR143)**

Autoren:

Dr.-Ing. Frank Scholwin

Dipl.-Chem. Jens Michel

Dipl.-Ing. Gerd Schröder

Dipl.-Ing. Martin Kalies

Geschäftsführer:  
Prof. Dr. Martin Kaltschmitt  
Handelsregister: Amtsgericht Leipzig HRB 8071  
Sitz und Gerichtsstand Leipzig

Deutsche Bank AG  
(BLZ 860 700 00)  
Konto-Nr.: 1381086

Stadt- und Kreissparkasse Leipzig  
(BLZ 860 555 92)  
Konto Nr.: 1100564876



Zert.-Nr. 1210010564/1



---

**Auftraggeber:** Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR)  
Hofplatz 1  
D-18276 Gülzow

**Auftragnehmer:** Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE)  
Torgauer Str. 116  
04347 Leipzig  
Internet: [www.ie-leipzig.de](http://www.ie-leipzig.de)

**Ansprechpartner:** Dr. Frank Scholwin  
☎: 03 41 / 24 34 – 4 38  
✉: [Frank.Scholwin@ie-leipzig.de](mailto:Frank.Scholwin@ie-leipzig.de)

Leipzig, 12. August 2006

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Methodik der Ökobilanzierung .....</b>	<b>4</b>
2.1	Grundlagen .....	4
2.2	Ziel und Untersuchungsrahmen.....	5
2.3	Sachbilanz: .....	6
2.4	Wirkungsabschätzung .....	8
2.5	Auswertung .....	9
<b>3</b>	<b>Vorgehen und Rahmenbedingungen.....</b>	<b>9</b>
3.1	Systemannahmen.....	10
3.2	Definition der Modellbetriebe .....	14
3.2.1	Referenzbetriebe.....	15
3.2.2	Modellbetriebe mit Biogasnutzung .....	16
3.3	Definition der Biogasanlagen.....	18
3.3.1	Milchviehbetriebe.....	21
3.3.2	Schweinemast .....	22
3.4	Basisdaten.....	23
3.4.1	Pflanzenproduktion.....	23
3.4.1.1	Emissionen aus dem Boden und nach Applikation von Wirtschaftsdüngern .....	27
3.4.2	Tierproduktion .....	29
3.4.2.1	Betriebsmitteleinsatz und –verbrauch.....	29
3.4.2.2	Emissionen aus dem Stall .....	31
3.4.2.3	Emissionen während der Flüssigmistlagerung.....	33
3.4.3	Biogasproduktion .....	34
3.4.3.1	Bau und Abriss der Biogasanlagen .....	35
3.4.3.2	Betriebsmitteleinsatz für den Betrieb einer Biogasanlage .....	36
3.4.3.3	Direkte Emissionen durch Biogasnutzung .....	36
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Vergleich.....</b>	<b>37</b>
4.1	Analyse auf Betriebsebene - Milchbetriebe .....	37
4.1.1	Kumulierter Primärenergieaufwand .....	38



---

4.1.2	Anthropogener Treibhauseffekt.....	39
4.1.3	Emissionen mit versauernder Wirkung .....	41
4.1.4	Emissionen mit eutrophierender Wirkung.....	42
4.2	Analyse der Milchproduktionsbetriebe auf Stromerzeugungsebene.....	44
4.2.1	Kumulierter Primärenergieaufwand .....	44
4.2.2	Anthropogener Treibhauseffekt.....	45
4.2.3	Emissionen mit versauernder Wirkung .....	46
4.2.4	Emissionen mit eutrophierender Wirkung.....	48
4.3	Analyse auf Betriebsebene – Schweinemastbetriebe .....	49
4.3.1	Kumulierter Primärenergieaufwand .....	49
4.3.2	Anthropogener Treibhauseffekt.....	50
4.3.3	Emissionen mit versauernder Wirkung .....	51
4.3.4	Emissionen mit eutrophierender Wirkung.....	52
4.4	Sensitivitäten .....	53
4.4.1	Analyse auf Betriebsebene .....	54
4.4.1.1	Kumulierter Primärenergieaufwand.....	55
4.4.1.2	Anthropogener Treibhauseffekt .....	57
4.4.1.3	Emissionen mit versauernder Wirkung.....	59
4.4.1.4	Emissionen mit eutrophierender Wirkung .....	60
4.4.2	Analyse auf Stromerzeugungsebene.....	62
4.4.2.1	Kumulierter Primärenergieaufwand.....	62
4.4.3	Anthropogener Treibhauseffekt.....	64
4.4.3.1	Emissionen mit versauernder Wirkung.....	65
4.4.3.2	Emissionen mit eutrophierender Wirkung .....	67
4.5	Vergleich mit anderen Techniken .....	68
4.5.1	Kumulierter Primärenergieaufwand .....	69
4.5.2	Anthropogener Treibhauseffekt.....	70
4.5.3	Emissionen mit versauernder Wirkung .....	71
4.5.4	Emissionen mit eutrophierender Wirkung.....	72
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....</b>	<b>73</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>V</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenstellung der bilanzierten Wirkungsgrößen .....	12
Tabelle 2:	Aggregationsfaktoren zur Berechnung der Ressourcenbeanspruchung über den kumulierten fossilen Energieaufwand.....	13
Tabelle 3:	Wichtungsfaktoren wichtiger Treibhausgase zur Quantifizierung des anthropogenen Treibhauseffekts bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren .....	13
Tabelle 4:	Charakterisierungsfaktoren zur Bildung des Indikators für Versauerung .....	14
Tabelle 5:	Charakterisierungsfaktoren zur Bildung des Indikators für terrestrische Eutrophierung nach /13/.....	14
Tabelle 6:	Übersicht der Referenzbetriebe.....	16
Tabelle 7:	Parameter für alle Betriebe .....	20
Tabelle 8:	Übersicht über die Hauptparameter der Milchviehbetriebe einschließlich Biogasanlagen.....	21
Tabelle 9:	Übersicht über die Hauptparameter der Schweinemastbetriebe einschließlich Biogasanlagen.....	22
Tabelle 10:	Maschineneinsatz und Dieserverbrauch der verschiedenen Arbeitsgänge nach /24/ .....	23
Tabelle 11:	Unterstellter Primärenergieeinsatz und CO <sub>2</sub> -, CH <sub>4</sub> -, N <sub>2</sub> O- und NH <sub>3</sub> -Emissionen der Bereitstellung von Dieseldieselkraftstoff nach /9/ .....	24
Tabelle 12:	Emissionen bei der energetischen Nutzung von Diesel in Landwirtschaftsmaschinen nach /9/.....	24
Tabelle 13:	Eingesetzte Menge an Düngemitteln der Modellbetriebe.....	25
Tabelle 14:	Primärenergieaufwand und CO <sub>2</sub> -, CH <sub>4</sub> -, N <sub>2</sub> O- und NH <sub>3</sub> -Emissionen der Bereitstellung von N-, P- und K-Düngemitteln sowie Kalk nach /9/ .....	25
Tabelle 15:	Eingesetzte Menge an Pflanzenschutzmitteln.....	26
Tabelle 16:	Primärenergieverbrauch und ausgewählte Klimagasemissionen für die Bereitstellung von Pflanzenschutzmitteln /9/ .....	26
Tabelle 17:	Aufwand an Saat- und Pflanzgut sowie unterstellter Primärenergieverbrauch und ausgewählte Emissionen für deren Bereitstellung /9/ .....	27
Tabelle 18:	Methanaufnahmeraten landwirtschaftlicher Böden nach /3/ .....	27
Tabelle 19:	Hintergrundlachgasemissionen landwirtschaftlicher Böden nach /28/.....	28
Tabelle 20:	Parameter der Berechnung der Ammoniakverluste nach Applikation von Flüssigmist und flüssigen Gärresten nach /30/ .....	29
Tabelle 21:	Bedarf an elektrischer Energie in der Milchvieh- und Schweinehaltung nach /6/, /12/.....	29



---

Tabelle 22:	Unterstellter Primärenergieeinsatz und CO <sub>2</sub> -, CH <sub>4</sub> -, N <sub>2</sub> O- und NH <sub>3</sub> -Emissionen der Bereitstellung von elektrischem Strom (Strommix Deutschland) nach /9/ .....	30
Tabelle 23:	Primärenergieverbrauch und ausgewählte Klimagasemissionen für die Bereitstellung verschiedener Futtermittel (ECOINVENT, 2004). .....	31
Tabelle 24:	Verwendete Parameter zur Bestimmung der Bruttoenergieaufnahme der Nutztiere berechnet nach /17/ .....	31
Tabelle 25:	Bruttoenergieaufnahme und Emissionsfaktoren der verdauungsbedingten Methanfreisetzung der Tiere berechnet nach /17/ ....	32
Tabelle 26:	Methankonversionsfaktoren $k_{MCF}$ und Methanbildungspotenziale $B_0$ für gelagerten Flüssig- und Festmist nach /17/ .....	33
Tabelle 27:	N <sub>2</sub> O-Emissionsfaktoren für die Lagerung von Flüssig- und Festmist nach /17/ .....	34
Tabelle 28:	NH <sub>3</sub> -Emissionsfaktoren für die Lagerung von Flüssig- und Festmist nach /30/ .....	34
Tabelle 29:	Unterstellte Emissionswerte für die Verbrennung von Biogas im Zündstrahl-BHKW /10/ .....	37

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Aufbau einer Ökobilanz nach ISO 14040.....	5
Abbildung 2:	Schematische Darstellung einer Prozesskettenanalyse.....	7
Abbildung 3:	Übersicht der definierten Modellbetriebe .....	18
Abbildung 4:	Primärenergieaufwand der Milchviehbetriebe in GJ je ha und Jahr.....	39
Abbildung 5:	Treibhausgasemissionen der Milchviehbetriebe in t CO <sub>2</sub> -Äquivalente je ha und Jahr .....	40
Abbildung 6:	Versauernd wirkende Emissionen der Milchviehbetriebe in kg SO <sub>2</sub> -Äquivalente je ha und Jahr.....	42
Abbildung 7:	Eutrophierend wirkende Emissionen der Milchviehbetriebe in kg PO <sub>4</sub> -Äquivalente je ha und Jahr.....	43
Abbildung 8:	Primärenergieaufwand für Strom aus Biogas in GJ je MWh erzeugten Stroms, für den Aufwand des Milchviehbetriebes im Vergleich zum jeweils relevanten Referenzbetrieb .....	45
Abbildung 9:	Treibhausgasemissionen für Strom aus Biogas in t je MWh erzeugten Stroms, für die Emissionen des Milchviehbetriebes im Vergleich zum jeweils relevanten Referenzbetrieb .....	46
Abbildung 10:	Emissionen mit versauernder Wirkung für Strom aus Biogas in kg je MWh erzeugten Stroms, für die Emissionen des landwirtschaftlichen Milchviehbetriebes im Vergleich zum jeweils relevanten Referenzbetrieb .....	47
Abbildung 11:	Emissionen mit eutrophierender Wirkung für Strom aus Biogas in kg je MWh erzeugten Stroms, für die Emissionen des landwirtschaftlichen Milchviehbetriebes im Vergleich zum jeweils relevanten Referenzbetrieb .....	48
Abbildung 12:	Primärenergieaufwand der Schweinemastbetriebe in GJ je ha und Jahr .....	50
Abbildung 13:	Treibhausgasemissionen der Schweinemastbetriebe in t CO <sub>2</sub> -Äquivalente je ha und Jahr.....	51
Abbildung 14:	Versauernd wirkende Emissionen der Schweinemastbetriebe in kg SO <sub>2</sub> -Äquivalente je ha und Jahr.....	52
Abbildung 15:	Eutrophierend wirkende Emissionen der Schweinemastbetriebe in kg PO <sub>4</sub> -Äquivalente je ha und Jahr.....	53
Abbildung 16:	Primärenergieaufwand des landwirtschaftlichen Betriebs in GJ je ha und Jahr bei Variation einer zusätzlichen Wärmeauskopplung; die Zahl hinter der Betriebsbezeichnung zeigt den Anteil der Wärmenutzung im Vergleich zur maximal verfügbaren Wärmemenge .....	55
Abbildung 17:	Primärenergieaufwand des landwirtschaftlichen Betriebs in GJ je ha und Jahr bei Variation Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache, Nomenklatur hinter der Betriebsbezeichnung: 0-wie bisher, ZS-Zündstrahlmotor, ZSR-Zündstrahlmotor mit Rapsöl als Zündöl,	



	GL Gärrest-lager-emissionen, Brache-Gutschrift für extensiv bewirtschaftete Brachfläche.....	56
Abbildung 18:	Treibhausgasemissionen des landwirtschaftlichen Betriebs in t CO <sub>2</sub> -Äquivalente je ha und Jahr bei Variation der zusätzlichen Wärmeauskopplung; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 16.....	57
Abbildung 19:	Treibhausgasemissionen des landwirtschaftlichen Betriebs in t CO <sub>2</sub> -Äquivalente je ha und Jahr bei Variation Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 17 .....	58
Abbildung 20:	Versauernd wirkende Emissionen des landwirtschaftlichen Betriebs in kg SO <sub>2</sub> -Äquivalente je ha und Jahr bei Variation der zusätzlichen Wärmeauskopplung; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 16.....	59
Abbildung 21:	Versauernd wirkende Emissionen des landwirtschaftlichen Betriebs in kg SO <sub>2</sub> -Äquivalente je ha und Jahr bei Variation Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 17 .....	60
Abbildung 22:	Eutrophierend wirkende Emissionen des landwirtschaftlichen Betriebs in kg PO <sub>4</sub> -Äquivalente je ha und Jahr bei Variation der zusätzlichen Wärmeauskopplung; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 16.....	61
Abbildung 23:	Eutrophierend wirkende Emissionen des landwirtschaftlichen Betriebs in kg PO <sub>4</sub> -Äquivalente je ha und Jahr bei Variation Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 17 .....	61
Abbildung 24:	Primärenergieaufwand für Strom aus Biogas in GJ je MWh erzeugten Stroms, für den Aufwand des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation der zusätzlichen Wärmeauskopplung, Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 16 .....	62
Abbildung 25:	Primärenergieaufwand für Strom aus Biogas in GJ je MWh erzeugten Stroms, für den Aufwand des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 17 .....	63
Abbildung 26:	Treibhausgasemissionen für Strom aus Biogas in t je MWh erzeugten Stroms, für die Emissionen des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation der zusätzlichen Wärmeauskopplung, Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 16 .....	64
Abbildung 27:	Treibhausgasemissionen für Strom aus Biogas in t je MWh erzeugten Stroms, für den Aufwand des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation	

	Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 17 .....	65
Abbildung 28:	Emissionen mit versauernder Wirkung für Strom aus Biogas in kg je MWh erzeugten Stroms, für die Emissionen des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation der zusätzlichen Wärmeauskopplung, Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 16 .....	66
Abbildung 29:	Emissionen mit versauernder Wirkung für Strom aus Biogas in kg je MWh erzeugten Stroms, für den Aufwand des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 17 .....	66
Abbildung 30:	Emissionen mit eutrophierender Wirkung für Strom aus Biogas in kg je MWh erzeugten Stroms, für die Emissionen des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation der zusätzlichen Wärmeauskopplung, Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 16.....	67
Abbildung 31:	Emissionen mit eutrophierender Wirkung für Strom aus Biogas in kg je MWh erzeugten Stroms, für den Aufwand des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 17 .....	68
Abbildung 32:	Primärenergieaufwand für Strom in GJ je MWh erzeugten Stroms .....	69
Abbildung 33:	Treibhausgasemissionen für Strom in t je MWh erzeugten Stroms .....	70
Abbildung 34:	Emissionen mit versauernder Wirkung für Strom in kg je MWh erzeugten Stroms.....	71
Abbildung 35:	Emissionen mit eutrophierender Wirkung für Strom in kg je MWh erzeugten Stroms.....	72

## 1 Aufgabenstellung

Um die zukünftige Energieversorgung umwelt-, wie auch klimaverträglich zu gestalten, ist es auf Bundes- wie auch auf europäischer Ebene ein erklärtes Ziel, den Anteil Erneuerbarer Energiequellen zur Bereitstellung von Endenergie deutlich zu erhöhen. Aus diesem Grund wurde ihr verstärkter Einsatz bereits in einigen rechtlich verbindlichen Regelungen gefordert, z. B. soll der Anteil der erneuerbaren Energien bei der Primärenergiebereitstellung von 2,1 % im Jahr 2000 auf 4,2 % in 2010 verdoppelt und entsprechend der Anteil an der Strom-



produktion von 6,25 % in 2000 auf 12,5 % in 2010 erhöht werden. Dabei wird der energetischen Nutzung von Biomasse, vor allem Biogas, ein sehr großes Wachstumspotenzial zugeschrieben.

Die Bundesregierung hat aufgrund der festgelegten politischen Zielvorgaben zu deren Verwirklichung eine Reihe von Maßnahmen ergriffen, welche die Markteinführung erneuerbarer Energien insgesamt unterstützen sollen; exemplarisch sei hier nur das Marktanreizprogramm, die Umsetzung der European Biofuel Directive und die ökologische Steuerreform genannt. Im Strombereich wurde mit dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) eine Regelung zur Vergütung von Strom aus erneuerbaren Energien verabschiedet, von der in den nächsten Jahren – ähnlich wie in der Vergangenheit – eine erhebliche Lenkungswirkung ausgehen soll. Dies gilt besonders für die Novellierung des EEG im Jahr 2004, wodurch die Bedeutung der Biomasse – und insbesondere des Biogases – erheblich zugenommen hat. Es ist deshalb eine Verschiebung des Marktes von konventionellen Energieträgern hin zu erneuerbaren Energien – vor allem Biogas – zu erwarten.

Aus Biogas werden heute in Deutschland in über 2 000 Anlagen über 1,5 TWh/a an elektrischer Energie bereitgestellt, wobei die installierte elektrische Leistung bei Biogasanlagen zwischen 1999 und 2004 mit einer jährlichen Wachstumsrate von 30 % erheblich zugenommen hat. Zum Einsatz kommen zur Zeit überwiegend Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle aus der Landwirtschaft (u. a. tierische Exkrememente, Ernterückstände) und der Industrie (u. a. Schlachtereiabfälle, Fettabscheidereste, Fette). Letztere spielen aufgrund ihres relativ hohen Gasertrags und den z. T. erzielbaren Entsorgungserlösen als Kofermentate insbesondere für kleine Biogasanlagen eine wichtige Rolle für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb.

Die Potenziale für eine Biogasnutzung aus Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen sind jedoch begrenzt. Sie liegen im Bereich von 15 TWh/a an erzeugter elektrischer Energie. Dies entspricht einem Anteil von 3 % des derzeitigen Stromverbrauchs.

Eine weitere Steigerung des Beitrags von Biogas an der Energieversorgung kann nur bei Einsatz von speziell angebauten Bioenergieträgern – als Substrate für eine Biogaserzeugung – realisiert werden. Ein derartiger Anbau von nachwachsenden Rohstoffen für einen Einsatz in Biogasanlagen hat neben diesen energiewirtschaftlichen Auswirkungen eine Reihe weiterer Vorteile für die Landwirtschaft. So erschließt der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen bzw. Substraten für Biogasanlagen neue Ertragsmöglichkeiten für Landwirte und damit



Perspektiven für eine sich im Strukturwandel befindliche Landwirtschaft. Außerdem führt der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen oft zu einer Erweiterung der Fruchtfolge.

Der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen zur Biogaserzeugung ist jedoch im Vergleich zu Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen notwendigerweise mit höheren Kosten verbunden. Durch die Novellierung des EEG wurden zusätzliche finanzielle Anreize geschaffen, um für den Anlagenbetreiber die Biogasgewinnung aus speziell angebauten Energiepflanzen wirtschaftlicher zu gestalten. In diesem Zusammenhang der im EEG festgelegten zusätzlichen finanziellen Unterstützung für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe zur Energiegewinnung ist jedoch zu prüfen, ob diese Förderung das zugrunde liegende Ziel, einen signifikanten Beitrag zum Umwelt- und Ressourcenschutz zu leisten, sicherstellt. Es ist somit zu klären, unter welchen Umständen und für welche Optionen eine Biogasnutzung aus nachwachsenden Rohstoffen ökologisch vorteilhaft erscheint bzw. was getan werden muss, um diesen Zustand zu erreichen.

Es muss betont werden, dass auch die Nutzung von Biogas mit negativen Auswirkungen auf die natürliche Umwelt verbunden sein kann, obwohl die Verbrennung von in der Biomasse enthaltenem Kohlenstoff zu Kohlenstoffdioxid als klimaneutral anzusehen ist. Klimaschädigende Emissionen können aber bei der Biogaserzeugung und -nutzung durch andere Schadstoffe freigesetzt werden, die z. B. bei der Substraterzeugung, bei der anaeroben Fermentation, bei der Gasnutzung und/oder beim Transport und Ausbringung vergorenen Substrate emittiert werden können. Außerdem ist – wie auch bei der Verbrennung fossiler Energieträger – die thermische Nutzung von Biogas mit Freisetzungen an Schwefeldioxyden, Stickstoffoxyden und weiteren Schadstoffen verbunden.

Ein weiterer Aspekt ist, dass für die Biogasnutzung aus nachwachsenden Rohstoffen in Bezug auf Umweltbelastungen insbesondere die folgenden Punkte zu beachten sind:

Zum einen ist der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen, anders als die Bereitstellung von Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen, mit vergleichsweise hohen Aufwendungen für Dünger und Pflanzenschutz, die Bodenbearbeitung etc. verbunden. Damit zusammenhängend kann eine Produktion und Nutzung von Energiepflanzen zur Biogaserzeugung vergleichsweise hohe ökologische Belastungen im Vergleich zu Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen verursachen.

Zum anderen ergeben sich bei einem Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen zur Biogaserzeugung im Vergleich zu Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen grundsätzliche



Unterschiede bei der Entsorgung des Gärrests. So ersetzt beispielsweise eine Nutzung von Gülle zur Biogasgewinnung den herkömmlichen Entsorgungspfad für die Gülle. In diesem Fall wird die Lagerung und die Ausbringung unvergorener Gülle vermieden. Bei der Ermittlung der Umweltwirkungen der Biogasnutzung kann daher in diesem Fall die „normale“ Güllebehandlung gutgeschrieben, also als vermiedene Umweltbelastungen angerechnet, werden. Ein solches Vorgehen ist bei speziell angebauten Substraten nicht möglich, da hier die Rohstoffe ausschließlich für die Biogasnutzung erzeugt werden.

Im Kontext dieses Gesamtzusammenhangs sind die Umweltbelastungen einer Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen allein und zusammen mit landwirtschaftlichen Rückständen (Gülle) unter verschiedenen Rahmendingungen im Rahmen einer Lebenszyklusbetrachtung zu untersuchen. Darüber hinaus sind die Ergebnisse konkurrierenden Systemen zur Stromerzeugung, sowohl regenerativen als auch fossilen Ursprungs, vergleichend gegenüberzustellen. Dadurch können die tatsächlichen Umweltvorteile identifiziert und mögliche Umweltnachteile aufgezeigt werden. Auch lassen sich die Stellen identifizieren, an denen die überproportional höchsten Stofffreisetzungen, die größten Daten-Unsicherheiten und die einfachsten Emissionsminderungen gegeben sind.

## **2 Methodik der Ökobilanzierung**

Die Analyse der Umweltwirkungen der Biogasnutzung wird anhand der Methodik der Ökobilanzierung durchgeführt. Die Methodik zur Durchführung einer Ökobilanzierung soll daher in diesem Kapitel veranschaulicht werden.

### **2.1 Grundlagen**

Das Ziel einer Ökobilanz ist es, die durch die Bereitstellung von Produkten und Dienstleistungen entstehenden Wirkungen sowohl auf die Umwelt als auch auf die menschliche Gesundheit gesamtökologisch zu bewerten. Die Ökobilanz, welche auch als Lebenszyklusanalyse bezeichnet wird, kann dabei einerseits den Vergleich der ökologischen Vor- und Nachteile mehrerer Produkte untereinander zum Ziel haben, aber auch andererseits die Optimierung der Umweltbelastungen für ein bestimmtes Produkt anstreben.

Im Rahmen einer Ökobilanz wird der gesamte Lebenszyklus des zu untersuchenden Produkts von der Rohstofferschließung und -gewinnung („von der Wiege“) über die Produktion und Nutzung bis zur Entsorgung („bis zur Bahre“) analysiert, um die mit dem Produkt

verbundenen Umweltbelastungen zu ermitteln. Dies gilt auch für alle auf dem Lebensweg verwendeten Produkte und Dienstleistungen, welche ebenfalls mit in die Gesamtbilanz einbezogen werden. Die Erstellung einer Ökobilanz ist an die internationalen Normen ISO 14040 (1997) bis ISO 14043 (1998) gebunden, in denen die Durchführung einer Lebenszyklusanalyse geregelt ist. Entsprechend dieser Normen besteht eine Ökobilanz aus den folgenden vier Teilschritten:

- der Festlegung der Ziels und Untersuchungsrahmens (ISO 14041, 1997),
- der Sachbilanz (ISO 14041, 1998),
- der Wirkungsabschätzung (ISO 14042, 1999) und
- der Auswertung (ISO 14043, 1998).

In Abbildung 1 sind die einzelnen Schritte einer Ökobilanz, welche im Folgenden näher beschrieben werden, grafisch dargestellt.



Abbildung 1: Aufbau einer Ökobilanz nach ISO 14040

## 2.2 Ziel und Untersuchungsrahmen

Die Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens stellt den ersten Schritt einer Ökobilanz dar, bei dem einerseits das Ziel einer Ökobilanzstudie eindeutig festzulegen ist sowie die Gründe für die Durchführung der Studie darzustellen sind. Andererseits wird in diesem Schritt der Untersuchungsrahmen möglichst detailliert definiert, wobei eine Reihe von Entscheidungen (beispielsweise welches Produkt bzw. welche Dienstleistung werden in welchem Umfang, mit welcher Genauigkeit und welchem Ziel betrachtet) getroffen werden.



Hierbei werden insbesondere neben der funktionellen Einheit, welche die zentrale Bezugs- und Vergleichsgröße darstellt, auch die Systemgrenzen, die angewendeten Allokationsverfahren für Kuppelprodukte, die zu betrachteten Umweltbereiche und -effekte (Wirkungskategorien) sowie der zeitliche und räumliche Geltungsbereich definiert. Die dabei während der Festlegung des Untersuchungsrahmens zu berücksichtigenden und zu definierenden Punkte sind in der internationalen Norm zu „den Prinzipien und allgemeinen Anforderungen“ einer Ökobilanz festgelegt. Nach ISO 14040 (1997) müssen demnach die folgenden Punkte berücksichtigt und beschrieben werden:

- die Funktion des Produktsystems, oder im Fall vergleichender Studien der Systeme,
- die funktionelle Einheit,
- das zu untersuchende Produktsystem,
- die Grenzen des Produktsystems,
- die Allokationsverfahren,
- die Wirkungskategorien und die Methodik der Wirkungsabschätzung sowie der anschließenden Auswertung,
- die Anforderungen an die Daten,
- die Annahmen,
- die Einschränkungen,
- die Anforderungen an die Qualität der Daten,
- die Art der kritischen Prüfung (wenn vorgesehen),
- die Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts.

Da es sich bei einer Ökobilanz um einen iterativen Prozess handelt, kann es im Verlauf der Durchführung der Ökobilanz notwendig sein, den bereits festgelegten Untersuchungsrahmen zu modifizieren. Soweit Modifikationen des Untersuchungsrahmens vorgenommen werden, sind diese ausreichend zu dokumentieren.

### **2.3 Sachbilanz:**

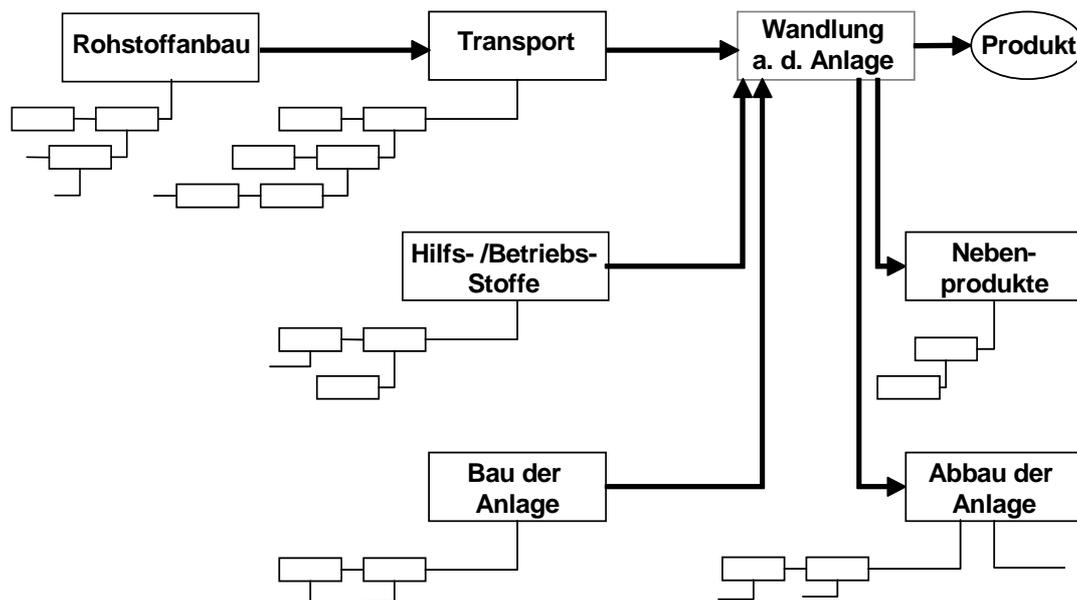
In der Sachbilanz werden alle relevanten Stoff- und Energieströme der verschiedenen Prozesse des zu betrachtenden Produktsystems über den gesamten Lebensweg erfasst und

quantifiziert. Die mit Hilfe der Sachbilanz erhaltenen kumulierten Rohstoffinputs und Schadstoffoutputs sind dabei auf eine definierte funktionelle Einheit zu beziehen.

Für die Berechnung einer Sachbilanz können verschiedene Verfahren angewendet werden, zum Beispiel:

- die Prozesskettenanalyse,
- die Ökologische Input-Output-Analyse oder
- die Hybrid-Methode.

Die Prozesskettenanalyse stellt hierbei die am meisten angewandte Methode zur Quantifizierung der Sachbilanz dar. Hierbei werden die einzelnen Prozesse auf der Basis von physikalischen Größen (z.B. kg Hilfsstoff oder kWh elektrische Energie) miteinander verknüpft. Anhand der beispielhaft in Abbildung 2 dargestellten Prozesskette ist zu erkennen, dass die einzeln betrachteten Prozessstufen wiederum aus einer Verteilungsstruktur an Prozessketten bestehen und dementsprechend der Lebensweg eines Produktes sehr detailliert betrachtet und die daraus resultierende kumulierte Umweltinanspruchnahme sehr genau ermittelt werden kann.



**Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Prozesskettenanalyse**

Die verwendete ökologische Input-Output-Analyse wird auf der Grundlage von Input-Output-Tabellen durchgeführt, welche im Rahmen einer volkswirtschaftlichen Gesamtbetrachtung erstellt werden und eine monetäre Verflechtung einzelner Sektoren (z. B. Energieproduktion, Maschinenbau oder Landwirtschaft) einer Volkswirtschaft liefern. Anhand der Input-Output-Tabellen und dem entsprechenden Preis eines Produktes findet eine Abschätzung über den



Bedarf verschiedener Güter anderer Wirtschaftssektoren statt. Da den unterschiedlichen volkswirtschaftlichen Sektoren entsprechende Umweltbelastungen zugeordnet sind, können somit die Umweltfolgen des produzierten Gutes ermittelt werden.

Die Hybrid-Methode stellt eine Ergänzung der Prozesskettenanalyse durch die Input-Output-Analyse dar, wobei im Anschluss an die Prozesskettenanalyse für alle relevanten Prozesse der Prozesskette zusätzlich eine Kostenbilanz erstellt wird. Somit können für die nicht in der Prozesskette erfassten Vorleistungen die Umweltwirkungen ermittelt werden.

## 2.4 Wirkungsabschätzung

Bei der Wirkungsabschätzung erfolgt basierend auf den Ergebnissen der Sachbilanz eine Beurteilung der Größe und Bedeutung potenzieller Umweltfolgen des untersuchten Produktes bzw. Verfahrens über den gesamten Lebensweg. Den Sachbilanzgrößen sind für diese Beurteilung verschiedene Wirkungskategorien zugeordnet, wobei die Sachbilanzgrößen auch mehrfach zugeordnet werden können. Häufig betrachtete Wirkungskategorien sind z. B.:

- Treibhauseffekt,
- Ozonabbau,
- Sommersmog,
- Eutrophierung,
- Versauerung,
- Humantoxizität,
- Ökotoxizität,
- Lärmbelästigung,
- Ressourcenbeanspruchung,
- Naturraumbeanspruchung,
- kumulierter Primärenergieaufwand.

Im Allgemeinen werden im Rahmen der Ökobilanzierung nicht immer alle möglichen Wirkungsbereiche betrachtet. Die Auswahl der betrachteten Bereiche hängt einerseits von den durch die Ökobilanz verfolgten Zielen ab, wodurch eine Beschränkung auf die für das Erreichen des definierten Ziels relevanten Wirkungskategorien erfolgt. Andererseits ist es nur sinnvoll, ausschließlich diejenigen Wirkungskategorien zu betrachten, denen eine ausreichende Datenbasis zugrunde liegt.



Für die ausgewählten Wirkungsbereiche werden anschließend die spezifischen Sachbilanzgrößen innerhalb der Wirkungskategorien zu einem Wirkungsindikator aggregiert. Dies geschieht durch Gewichtung der jeweiligen Sachbilanzgrößen mit Hilfe von Charakterisierungsfaktoren, welche die Umweltwirkung einer Sachbilanzgröße in Relation zu einer Referenzgröße (z. B. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente beim Treibhauseffekt) angeben.

Im Rahmen dieser ökologischen Bilanzierung werden die Umwelteffekte der Biogasnutzung auf die definierten Landwirtschaftsbetriebe anhand der folgenden Wirkungskategorien beurteilt und diskutiert:

- Treibhauseffekt,
- Verbrauch an fossiler Primärenergie,
- Emissionen mit versauernder Wirkung,
- Emissionen mit eutrophierender Wirkung.

## 2.5 Auswertung

Die Auswertung ist der abschließende Schritt einer Ökobilanz, wobei die Ergebnisse der vorausgegangenen Schritte (Sachbilanz, Wirkungsabschätzung) im Bezug auf das festgelegte Ziel der Ökobilanz ausgewertet werden. Hierbei ist u. a. eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen, um zu untersuchen, wie stark sich die Änderungen der Randbedingungen (die der Bilanzierung zugrunde gelegt wurden) auf das Gesamtergebnis der Ökobilanz auswirken. Abschließend werden Schlussfolgerungen abgeleitet, anhand derer die Ergebnisse zusammengefasst und bewertet werden.

## 3 Vorgehen und Rahmenbedingungen

Nachwachsende Rohstoffe werden meistens nicht als ausschließliches Substrat, sondern oft in Kombination mit einem Grundsubstrat (meist Gülle) eingesetzt. Um zu untersuchen, welchen Einfluss unterschiedliche Grundsubstrate und unterschiedliche Anteile an nachwachsenden Rohstoffen u. a. als Kofermentat auf die zu untersuchenden Umwelteffekte haben, werden ausgewählte Varianten der landwirtschaftlichen Biogasnutzung von nachwachsenden Rohstoffen definiert. Die Auswahl der nachwachsenden Energieträger wird auf die am häufigsten anzutreffenden Substrate – wie Maissilage, Getreideganzpflanzensilagen oder Grassilage – beschränkt. Als Grund- bzw. Basissubstrate werden Rinder- bzw. Schweinegülle betrachtet, da diese Substrate in landwirtschaftlichen Biogasanlagen am weitesten verbreitet sind. Die



Betrachtung der Bereitstellung der nachwachsenden Energieträger beschränkt sich ausschließlich auf die konventionelle Betriebsführung, da die Nutzung ökologisch angebaute nachwachsender Rohstoffe – aufgrund der deutlich höheren Kosten – bisher unüblich ist.

Um die Betrachtungen durchführen zu können, sind neben den zu treffenden Systemannahmen, die essentiell für die Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse sind, die Modellbetriebe und die zugehörigen Biogasanlagen klar zu definieren. Darüber hinaus werden die allen Berechnungen zugrunde liegenden Basisdaten einschließlich Quellenangaben erläutert und die Methodik der Auswertung beschrieben. Diese Punkte werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

### 3.1 Systemannahmen

Im Folgenden werden exemplarisch die wesentlichen Aspekte der Anwendung der vier in Abbildung 1 beschriebenen Schritte auf die hier zu untersuchende Fragestellung der Endenergiegewinnung aus Biogassubstraten diskutiert.

#### **Ziel und Untersuchungsrahmen**

*Ziel und betrachtete Umweltbereiche.* Ziel dieser Untersuchung ist es, eine energetische Nutzung von Biomasse zur Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoffen bezüglich dem Verbrauch an erschöpflicher Energieressourcen (fossiler und nuklearer Primärenergieaufwand), dem anthropogenen Treibhauseffekt (Emissionen klimawirksamer Gase), Emissionen mit versauernder sowie mit eutrophierender Wirkung zu analysieren.

*Festlegung der Lebenswege.* Die betrachteten nachwachsenden Rohstoffe (Maissilage) werden als landwirtschaftliche Produkte entsprechend eines Bewirtschaftungsplans, der die notwendigen Feldarbeiten gemäß guter fachlicher Praxis festlegt, konventionell produziert. Dabei kommen Betriebsmittel zum Einsatz, die bis zur "Quelle" zurück verfolgt werden (z. B. Rohölproduktion in Saudi-Arabien). Anschließend werden die nachwachsenden Rohstoffe zur Biogasanlage transportiert und zu Biogas vergoren. Bau, Betrieb und Abriss der notwendigen Anlagen und Anlagenteile werden in der Untersuchung mit berücksichtigt.

*Funktionelle Einheit.* Als funktionelle Einheit wird für den allgemeinen Vergleich 1 kWh Strom frei Anlage und für den Vergleich zwischen den Betrieben 1 ha definiert.



*Systemgrenzen.* Für die Bilanzierung der Umweltbelastungen der Stromproduktion aus Biogas wird der in Deutschland existierende landwirtschaftliche und feuerungstechnische Standard unterstellt. Produkte, die von Deutschland importiert werden, werden ebenfalls entsprechend bilanziert (z. B. Düngerimport, Rohölimport sowie deren Vorketten). Diese Umweltbelastungen entstehen damit nicht in Deutschland, sondern in den jeweiligen Herkunftsländern. Sie sind aber trotzdem dem hier untersuchten Produkt anzulasten. Bezugszeitraum ist das Jahr 2005.

*Allokationsverfahren.* Wird durch einen Prozess innerhalb eines Lebenswegs mehr als ein Produkt bereitgestellt (Koppelproduktion), müssen die ermittelten Umwelteffekte in einer geeigneten Weise auf die verschiedenen Produkte aufgeteilt werden. Beispielsweise stellt eine Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage (KWK-Anlage) neben Strom auch Wärme bereit. Für einen Vergleich der Stromerzeugung aus einer KWK-Anlage mit anderen Stromerzeugungsoptionen, die ausschließlich elektrische Energie bereitstellen, darf nur der Teil der Umweltinanspruchnahme der KWK-Anlage herangezogen werden, der den Strom produziert. Hierzu werden in ISO 14041 folgende Vorgaben gemacht:

- Wenn möglich, sollte eine Allokation durch eine Systemaufteilung oder eine Systemerweiterung vermieden werden. Bei einer Systemerweiterung wird die KWK-Anlage mit einem System verglichen, das die gleiche Menge Strom und Wärme bereitstellt, also z. B. in der Kraftwerkstechnik mit einem System bestehend aus einem Steinkohle-Kraftwerk und einem Erdgas-Heizwerk.
- Wenn eine Allokation nicht vermieden werden kann, sollte sie möglichst auf der Basis von physikalischen Größen, wie z. B. Energie, Exergie oder Masse beruhen.
- Wenn keine physikalischen Beziehungen aufgestellt werden können, kann die Allokation auch auf Basis von anderen Beziehungen wie z. B. monetären Werten vorgenommen werden.

Im vorliegenden Fall der Strombereitstellung aus Biogas werden etwaige Koppelprodukte, wie z. B. der Düngerwert des Gärrestes nach der Biogaserzeugung, über die jeweils vermiedenen Umwelteffekte gutgeschrieben.

## **Sachbilanz**



Entsprechend der Zieldefinition wird hier die gesamte Prozesskette vom Rohstoffanbau bzw. der Rohstoffbereitstellung über etwaige Konversionsschritte bis hin zur Bereitstellung der Endenergie untersucht.

### Wirkungsabschätzung

Die Auswirkungen einer Nutzung von Bioenergieträgern erstrecken sich auf eine Vielzahl unterschiedlichster Umweltbereiche. Im Rahmen der hier durchgeführten Ökobilanzierung beschränken sich die Ausführungen auf wesentliche, sinnvoll quantifizierbare Kenngrößen, welche ausgewählte Belastungen auf Energieträgerreserven (d. h. kumulierter fossiler Primärenergieaufwand), Klima (anthropogener Treibhauseffekt gemessen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten) und Ökosysteme (Versauerung und Eutrophierung gemessen in SO<sub>2</sub>-Äquivalenten bzw. in PO<sub>4</sub>-Äquivalenten) abbilden. Tabelle 1 zeigt die betrachteten Wirkungsgrößen.

**Tabelle 1: Zusammenstellung der bilanzierten Wirkungsgrößen**

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Substanzen
Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen	Fossiler und nuklearer Primärenergieaufwand	Erdöl, Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Uran
Anthropogener Treibhauseffekt	CO <sub>2</sub> -Äquivalente	Kohlenstoffdioxid, Methan, Distickstoffoxid, SF <sub>6</sub> , CF <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> , etc.
Emissionen mit versauernder Wirkung	SO <sub>2</sub> -Äquivalente	Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Chlorwasserstoff, Ammoniak, etc
Emissionen mit eutrophierender Wirkung	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äquivalente	Stickstoffoxide, Ammoniak

*Kumulierter Primärenergieaufwand.* Als Wirkungsindikator für die Beanspruchung der erschöpflichen Energieressourcen wird der Aufwand an fossilen und nuklearen Energieträgern herangezogen. Der Primärenergieverbrauch errechnet sich für Stein- und Braunkohle, Erdgas und Erdöl auf Basis des Heizwerts. Strom aus Kernenergie wird über einen Wirkungsgrad von 33 % in Primärenergie umgerechnet /1/ (Tabelle 2). Im Folgenden wird die Bezeichnung „Primärenergieaufwand“ als Synonym für „fossilen und nuklearen Primärenergieaufwand“ verwendet.



**Tabelle 2: Aggregationsfaktoren zur Berechnung der Ressourcenbeanspruchung über den kumulierten fossilen Energieaufwand**

	Einheit	Faktor in MJ / Einheit
Erdgas	MJ	1
Erdölgas	MJ	1
Rohbraunkohle	MJ	1
Rohöl	MJ	1
Rohsteinkohle	MJ	1
Elektrizität netto produziert in Kernkraftwerken	kWh	10,908

*Anthropogener Treibhauseffekt.* Hier treten als direkt klimarelevante Spurengasemissionen vor allem CO<sub>2</sub> aus fossilen Energieträgern, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O auf. Aufgrund der unterschiedlichen Klimawirksamkeit der einzelnen Stoffe werden die jeweiligen Emissionen in sogenannte CO<sub>2</sub>-Äquivalente überführt. Das bei der Verbrennung von Biomasse entstehende CO<sub>2</sub> wird bei der Berechnung der CO<sub>2</sub>-Äquivalente nicht berücksichtigt, da die gleiche Menge an CO<sub>2</sub> beim Wachstum der Pflanzen aus der Atmosphäre gebunden wurde, d. h. es wird ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf und eine nachhaltige Bereitstellung der Biomasse unterstellt.

Die verschiedenen Treibhauspotenziale wichtiger Klimagase bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren und deutsche Verhältnisse sind in Tabelle 3 aufgeführt.

**Tabelle 3: Wichtungsfaktoren wichtiger Treibhausgase zur Quantifizierung des anthropogenen Treibhauseffekts bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren**

		Wichtungsfaktor in kg CO <sub>2</sub> -Äquivalenten / kg Schadstoff
Kohlenstoffdioxid	CO <sub>2</sub>	1
Methan	CH <sub>4</sub>	23
Distickstoffdioxid	N <sub>2</sub> O	296
Perfluormethan	CF <sub>4</sub>	5 700
Perfluorethan	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	11 900
Schwefelhexafluorid	SF <sub>6</sub>	22 200

*Emissionen mit versauernder Wirkung* sind versauernd wirkende Stoffe wie beispielsweise Schwefel- und Stickstoffoxide und deren Umwandlungsprodukte. Durch Säureeintrag und einer damit verbundenen pH-Wert-Absenkung können sowohl terrestrische als auch aquatische Ökosysteme in Mitleidenschaft gezogen werden. In



Tabelle 4 sind die in dieser Studie verwendeten Charakterisierungsfaktoren zur Ermittlung der Emissionen mit versauernder Wirkung aufgeführt.

**Tabelle 4: Charakterisierungsfaktoren zur Bildung des Indikators für Versauerung**

		Charakterisierungsfaktor in kg SO <sub>2</sub> - Äquivalenten / kg Schadstoff
Schwefeldioxid	SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub>	1
Stickstoffoxide	NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub>	0,7
Ammoniak	NH <sub>3</sub>	1,88
Chlorwasserstoff	HCl	0,88
Fluorwasserstoff	HF	1,6
Schwefelwasserstoff	H <sub>2</sub> S	1,88

*Emissionen mit eutrophierender Wirkung.* Der Effekt der terrestrischen Eutrophierung umfasst den Eintrag von Nährstoffen in Böden. Bei terrestrischen Ökosystemen führt ein verstärkter Nährstoffeintrag zu einer Verschiebung des Artengleichgewichts, die im Allgemeinen mit einer Verminderung der Artenvielfalt verbunden ist. In Tabelle 5 sind die in dieser Studie verwendeten Charakterisierungsfaktoren zur Ermittlung der Emissionen mit eutrophierender Wirkung aufgeführt.

**Tabelle 5: Charakterisierungsfaktoren zur Bildung des Indikators für terrestrische Eutrophierung nach /12/**

		Charakterisierungsfaktor in kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> Äquivalenten / kg Schadstoff
Stickstoffoxid	NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub>	0,13
Ammoniak	NH <sub>3</sub>	0,35

## Auswertung

Die im Rahmen der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung erarbeiteten Ergebnisse werden analysiert und diskutiert.

### 3.2 Definition der Modellbetriebe

Die Umweltfolgen der Vergärung nachwachsender Rohstoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen werden anhand definierter Modellbetriebe untersucht, da somit eine



ganzheitliche Betrachtung verschiedener Einflussfaktoren möglich ist. Die Modellierung erfolgt mit dem Betriebsmodell „ModelFarm“, welches am Institut für Energetik und Umwelt gGmbH entwickelt wurde. Mit Hilfe dieses Modells ist es möglich, landwirtschaftliche Betriebe mit und ohne Biogasnutzung abzubilden sowie deren Klimagasemissionen zu modellieren.

Die Vielfalt der Möglichkeiten der Nutzung nachwachsender Rohstoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen wird auf ausgewählte Modellbetriebe reduziert, da die Bereitstellung der Substrate auf unterschiedlichstem Wege erfolgen kann. Die Definition der Modellbetriebe erfolgt unter Berücksichtigung unterschiedlicher landwirtschaftlicher Strukturen – z. B. Betriebsgröße, Viehbesatz oder Anteil nachwachsender Rohstoffe.

### **3.2.1 Referenzbetriebe**

Um die Ergebnisse der ökologischen Analyse der Modellbetriebe gut mit einander vergleichen zu können, sind Referenzbetriebe zu definieren, auf deren Basis die verschiedenen zu betrachtenden Biogasnutzungsvarianten abgeleitet sind. Als Referenzbetriebe sind jeweils ein Milchviehbetrieb und ein Schweinemastbetrieb mit einer landwirtschaftlichen Gesamtnutzfläche von 300 ha ohne Biogasnutzung definiert. Eine Übersicht der wichtigsten Parameter der definierten Referenzbetriebe ist in Tabelle 6 abgebildet.

**Tabelle 6: Übersicht der Referenzbetriebe**

	<i>Milchviehbetrieb</i>	<i>Schweinemastbetrieb</i>
Landwirtschaftliche Nutzfläche	300 ha	300 ha
davon Grünland	90 ha	0 ha
Ackerfläche	180 ha	270 ha
Stilllegungsfläche	30 ha	30 ha
Fruchtfolge Ackerbau	Silomais (60 ha) Winterweizen (60 ha) Wintergerste (60 ha, ZF Senf)	CCM-Mais Winterweizen Wintergerste (ZF Senf)
Viehbesatz	305,4 Milchkühe 30,5 Färsen 164,9 Jungtiere	2380 Mastschweine

### 3.2.2 Modellbetriebe mit Biogasnutzung

Von den definierten Referenzbetrieben ausgehend werden verschiedene Nutzungsintensitäten nachwachsender Rohstoffe in den Modellbetrieben betrachtet:

0% Nutzung:

Als Referenzbetriebe werden ein Betrieb ohne Biogasgewinnung und –nutzung und ein Betrieb mit Biogasgewinnung und –nutzung ausschließlich aus der anfallenden Gülle betrachtet.

10% Nutzung:

Der Anbau der nachwachsenden Rohstoffe erfolgt ausschließlich auf den bestehenden Stilllegungsflächen (10% der Gesamtfläche bzw. 30 ha), wodurch die bestehenden Betriebsstrukturen der Referenzbetriebe weitestgehend erhalten bleiben. Bei dieser Nutzungsvariante wird ausschließlich Silomais als nachwachsender Rohstoff betrachtet, welcher zusammen mit der anfallenden Rinder- bzw. Schweinegülle in der Biogasanlage vergoren wird.



### 30% Nutzung:

Bei dieser Variante erfolgt der Anbau der nachwachsenden Rohstoffe auf 30% der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche (einschließlich der Stilllegungsflächen). Diese Flächen wurden bisher für Futter- und Marktfruchtanbau genutzt und stehen somit diesem nicht mehr zur Verfügung, in Folge dessen eine Reduzierung des Viehbesatzes – aufgrund des geringeren Futtermittelertrages – notwendig wird. Die Veränderungen der bisherigen Betriebsstruktur der Referenzbetriebe halten sich – trotz des relativ hohen Anteils der nachwachsenden Rohstoffe von 30% der Gesamtfläche – im Rahmen. Die ökologischen Folgen werden aufgrund dessen für diese Nutzungsvariante neben Silomais auch für Roggenganzpflanzensilage bzw. Maissilage kombiniert mit Roggenganzpflanzensilage – Silomais wird direkt nach einer frühen Ernte der Winterroggensilage gesät – als Biogassubstrate betrachtet. Weiterhin wird für den Milchviehbetrieb der Einsatz von Grassilage in der Biogasanlage betrachtet, wobei die Vergärung von Grassilage nur bei einem hohen Grünlandanteil durchgeführt werden würde. Aus diesem Grund wird für diesen Milchviehbetrieb ein Grünlandanteil von 50% (150 ha) definiert. Die Vergärung der nachwachsenden Rohstoffe erfolgt bei diesen Modellbetrieben wiederum zusammen mit der anfallenden Rinder- bzw. Schweinegülle als Grundsubstrat.

Anhand dieser Varianten sind weiterhin die ökologischen Effekte der Biogasnutzung nachwachsender Rohstoffe für weitere Betriebsgrößen darzustellen, was anhand von Silomais exemplarisch für die Betriebsgrößen 150 ha bzw. 1000 ha durchgeführt wird.

### 100% Nutzung:

Neben dem teilweisen Anbau nachwachsender Rohstoffe ist es möglich, einen Landwirtschaftsbetrieb komplett auf Anbau und Biogasnutzung nachwachsender Rohstoffe umzustellen. Bei dieser Option wird die bestehende Fruchtfolge des Ackerbaus durch die Fruchtfolge Silomais --> Winterroggen m. Klee grasuntersaat--> Klee gras ersetzt. Diese Fruchtfolge wurde gewählt, da sie in weiten Teilen des Bundesgebietes einsetzbar ist sowie eine maximale Ausnutzung der Vegetationszeit gewährleistet, da zu fast jedem Zeitpunkt des Jahres Pflanzen auf dem Feld stehen. Weiterhin wird – aufgrund der abwechslungsreichen Fruchtfolge – der Krankheits- bzw. Schädlingsdruck reduziert, was zu einer Minderung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln führen kann. Grundsätzlich wäre auch der ausschließliche Anbau von Mais denkbar und wird auch in der Praxis



umgesetzt, soll jedoch aufgrund der möglichen negativen Implikationen wie beispielsweise Schädlingsbefall und negativer Humusbilanz hier nicht betrachtet werden.

Die definierten Modellbetriebe, an deren Beispiel die ökologische Bewertung der Biogasnutzung nachwachsender Rohstoffe durchgeführt wird, sind in Abbildung 3 grafisch zusammengefasst.

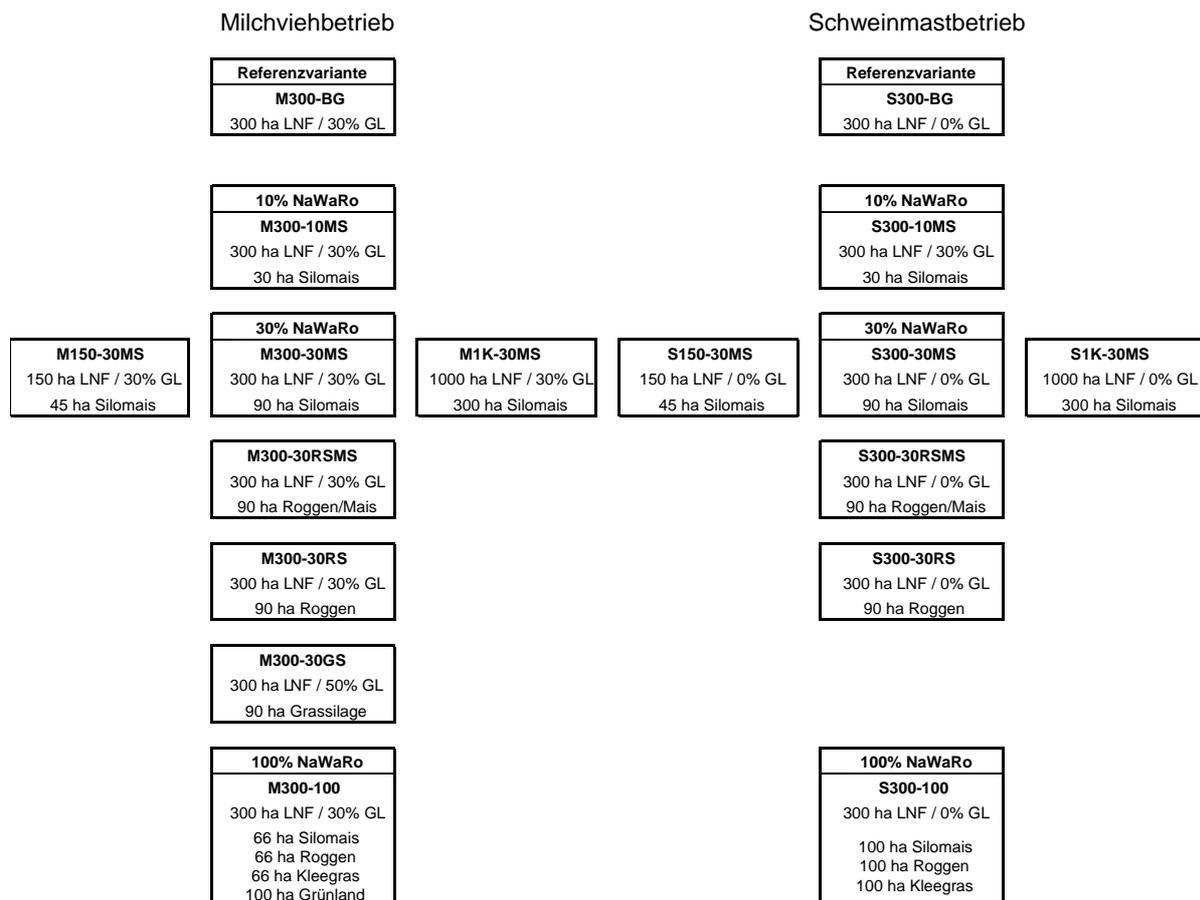


Abbildung 3: Übersicht der definierten Modellbetriebe

### 3.3 Definition der Biogasanlagen

Neben der Art und Menge der zu vergärenden Substrate wird der resultierende Biogasenergieertrag einer Biogasanlage von einer Vielzahl weiterer Parameter bestimmt. Um die Vergleichbarkeit der verschiedenen Biogasvarianten zu gewährleisten, sind für alle Biogasanlagen möglichst viele Parameter gleich zu definieren. Für alle Modellbetriebe gelten daher folgende Festlegungen:



- Die nachwachsenden Rohstoffe werden mit Hilfe eines Feststoffbeschickungssystems (Förderschnecken) direkt in den Fermenter eingebracht. Diese Festlegung erfolgt aufgrund der Tatsache, dass in der Praxis nahezu ausschließlich Feststoffeintragsysteme eingesetzt werden und Varianten wie beispielsweise Spülschächte und auch Vorgruben bei Nawaro-Biogasanlagen kaum noch verwendet werden.
- Die Vergärung erfolgt ausschließlich in Betonfermentern durch Nassvergärung. Es werden zwar auch Stahlfermenter errichtet, der Beitrag der Fermenterart zu den Emissionen ist jedoch relativ gering und die ökologischen Auswirkungen beider Fermentertypen werden als vergleichbar angesehen (z.B. /9/). Daher wird der Betonfermenter stellvertretend für alle üblichen Fermenterbauweisen verwendet.
- Die Gärrestlager sind abgedeckt und werden als Nachgärbehälter und Gaslager genutzt. Bei der Annahme eines abgedeckten Gärrestlagers ist bewusst die ökologisch vorteilhafte Variante einer Biogasanlage gewählt worden. Zum Einen stellen Anlagen zur Vergärung Nachwachsender Rohstoffe vollkommen neue Bauten dar, die in der Regel nicht auf ein vorhandenes Gülleendlager o.ä. zurückgreifen können. Damit können die Vorteile einer Gärrestlagerabdeckung (verminderte Geruchsbelästigung, zusätzlicher Gasertrag) bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden. Zum Anderen kann - allein aufgrund der Tatsache, dass sich die Emissionsgrenzwerte für Industrieanlagen immer weiter verschärfen - erwartet werden, dass zukünftig auch die Genehmigungsbehörden auf einer Gärrestlagerabdeckung bestehen werden. Im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtungen wird der Effekt der Gärrestlagerabdeckung bzw. der Nicht-Abdeckung untersucht.
- Die Stromerzeugung erfolgt ausschließlich mit Hilfe von Gas-Otto-Motoren. Aufgrund der Tatsache, dass ab 2007 nur noch Zündöl in Motoren eingesetzt werden darf, das aus Nachwachsenden Rohstoffen produziert worden ist, wurden orientierende Kalkulationen zur Wirtschaftlichkeit von Zündstrahlmotoren durchgeführt. Damit - und gerade vor dem Hintergrund der Preispolitik bei Pflanzenöl - ist zu erwarten, dass die Zündölpreise den Einsatz von Zündstrahlmotoren im Leistungsbereich oberhalb von ca. 100 kW<sub>el</sub> kaum mehr wirtschaftlich ermöglichen. Darüber hinaus stellt dieser Leistungsbereich bei den neu errichteten Biogasanlagen (mit einem Leistungsdurchschnitt oberhalb von 380 kW<sub>el</sub> deutschlandweit inzwischen auch nur noch die Ausnahme, gerade bei Anlagen zur Biogasgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen, dar /13/. An einem Beispiel wird jedoch stellvertretend für die kleineren



Biogasanlagen der Einfluss der des Einsatzes eines Zündstrahlmotors auf die ökologischen Wirkungen der Biogasnutzung untersucht.

Über diese allgemeinen Definitionen hinaus werden nachfolgend alle untersuchten Betriebe mit den auf deren Erfordernisse abgestimmten Biogasanlagen tabellarisch charakterisiert, um die Basis für die Berechnungen transparent darzustellen. Unterstellt ist jeweils sowohl ein konventionller Anbau der landwirtschaftlichen Produkte und eine konventionelle Stallhaltung der Tiere. Bezüglich der Tierhaltung wird davon ausgegangen, dass das Gülleendlager für die Tiergülle bereits existent ist und nur Lager für die Gärreste aus nachwachsenden Rohstoffen neu geschaffen werden. Aus Gründen der Vergleichbarkeit der Anlagen untereinander wird davon ausgegangen, dass keine der betrachteten Biogasanlagen Wärme nutzt. Die Wärmenutzung kann jedoch ökologisch erheblich zur Besserstellung der Anlagen beitragen, da sie in der Regel fossile Brennstoffe substituiert.

Für die Betriebe und Biogasanlagen werden eine Reihe betriebspezifischer Annahmen zu treffen sein, die nachfolgend anhand der wesentlichen Kenngrößen zusammengefasst werden. Für alle Betriebe und Anlagen geltende Parameter werden darüber hinaus in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 7: Parameter für alle Betriebe**

Frucht / Substrat	Flächenertrag	TS-Gehalt	oTS-Gehalt	Methanertrag
	t TM ha <sup>-1</sup>	% FM	% TS	Nm <sup>3</sup> t <sup>-1</sup> oTS
Mais / -silage	17,5	35,0	90,0	330
Roggen / GPS	6,5	30,0	87,0	350
Gras / -silage	11,0	37,5	85,0	260
Kleegras	3,0 <sup>a</sup> / 8,0 <sup>b</sup>	35,0	85,0	260
Winterweizen	7,5	-	-	-
Wintergerste	6,0	-	-	-
CCM	7,5	-	-	-
Raps	2,7	-	-	-
ZwF Senf	2,75	-	-	-
Schweinegülle	-	6,0	87,0	270
Rindergülle	-	8,5	82,0	200

<sup>a</sup> im ersten Jahr    <sup>b</sup> im zweiten Jahr



### 3.3.1 Milchviehbetriebe

**Tabelle 8: Übersicht über die Hauptparameter der Milchviehbetriebe einschließlich Biogasanlagen**

Parameter	Betrieb	M300-G	M300-BG	M300-10MS	M300-30MS	M150-30MS
Landwirtschaftliche Fläche	ha	300	300	300	300	150
Tierbesatz Milchkühe	GV ha <sup>-1</sup>	1,7	1,7	1,7	1,36	1,36
Futterbedarf Import (Sojaschrot)	t a <sup>-1</sup>	240.777	240.777	240.777	174.772	87.422
Anbaufläche NaWaRo	ha	-	30	90	90	45
Biogassubstrat Gülle	t FM a <sup>-1</sup>	-	9.010	9.010	7.210	3.610
Biogassubstrat NaWaRo (Durchschnitt)	t FM a <sup>-1</sup>	-	0	1.280	3.830	1.910
Verweilzeit	d	-	30	30	45	45
Fermentervolumen	m <sup>3</sup>	-	860	980	1.550	780
Biogasproduktion	m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup>	-	251.900	494.800	930.400	495.300
Durchschnittliche elektrische Leistung	kW	-	51	111	223	107
Gesamtstrombedarf	MWh a <sup>-1</sup>	91.500	91.500	91.500	73.200	36.600
Gesamtdieselbedarf	l a <sup>-1</sup>	39.700	39.700	40.200	38.000	19.000

Parameter	Betrieb	M1k-30MS	M300-30GS	M300-RS	M300-RSMS	M300-100
Landwirtschaftliche Fläche	ha	1000	300	300	300	300
Tierbesatz Milchkühe	GV ha <sup>-1</sup>	1,36	1,28	1,36	1,36	-
Futterbedarf Import (Sojaschrot)	t a <sup>-1</sup>	582.550	168.581	174.772	174.772	-
Anbaufläche NaWaRo	ha	300	90	90	90	300
Biogassubstrat Gülle	t FM a <sup>-1</sup>	24.030	6.760	7.210	7.210	0
Biogassubstrat NaWaRo (Durchschnitt)	t FM a <sup>-1</sup>	12.750	2.410	1.990	4.480	8.620
Verweilzeit	d	45	45	45	45	60
Fermentervolumen	m <sup>3</sup>	5.160	1.350	1.300	1.640	1.840
Biogasproduktion	m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup>	3.101.400	595.900	580.500	1.001.100	1.478.500
Durchschnittliche elektrische Leistung	kW	765	128	133	233	346
Gesamtstrombedarf	MWh a <sup>-1</sup>	244.000	68.600	73.200	73.200	0
Gesamtdieselbedarf	l a <sup>-1</sup>	126.800	37.200	36.300	42.300	30.300



### 3.3.2 Schweinemast

**Tabelle 9: Übersicht über die Hauptparameter der Schweinemastbetriebe einschließlich Biogasanlagen**

Parameter	Betrieb	S300-G	S300-BG	S300-10MS	S300-30MS	S150-30MS
Landwirtschaftliche Fläche	ha	300	300	300	300	150
Tierbesatz Mastschweine	GV ha <sup>-1</sup>	1,19	1,19	1,19	0,89	0,89
Futterbedarf Import (Sojaschrot)	t a <sup>-1</sup>	199.801	199.801	199.801	149.851	74.925
Futterbedarf Import (Gerste)	t a <sup>-1</sup>	934.913	934.913	934.913	668.518	334.259
Anbaufläche NaWaRo	ha	-	0	30	90	45
Biogassubstrat Gülle	t FM a <sup>-1</sup>	-	5.640	5.640	4.230	2.120
Biogassubstrat NaWaRo (Durchschnitt)	t FM a <sup>-1</sup>	-	0	1.280	3.830	1.910
Verweilzeit	d	-	30	30	45	45
Fermentervolumen	m <sup>3</sup>	-	520	630	1.100	550
Biogasproduktion	m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup>	-	145.900	388.900	838.400	418.700
Durchschnittliche elektrische Leistung	kW	-	32	90	204	98
Gesamtstrombedarf	MWh a <sup>-1</sup>	168.200	168.200	168.200	126.100	63.100
Gesamtdieselbedarf	l a <sup>-1</sup>	29.400	29.400	29.900	30.100	15.100

Parameter	Betrieb	S1k-30MS	S300-RS	S300-RSMS	S300-100
Landwirtschaftliche Fläche	ha	1000	300	300	300
Tierbesatz Mastschweine	GV ha <sup>-1</sup>	0,89	0,89	0,89	-
Futterbedarf Import (Sojaschrot)	t a <sup>-1</sup>	499.503	149.851	149.851	-
Futterbedarf Import (Gerste)	t a <sup>-1</sup>	2.228.392	668.518	668.518	-
Anbaufläche NaWaRo	ha	300	90	90	300
Biogassubstrat Gülle	t FM a <sup>-1</sup>	14.120	4.230	4.230	0
Biogassubstrat NaWaRo (Durchschnitt)	t FM a <sup>-1</sup>	12.750	1.990	4.480	9.130
Verweilzeit	d	45	45	45	60
Fermentervolumen	m <sup>3</sup>	3.650	850	1.190	1.800
Biogasproduktion	m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup>	2.794.600	418.300	909.100	1.572.400
Durchschnittliche elektrische Leistung	kW	729	88	214	374
Gesamtstrombedarf	MWh a <sup>-1</sup>	420.500	126.100	126.100	0
Gesamtdieselbedarf	l a <sup>-1</sup>	100.500	28.400	34.200	31.000



### 3.4 Basisdaten

Zur Erreichung der Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Untersuchungen und Berechnungen werden nachfolgend die getroffenen Annahmen und Berechnungsgrundlagen erläutert. Berechnungsalgorithmen und das zu Grunde liegende Formelwerk wurde umfassend von Michel et. al. (2006) erläutert und hier nicht vollständig wiederholt /24/.

#### 3.4.1 Pflanzenproduktion

##### Dieserverbrauch

Im Rahmen der definierten Feldarbeiten und Transporte werden in dem Bereich Pflanzenproduktion fossile Energieträger in Form von Dieseldieselkraftstoff verbraucht. Der Dieserverbrauch der einzelnen Feldarbeitgänge wurde anhand der KTBL-Datenbanken ermittelt /22/, /23/. Der innerhalb dieser Studie angenommene Verbrauch an Dieseldieselkraftstoff bei der Durchführung der definierten Feldarbeitgänge und Transporte ist in Tabelle 10 zusammengefasst.

**Tabelle 10: Maschineneinsatz und Dieserverbrauch der verschiedenen Arbeitsgänge nach /23/**

<i>Arbeitsgang</i>	<i>Maschine</i>	<i>Arbeitsbreite [m]</i>	<i>Dieserverbrauch [kg Diesel ha<sup>-1</sup>]</i>
Pflügen	Anbaudrehpflug 4 Schare	1,4	26,0
Grubbern	Grubber	3	10,8
Mulchen	Scheibenegge / Schlegelmulcher	3	8,4 / 9,6
Eggen	Saatbettkombination	5	5,6
Applikation von PSM	Anbauspritze 1.500 l	18	1,1
Ausbringen v. Flüssigmist	Pumptankwagen 10 m <sup>3</sup> mit Schleppschauch	12	3 – 16 <sup>a</sup>
Saat (Getreide)	Kreiselegge mit Drillmaschine	3	13,4
Einzelkornsaat (Mais)	Einzelkornsämaschine vierreihig	3	2,8
Striegeln	Striegel	12	2,8
Hacken	Hackmaschine vierreihig	3	4,6
Ernte (Getreide)	Mähdrescher	6	16,1
Ernte (Silomais)	Maishäcksler / Selbstfahrer sechsreihig	4,5	22,5
Ernte (Klee gras-/Grassilage)	Rotationsmäherwerk mit Mähgutaufbereitung	2,8	0,7

<sup>a</sup> Der Dieserverbrauch hängt von der applizierten Flüssigmistmenge ab.

Die mit der Bereitstellung des Dieseldieselkraftstoffes (d. h. Produktions- und Transportprozesse) zusammenhängenden Umweltwirkungen wurden bereits in vielen Studien (z. B. /30/, /3/, /11/, /8/) diskutiert. Im Rahmen dieser Studie wurde auf die Ergebnisse von ECOINVENT (2004) /8/ zurückgegriffen. Eine Zusammenfassung der unterstellten Umweltwirkungen der Dieseldieselkraftstoffbereitstellung ist in Tabelle 11 dargestellt.



**Tabelle 11: Unterstellter Primärenergieeinsatz und CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>-, N<sub>2</sub>O- und NH<sub>3</sub>-Emissionen der Bereitstellung von Dieselkraftstoff nach /8/**

<i>Primärenergieeinsatz</i> [MJ kg <sup>-1</sup> Diesel]	<i>Emissionen</i> [g kg <sup>-1</sup> Diesel]			
	<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>CH<sub>4</sub></i>	<i>N<sub>2</sub>O</i>	<i>NH<sub>3</sub></i>
50,4	441	1,6	0,01	0,01

Abgesehen von den Umweltwirkungen während der Bereitstellung von Dieselkraftstoff ist dessen energetische Nutzung in Landwirtschaftsmaschinen mit verschiedenen direkten Emissionen verbunden. Die Freisetzung von CO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub> kann nach Kaltschmitt & Reinhardt (1997) hierbei verhältnismäßig einfach anhand des Kohlenstoff- bzw. Schwefelgehaltes des Diesels abgeleitet werden /21/. Die Quantifizierung weiterer Schadgasemissionen (beispielsweise NO<sub>x</sub>, CO oder flüchtiger Kohlenwasserstoffe) ist jedoch schwieriger, da die Höhe der Freisetzung dieser Schadgase weniger von der Kraftstoffzusammensetzung abhängt, sondern insbesondere von der Leistung des Motors und dessen Lastzustand bestimmt werden (/21/, /30/, /8/). Die Freisetzung von Schadgasen aufgrund der energetischen Nutzung von Diesel in Landwirtschaftsmaschinen wurde hierbei anhand der Datenbasis von ECOINVENT (2004) abgeschätzt /8/. Dementsprechend wurde unterstellt, dass bei dem Verbrauch von einem Kilogramm Dieselkraftstoff durchschnittlich die in Tabelle 12 aufgeführten Schadgasmengen freigesetzt werden.

**Tabelle 12: Emissionen bei der energetischen Nutzung von Diesel in Landwirtschaftsmaschinen nach /8/**

<i>Emissionen [g kg<sup>-1</sup> Diesel]</i>					
<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>CO</i>	<i>CH<sub>4</sub></i>	<i>N<sub>2</sub>O</i>	<i>NO<sub>x</sub></i>	<i>SO<sub>2</sub></i>
3.120	6,4	0,13	0,12	42,6	1,01

### Mineraldüngereinsatz

Bei allen definierten Modellbetrieben kommen mineralische Düngemittel zur Anwendung. Die bei den definierten Modellbetrieben eingesetzten Mengen an P- und K-Düngern sind in Tabelle 13 und Tabelle 14 zusammengefasst. Dabei ist die Nutzung der Gärreste bei den Betrieben mit Biogasanlage bereits berücksichtigt. Darüber hinaus wird unterstellt, dass bei jedem Modellbetrieb und dessen Biogasvarianten zur Verbesserung der Bodenqualität 200 kg Kalk ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> ausgebracht werden.

**Tabelle 13: Eingesetzte Menge an Düngemitteln der Modellbetriebe.**

	<i>Betriebsvariante</i>									
	<i>300-G</i>	<i>300-BG</i>	<i>300-10MS</i>	<i>300-30MS</i>	<i>150-30MS</i>	<i>1k-30MS</i>	<i>300-30GS</i>	<i>300-30RS</i>	<i>300-RSMS</i>	<i>300-100</i>
	<i>Einsatz von Kalkammonsalpeter [kg a<sup>-1</sup>]</i>									
Milchviehbetriebe	116.045	110.027	108.737	99.859	49.917	332.870	99.000	113.069	127.404	27.672
Schweinemastbetriebe	109.925	102.843	97.401	80.832	40.441	269.438	-	101.567	128.822	0
	<i>Phosphordüngereinsatz [kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a<sup>-1</sup>]</i>									
Milchviehbetriebe	11.351	11.351	10.234	9.173	4.585	30.581	8.451	9.194	9.485	4.118
Schweinemastbetriebe	3.410	3.410	2.301	3.174	1.593	10.580	-	2.624	3.485	3.990
	<i>Kaliumdüngereinsatz [kg K<sub>2</sub>O a<sup>-1</sup>]</i>									
Milchviehbetriebe	20.520	20.520	21.448	20.095	12.095	80.692	17.092	25.129	25.480	16.649
Schweinemastbetriebe	0	0	0	0	0	0	-	0	1.124	16.392
	<i>Kalkeinsatz [kg a<sup>-1</sup>]</i>									
Milchviehbetriebe	60.000	60.000	60.000	60.000	30.000	200.000	60.000	60.000	60.000	60.000
Schweinemastbetriebe	60.000	60.000	60.000	60.000	30.000	200.000	-	60.000	60.000	60.000

Die aus der Bereitstellung der Mineraldünger resultierenden Umweltwirkungen wurden auf der Basis der Ergebnisse von ECOINVENT (2004) ermittelt /8/. Der hierfür unterstellte spezifische Primärenergieverbrauch sowie die CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>-, N<sub>2</sub>O- und NH<sub>3</sub>-Emissionen der Bereitstellung des eingesetzten Mineraldüngers sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

**Tabelle 14: Primärenergieaufwand und CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>-, N<sub>2</sub>O- und NH<sub>3</sub>-Emissionen der Bereitstellung von N-, P- und K-Düngemitteln sowie Kalk nach /8/**

<i>Dünger</i>	<i>Bezug</i>	<i>Primär- energieeinsatz [MJ]</i>	<i>Emissionen [g]</i>			
			<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>CH<sub>4</sub></i>	<i>N<sub>2</sub>O</i>	<i>NH<sub>3</sub></i>
Stickstoff	1 kg N	53,0	2.732	3,0	18,9	8,9
Phosphat	1 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	20,7	1.279	1,2	0,04	0,04
Kalium	1 kg K <sub>2</sub> O	7,7	417	0,9	0,04	0,02
Kalk	1 kg CaO	0,7	40,9	0,5	0,001	0,001

### Pflanzenschutzmittel

Pflanzenschutzmittel kommen im konventionellen Landbau regelmäßig zum Einsatz. Für die definierten Modellbetriebe wird unterstellt, dass die in der folgenden Tabelle zusammengefassten Pflanzenschutzmittelgaben verabreicht werden.

**Tabelle 15: Eingesetzte Menge an Pflanzenschutzmitteln.**

	<i>Betriebsvariante</i>									
	<i>300-G</i>	<i>300-BG</i>	<i>300-10MS</i>	<i>300-30MS</i>	<i>150-30MS</i>	<i>1k-30MS</i>	<i>300-30GS</i>	<i>300-30RS</i>	<i>300-RSMS</i>	<i>300-100</i>
	<i>Einsatz von Pflanzenschutzmitteln [kg AS a<sup>-1</sup>]</i>									
Milchviehbetriebe	375,0	375,0	375,0	355,0	177,5	1.183,4	275,0	355,0	445,0	210,0
Schweinemastbetriebe	540,0	540,0	540,0	520,0	260,0	1.733,4	-	520,0	610,0	300,0

Die Umweltwirkungen der Bereitstellung der Pflanzenschutzmittel wurden auf der Basis der Ergebnisse von ECOINVENT (2004) abgeschätzt /8/. Der hierbei unterstellte Primärenergieaufwand sowie die CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>-, N<sub>2</sub>O- und NH<sub>3</sub>-Emissionen sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

**Tabelle 16: Primärenergieverbrauch und ausgewählte Klimagasemissionen für die Bereitstellung von Pflanzenschutzmitteln /8/**

	<i>Primärenergieverbrauch [MJ kg<sup>-1</sup>]</i>	<i>Emissionen [mg kg<sup>-1</sup>]</i>			
		<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>CH<sub>4</sub></i>	<i>N<sub>2</sub>O</i>	<i>NH<sub>3</sub></i>
PSM	1,184	10.350	37,5	46,4	98,0

### Saat- und Pflanzgut

Die Umweltwirkungen für die Bereitstellung von Saat- und Pflanzgut wurden wie schon für die Energieträger bzw. PSM anhand der Datenbank von ECOINVENT (2004) berechnet /8/. Der Saatgutbedarf der jeweiligen Feldfrüchte wurde nach anerkannten Tabellenwerken ermittelt /23/, /25/. In Tabelle 17 sind der Verbrauch an Saatgut für das bei der Modellierung betrachtete Saat- und Pflanzgut sowie für deren Bereitstellung der spezifische Primärenergieverbrauch und die Emissionen der klimarelevanten Gase CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O und NH<sub>3</sub> zusammengefasst.



**Tabelle 17: Aufwand an Saat- und Pflanzgut sowie unterstellter Primärenergieverbrauch und ausgewählte Emissionen für deren Bereitstellung /8/**

Saat- / Pflanzgut	Primärenergie- verbrauch [MJ kg <sup>-1</sup> ]	Emissionen [g kg <sup>-1</sup> ]				Verbrauch [kg ha <sup>-1</sup> ]
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>	
Klee gras	18,14	1.078	1,31	5,71	0,03	30
Mais	9,58	520	0,59	2,80	2,04	30
Roggen	2,60	147	0,18	0,54	1,09	200
Winterweizen	3,48	198	0,23	0,92	1,46	200
Wintergerste	2,88	164	0,20	0,98	1,36	200
Raps	12,07	685	0,74	2,96	7,28	4

### 3.4.1.1 Emissionen aus dem Boden und nach Applikation von Wirtschaftsdüngern

#### Methan

In Deutschland liegen überwiegend aerobe Böden vor, so dass diese weitgehend als Methansenken wirksam werden. Hierbei hängen die Methanaufnahmeraten weniger von den angebauten Pflanzenarten, sondern vielmehr von den durchgeführten Bodenbearbeitungsmaßnahmen sowie den Standortbedingungen ab /2/. Für die Berechnung der Methanaufnahme durch den Boden wurden die Methanaufnahmeraten nach UBA (2005) herangezogen, welche auf den Ergebnissen von Boeckx & Van Cleemput (2001) basieren /34/, /2/. Hierbei werden für Grünland und Ackerland unterschiedliche Methanaufnahmeraten unterstellt, welche in Tabelle 18 zusammengefasst sind.

**Tabelle 18: Methanaufnahmeraten landwirtschaftlicher Böden nach /2/**

	Methanaufnahme [kg CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]
Ackerland	-1,5
Grünland	-2,5

#### Lachgas

Lachgas zählt zu den bedeutendsten Klimagasen in der Landwirtschaft, welches hauptsächlich durch mikrobielle Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse im Boden freigesetzt wird. So wird in den Literatur in Lachgasfreisetzungen unterschieden, welche einerseits unabhängig von applizierten Düngern als Hintergrundemissionen emittieren und andererseits direkt mit dem Eintrag von Stickstoff in den Boden in Zusammenhang gebracht werden. Über die so genannten Hintergrundemissionen sind in der Literatur jedoch kaum Studien über die genaue



Höhe dieser N<sub>2</sub>O-Freisetzungen aus dem Boden zu finden. Neufeldt (2005) analysierte für das Bundesland Baden-Württemberg die landwirtschaftlichen Kohlenstoff- sowie Stickstoffflüsse und hat im Rahmen seiner Studie für Acker- und Grünland unterschiedlich hohe N<sub>2</sub>O-Hintergrundemissionen für Acker- und Grünland (vgl. Tabelle 19) ermittelt /27/. Diese Emissionsfaktoren wurden für die Bewertung der Lachgashintergrundemissionen der Modellbetriebe unterstellt.

**Tabelle 19: Hintergrundlachgasemissionen landwirtschaftlicher Böden nach /27/**

	$EF_{N_2O, BG}$ [kg N <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]
Ackerland	0,7
Grünland	0,8

Abgesehen von den Hintergrundemissionen wurden auch Lachgasemissionen berücksichtigt, deren Ursprung in der Anwendung von Stickstoffdüngern zugeschrieben wird. Diese Lachgasfreisetzungen wurden auf der Basis von IPCC (1996, 2000) veröffentlichten Emissionsfaktoren berechnet /15/, /16/. Hierbei wurde unterstellt, dass bei der Anwendung von Stickstoffdüngemitteln 1,25% der applizierten Stickstoffmenge als Lachgas emittieren. Auch für die Einarbeitung von Zwischenfrüchten bzw. Ernteresten als Gründüngung in den Boden wurde ebenfalls angenommen, dass 1,25% des eingearbeiteten Gesamtstickstoffs in Form von Lachgas emittieren /15/, /16/.

### **Ammoniak**

Die Berechnung der Ammoniakemissionen nach der Ausbringung von flüssigen Wirtschaftsdüngern wurde auf der Basis der Ergebnisse des ALFAM-Projektes durchgeführt /33/. Die NH<sub>3</sub>-Emissionen nach der Applikation von Flüssigmist und flüssigen Gärresten wurden dementsprechend nach Sjøgaard et al. (2002) bzw. Olesen et al. (2004) berechnet /33/, /29/.

Für die Berechnung der Ammoniakverluste nach Flüssigmistapplikation wurden die in Tabelle 20 zusammengefassten Parameter angewendet, welche anhand der Ergebnisse von Olesen et al. (2004) abgeleitet wurden /29/.



**Tabelle 20: Parameter der Berechnung der Ammoniakverluste nach Applikation von Flüssigmist und flüssigen Gärresten nach /29/**

<i>Parameter</i>	<i>Werte</i>
$A_{moist}$	0,0971
$B_{moist}$	0,0974
$U$	2 m s <sup>-1</sup>
$A_{man}$	0
$B_{man}$	0
$A_{apply}$	3,0198 <sup>a</sup>
$A_{inc}$	2,4291

<sup>a</sup> für die Ausbringung des Flüssigmistes mit Schleppschauch

## 3.4.2 Tierproduktion

### 3.4.2.1 Betriebsmitteleinsatz und –verbrauch

#### Elektrische Energie

In der Milchviehhaltung und der Schweineproduktion besteht ein wesentlicher Bedarf an elektrischer Energie u. a. für Stallbeleuchtung, Entmistung, Lüftung, Fütterung, Melken oder Milchkühlung (letztere nur bei der Milchviehhaltung).

Der Bedarf an elektrischer Energie der Milchviehhaltung wurde weitestgehend nach Clausen (2000) abgeleitet, der den Verbrauch an elektrischer Energie sowohl in der Milchvieh- als auch Schweinehaltung detailliert untersucht hat /5/. Hieraus sind die in Tabelle 21 zusammengefassten Werte über den Strombedarf in der Milchviehhaltung abgeleitet. In der Summe wurde folglich bei der Bilanzierung ein Stromverbrauch von 263 kWh a<sup>-1</sup> Tier<sup>-1</sup> unterstellt. Diese Annahmen stimmen auch mit den Ergebnissen weiterer Studien (z. B. /11/) überein, wobei ein Gesamtstromverbrauch von 260 kWh Tier<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> ermittelt wurde.

**Tabelle 21: Bedarf an elektrischer Energie in der Milchvieh- und Schweinehaltung nach /5/, /11/**

	<i>Energieverbrauch [kWh Tier<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]</i>
Milchviehhaltung	263
Schweinehaltung	71

Die durch die Bereitstellung von elektrischer Energie resultierenden Umweltwirkungen wurden nach ECOINVENT (2004) abgeschätzt, wobei hierfür der deutsche Strommix zugrunde gelegt wurde /8/. Der hierbei angenommene Primärenergieaufwand sowie die



Emissionen der Gase CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O und NH<sub>3</sub> der Bereitstellung von einem Megajoule elektrischer Energie sind in Tabelle 22 aufgeführt.

**Tabelle 22: Unterstellter Primärenergieeinsatz und CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>-, N<sub>2</sub>O- und NH<sub>3</sub>-Emissionen der Bereitstellung von elektrischem Strom (Strommix Deutschland) nach /8/**

<i>Primärenergieeinsatz</i> [MJ MJ <sup>-1</sup> Energieträger]	<i>Emissionen</i> [mg MJ <sup>-1</sup> Energieträger]			
	<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>CH<sub>4</sub></i>	<i>N<sub>2</sub>O</i>	<i>NH<sub>3</sub></i>
2,654	172.000	348	5,04	2,78

### Diesel

Der Verbrauch an Diesel beschränkt sich in der Tierhaltung größtenteils auf die Fütterung der Tiere. Hierbei wird das Futter mit Hilfe eines Traktors mit Blockschneider bzw. Futtermischwagen auf den Futtertisch verteilt. Nach FAL (2000) wird hierfür ein Verbrauch an Diesel von etwa 22,5 l Tier<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> in der Milchviehhaltung angenommen /11/. Bei der Schweinemast wird dagegen aufgrund eines anderen Fütterungssystems kein Diesel verbraucht /11/.

Die bei der energetischen Nutzung des Diesels in Traktoren resultierenden direkten Emissionen wie auch der Bereitstellung der Dieselmotorkraftstoffes wurden entsprechend der Pflanzenproduktion nach ECOINVENT (2004) abgeleitet /8/. Die entsprechenden Emissionsfaktoren sind bereits in Tabelle 11 und Tabelle 12 dargestellt worden.

### Futtermittel

Entsprechend den marktüblichen Gepflogenheiten werden Futtermittel teilweise aus der eigenen Produktion verwendet und teilweise zugekauft. Die importierten Futtermittelmengen sind bei der Charakterisierung der Modellbetriebe aufgeführt. Die Futterpläne wurden basierend auf BTL (2002) und VdOe (2001) erstellt /4/, /35/. Die Umweltwirkungen der Bereitstellung der importierten Futtermittel wurden nach ECOINVENT (2004) ermittelt /8/. Der hierbei unterstellte Primärenergieaufwand sowie ausgewählte Emissionen der Gerste- und Sojaschrotbereitung sind in Tabelle 16 exemplarisch zusammengefasst.



**Tabelle 23: Primärenergieverbrauch und ausgewählte Klimagasemissionen für die Bereitstellung verschiedener Futtermittel (ECOINVENT, 2004).**

	Primärenergieverbrauch [MJ kg <sup>-1</sup> ]	Emissionen [mg kg <sup>-1</sup> ]			
		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>
Gerste	3,5	198	0,23	1,13	1,45
Sojaschrot	11,7	731	0,66	3,76	2,66

### Medikamente und Futterzusatzstoffe

Über den Einsatz von Medikamenten und Futterzusatzstoffen, wie z. B. Enzyme, Mineralien oder Vitamine, liegen in der Literatur kaum Daten vor. Dies liegt einerseits darin begründet, dass es keine Datengrundlage über den Energieeinsatz und deren Umweltwirkungen gibt und andererseits der Anteil der Medikamente und Futterzusatzstoffe in der Gesamtbilanz als sehr gering eingestuft werden kann /11/. Dementsprechend wurde in dieser Studie der Einsatz von Medikamenten und Futterzusatzstoffen in der Tierproduktion nicht berücksichtigt:

#### 3.4.2.2 Emissionen aus dem Stall

##### Methan

Die Methanemissionen aus dem Stall stammen einerseits von Verdauungsprozessen der Tiere und andererseits von in Ställen zwischengelagertem Flüssig- bzw. Festmist. Die Bewertung der verdauungsbedingten Methanemissionen der Milchviehhaltung erfolgte nach IPCC (2000) auf der Basis der Bruttoenergieaufnahme der Tiere /16/. Hierbei wurde FÜR die Berechnung der Emissionsfaktoren der verdauungsbedingten Methanfreisetzung eine Methankonversionsrate  $Y_m$  von 0,06 angenommen. Die für die Berechnung der Bruttoenergieaufnahme notwendigen Parameter sind in Tabelle 24 zusammengefasst.

**Tabelle 24: Verwendete Parameter zur Bestimmung der Bruttoenergieaufnahme der Nutztiere berechnet nach /16/**

Tierart	$NE_m$ [MJ Tier <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]	$NE_l$ [MJ Tier <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]	$NE_p$ [MJ Tier <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]	$NE_{ma} / DE$ [MJ Tier <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]	$NE_g$ [MJ Tier <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]	$NE_{ga} / DE$ [MJ Tier <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]	DE [%]
Milchkuh	43,13	64,47	3,32	0,54	0	0,35	75
Färse	34,05	0	2,62	0,54	21,39	0,35	75
Jungtier (1 – 2 Jahre)	26,06	0	0	0,54	19,99	0,35	75
Jungtier (< 1 Jahr)	13,80	0	0	0,54	12,54	0,35	75

Die sich daraus ergebenden Bruttoenergieaufnahmen und Emissionsfaktoren der verdauungsbedingten Methanfreisetzung der betrachteten Nutztiere sind in Tabelle 25 zusammengefasst.



**Tabelle 25: Bruttoenergieaufnahme und Emissionsfaktoren der verdauungsbedingten Methanfreisetzung der Tiere berechnet nach /16/**

<i>Tierart</i>	<i>GE</i> <i>[MJ a<sup>-1</sup> Tier<sup>-1</sup>]</i>	<i>EF<sub>CH<sub>4</sub>,Tier</sub></i> <i>[kg CH<sub>4</sub> a<sup>-1</sup> Tier<sup>-1</sup>]</i>
Milchkuh	273,5	108
Färse	171,4	67
Jungtier 1 – 2 Jahre	140,0	55
Jungtier < 1 Jahr	81,5	32

Für die verdauungsbedingten Methanemissionen der Mastschweine wurde darüber hinaus entsprechend IPCC (1997) ein Emissionsfaktor von  $1,5 \text{ kg CH}_4 \text{ a}^{-1} \text{ Tier}^{-1}$  festgelegt /15/.

Darüber hinaus können Methanemissionen durch im Stall zwischengelagerte Exkremete freigesetzt werden. Die Ermittlung dieser Methanemissionen erfolgte ebenfalls auf der gleichen Grundlage und basiert im Wesentlichen auf der Berechnung der Methanemissionen während der Lagerung von Flüssig- und Festmist (vgl. Kap. 3.4.2.3) /16/. Demnach ist die Höhe der lagerungsbedingten Methanemissionen im Stall von der Verweildauer der Exkremete im Stall abhängig. Bei einer Verweildauer von weniger als 30 Tagen können diese Emissionen als vernachlässigbar angesehen werden /16/. Es wurden somit bei den Methanemissionen aus dem Stall für alle Modellbetriebe nur die verdauungsbedingten Methanemissionen berücksichtigt.

### Lachgas

Die Lachgasemissionen aus dem Stall liegen hauptsächlich in Nitrifikations- bzw. Denitrifikationsprozessen der im Flüssig- und Festmist vorhandenen Stickstoffverbindungen begründet. Da die Ergebnisse bisheriger Studien teilweise nur wenig belastbar sind und der Flüssigmist bei den definierten Haltungssystemen nur eine sehr geringe Verweildauer im Stall aufweist, wurden die Lachgasfreisetzungen aus dem Stall als vernachlässigbar bewertet. Dementsprechend wurden bei den definierten Modellbetrieben keine Lachgasemissionen aus dem Stall betrachtet.

### Ammoniak

Ammoniakemissionen treten im Stall in einem erheblichen Umfang auf. Nach IPCC (2000) ist die Berechnung der Ammoniakfreisetzung aus dem Stall jedoch nicht möglich /16/. Daher erfolgte die Berechnung der Ammoniakverluste aus dem Stall auf der Basis der Ergebnisse von Poulsen et al. (2001) sowie Olesen et al. (2004) /31/, /29/. Hierbei wird mit Hilfe von



Emissionsfaktoren der Anteil des von den Tieren ausgeschiedenen Stickstoffs berechnet, welcher als Ammoniak emittiert:

Die Emissionsfaktoren für die Bestimmung der Ammoniakfreisetzungen aus dem Stall hängen dabei vom Haltungssystem ab. Bei den Modellbetrieben wurde entsprechend dem definierten Haltungssystemen für die Milchviehhaltung ein Emissionsfaktor von 0,04 bzw. für die Schweinhaltung 0,08 definiert /29/.

### 3.4.2.3 Emissionen während der Flüssigmistlagerung

Die Berechnung der Emissionen während der Lagerung von Flüssig- und Festmist erfolgte im Wesentlichen auf der Basis von IPCC (2000) /16/. Bei der Berechnung der Ammoniakverluste wurde jedoch auf die Ergebnisse von Olesen et al. (2004) zurückgegriffen, da IPCC (2000) hierfür keine Berechnungsgrundlage bietet /29/. Weiterhin ist anzumerken, dass in diesem Kapitel ausschließlich die Berechnungsgrundlagen der Referenzbetriebe ohne Biogasanlage diskutiert werden. Die Emissionen bei der Lagerung der vergorenen Gülle bzw. Gärreste werden in Kap. 3.4.3.3 separat betrachtet.

#### Methan

Die Methanemissionen während der Lagerung von Flüssig- bzw. Festmist wurden nach IPCC (2000) berechnet /16/. Für die Berechnung der Methanemissionen während der Lagerung wurden die in Tabelle 26 aufgeführten Methankonversionsfaktoren  $k_{MCF}$  und Methanbildungspotenziale  $B_0$  verwendet.

**Tabelle 26:** Methankonversionsfaktoren  $k_{MCF}$  und Methanbildungspotenziale  $B_0$  für gelagerten Flüssig- und Festmist nach /16/

<i>Art der Exkremente</i>	$k_{MCF}$	$B_0 [Nm^3 kg^{-1} oTS]$
Rinderflüssigmist	0,39	0,20
Schweineflüssigmist	0,39	0,27

#### Lachgas

Die Berechnung der Lachgasemissionen während der Flüssig- und Festmistlagerung erfolgte ebenfalls nach IPCC (2000) /16/. Der Berechnung der Lachgasemissionen liegen die in Tabelle 27 zusammengefassten Emissionsfaktoren  $EF_{N_2O,Lager}$  zugrunde.


**Tabelle 27: N<sub>2</sub>O-Emissionsfaktoren für die Lagerung von Flüssig- und Festmist nach /16/**

<i>Art der Exkremente</i>	<i>EF<sub>N<sub>2</sub>O, Lager</sub></i>
Flüssigmist unvergoren	0,001
Flüssigmist vergoren	0,001

### Ammoniak

Die Bestimmung der lagerungsbedingten Ammoniakemissionen von Flüssig- und Festmist wurde nach Olesen et al. (2004) durchgeführt /29/. Hierbei stehen die Ammoniakemissionen, wie bei der Berechnung der Lachgasemissionen, im direkten Verhältnis zum Stickstoffgehalt des Flüssig- bzw. Festmistes.

Es wird bei der Bestimmung der Ammoniakverluste zwischen verschiedenen Flüssig- und Festmistarten sowie der Art der Abdeckung unterschieden /29/. Ausgewählte Emissionsfaktoren für die Berechnung der Ammoniakverluste während der Lagerung von Flüssig- und Festmist sind in Tabelle 28 zusammengefasst. Bei der Berechnung der Ammoniakverluste wurde für die Lagerung der unvergorenen Gülle bei allen Modellbetrieben die Bildung einer geschlossenen Schwimmdecke unterstellt. Die Ammoniakemissionen während der Lagerung von vergorener Gülle werden in Kap. 3.4.3.3 näher erläutert.

**Tabelle 28: NH<sub>3</sub>-Emissionsfaktoren für die Lagerung von Flüssig- und Festmist nach /29/**

<i>Art der Exkremente</i>	<i>Abdeckung</i>	<i>Emissionsfaktoren</i>
Flüssigmist unvergoren	keine	0,080
	Stroh	0,016
	Schwimmdecke	0,024
Flüssigmist vergoren	keine	0,200
	Stroh	0,040
	Schwimmdecke	0,040
Festmist unbehandelt (Tretmiststall)	keine	0,100
Festmist unbehandelt (Tiefstreustall)	keine	0,200

### 3.4.3 Biogasproduktion

Die Implementierung von Biogasanlagen in landwirtschaftliche Betriebe hat stets eine Veränderung der betrieblichen Umweltbilanz zur Folge. Hierbei sind einerseits die Umweltwirkungen durch den Bau bzw. den Abriss der Biogasanlagen, sowie die betriebsbedingten zusätzlichen oder auch eingesparten Emissionen zu berücksichtigen. Andererseits können durch den Betrieb einer Biogasanlage fossile Brennstoffe durch regenerative Energien ersetzt werden. Die Einsparungen an fossilen Energieträgern sind der Biogasanlage wiederum in der



Gesamtbilanz gutzuschreiben. Die unterstellten Annahmen der Bewertung der ökologischen sowie ökonomischen Auswirkungen der Biogasnutzung werden in diesem Kapitel beschrieben.

### 3.4.3.1 Bau und Abriss der Biogasanlagen

Der Bau einer Biogasanlage kann einen erheblichen Einfluss auf die spezifischen Gesamtemissionen haben. So gibt Nill (2004) für eine Biogasanlage mit 200 kW<sub>elekt</sub> installierter Leistung den Anteil des Baus an dem Gesamtverbrauch an fossiler Primärenergie wie auch an freigesetzten Treibhausgasemissionen je produzierter kWh elektrischer Energie mit über 70% an /28/. Dieser Anteil von 70% wird weitgehend durch die Bereitstellung der für den Bau notwendigen Rohstoffe verursacht. Im Gegensatz dazu liegen die Emissionen mit versauernder bzw. eutrophierender Wirkung weniger im Bau bzw. Abriss der Biogasanlage begründet, sondern werden überwiegend während des Betriebes einer Biogasanlage emittiert /28/. Der Einfluss der Größe wie auch der technischen Ausrüstung einer Biogasanlage auf die Gesamtemissionen wurde bereits von Edelmann et al. (2001) untersucht, wobei sie zu dem Schluss kamen, dass unterschiedliche technische Ausrüstungen einer Biogasanlage keine signifikanten Differenzen in den Gesamtumweltwirkungen aufweisen /9/.

Die Umweltwirkungen, die mit dem Bau der Biogasanlage im Zusammenhang stehen, wurden für die Modellierung der Betriebe nach ECOINVENT (2004) ermittelt /8/. Hierbei wurden insbesondere die indirekten Umweltwirkungen der Bereitstellung der zur Anwendung kommenden Baurohstoffe (z. B. Beton, Stahl, Kunststoffe) sowie die notwendigen Transportprozesse berücksichtigt.

Im Gegensatz zum Bau der Biogasanlage ist dem Rückbau nach Ablauf der Nutzung bezüglich der Gesamtemissionen grundsätzlich nur eine untergeordnete Bedeutung zuzuschreiben /28/, /9/, /6/, /26/. Bei der Bilanzierung der Modellbetriebe wurde hierbei unterstellt, dass die errichteten Bauten zurückgebaut und die unterschiedlichen Komponenten recycelt und z. T. deponiert werden. Es wurde hierbei eine Transportwegentfernung von 25 km unterstellt.



### 3.4.3.2 Betriebsmitteleinsatz für den Betrieb einer Biogasanlage

#### Elektrische Energie

Elektrische Energie wird in einer Biogasanlage, um beispielsweise Rührwerke, Pumpen sowie weitere Leittechnik zu betreiben, in einem nicht unerheblichen Umfang benötigt. Viele Studien in der Literatur (z. B. /9/, /6/) gehen davon aus, dass während des Betriebes einer Biogasanlage durchschnittlich 10% der erzeugten elektrischen Energie für den Betrieb der Biogasanlage aufgewendet wird, wobei dieser Anteil bei sehr kleinen Biogasanlagen höher ausfallen kann. Im Rahmen dieser Studie wurde ein durchschnittlicher Energiebedarf von 10% der erzeugten elektrischen Energie unterstellt.

#### Diesel

Durch den Betrieb einer Biogasanlage sind zusätzliche Fahrten mit Traktoren und Radladern erforderlich, um die Substrate bereitzustellen und in die Biogasanlagen einzubringen sowie um den bei Kofermentation zusätzlich anfallenden Gärrest auf den Feldern auszubringen. Der zusätzliche Aufwand, welcher für das Ausbringen der Gärreste notwendig ist, wurde bereits im Rahmen der Bilanzierung der Pflanzenproduktion erfasst und dementsprechend berücksichtigt. Außerdem wurden die zusätzlichen Arbeitsgänge zur Bergung und Einlagerung der betriebseigenen Kosubstrate berechnet. Bei der Beschickung der Biogasanlage wird weiterhin unterstellt, dass die Entfernung zwischen dem Substratlager und dem Annahmebehälter der Biogasanlage durchschnittlich 200 m beträgt und somit nach KTBL (2004) ca. 1,9 l Diesel t<sup>-1</sup> Substrat verbraucht werden /23/.

### 3.4.3.3 Direkte Emissionen durch Biogasnutzung

#### Emissionen durch Leckagen

Während des Betriebes einer Biogasanlage sind Emissionen, verursacht durch verschiedene Undichtigkeiten in der Anlage, nicht auszuschließen. Hierbei kann Biogas beispielsweise durch den Biogasspeicher hindurch diffundieren oder aufgrund von Undichtigkeiten bei der Substratzufuhr oder an Rohrverbindungen bzw. Ventilen austreten.

Bei der Bilanzierung der Modellbetriebe wurden die Verluste von Biogas durch Leckagen nach ELTRA (2003) bzw. Olesen et al. (2004) abgeschätzt /10/, /29/. Dementsprechend



wurde angenommen, dass 1,8% des in der Biogasanlage produzierten Methans aufgrund von Leckagen und Undichtigkeiten freigesetzt wird.

### Emissionen durch die Verbrennung im BHKW

Die energetische Nutzung von Biogas im BHKW ist mit einer Vielzahl verschiedener Umweltwirkungen verbunden, wobei das direkt vom Biogas stammende CO<sub>2</sub> als klimaneutral angesehen wird und somit bei der Bilanzierung nicht berücksichtigt wurde.

Neben CO<sub>2</sub> sind insbesondere die Freisetzung von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), Methan, Kohlenmonoxid und Schwefeloxiden von wesentlicher Bedeutung /9/. Die Höhe der Emissionen dieser Schadgase wurde im Rahmen dieser Studie anhand der Ergebnisse von Edelman et al. (2001) abgeschätzt, da diese Ergebnisse auf einer Vielzahl von einzelnen Messergebnissen basieren. In Tabelle 29 sind die unterstellten Emissionen von CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> eines Gas-Otto-BHKW sowie eines Zündstrahl-BHKW bezogen auf 1 kg Biogas zusammengefasst.

**Tabelle 29: Unterstellte Emissionswerte für die Verbrennung von Biogas im Zündstrahl-BHKW /9/**

	<i>Emissionen je kg Biogas [g kg<sup>-1</sup>]</i>				
	<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>CO</i>	<i>NO<sub>2</sub></i>	<i>SO<sub>2</sub></i>	<i>CH<sub>4</sub></i>
Gas-Otto-BHKW	0	1,33	0,53	0,80	0,07
Zündstrahl-BHKW	1890	2,83	1,15	0,87	0,06

## 4 Ergebnisse und Vergleich

Wie oben bereits ausgeführt wurde, sind die Umweltwirkungen getrennt für zwei funktionelle Einheiten zu untersuchen. Im Folgenden werden daher die Ergebnisse für die betrachteten Umweltbereiche auf Basis der landwirtschaftlichen Betriebsführung und anschließend auf der Basis des erzeugten Stroms dargestellt. Daran anschließend werden besonders interessante Fragestellungen anhand genauer Sensitivitäten untersucht. Abschließend wird ein Vergleich mit anderen Stromerzeugungstechnologien auf Basis der funktionellen Einheit MWh gezogen.

### 4.1 Analyse auf Betriebsebene - Milchbetriebe

Um zu ermitteln, welche Betriebsweise und welche nachwachsenden Rohstoffe für Betriebe mit festgelegter Flächenausstattung die ökologisch größten Vorteile bei Einbindung einer Biogasanlage in den Betriebsablauf aufweisen, wird zuerst die Analyse auf Betriebsebene



durchgeführt. Dabei erhalten die Betriebe mit Biogasanlage eine Gutschrift für den bereitgestellten Strom.

Da aus der Tierhaltung wesentliche Emissionen herrühren, wurden für Betriebskonzepte mit reduziertem Viehbestand entsprechende Referenzbetriebe mit gleicher Viehbesatzdichte ohne Biogaserzeugung berücksichtigt. Die Nomenklatur erfolgt folgendermaßen: z. B. „M300-G-20“ ist der Milchviehbetrieb, wie die Grundvariante (300 Hektar) ohne eine Erzeugung von Biogas, mit einem um 20% reduziertem Viehbesatz. In den Grafiken sind Betriebe mit unterschiedlichem Viehbesatz durch eine Zwischenlinie getrennt dargestellt.

Dem Betrieb mit reiner Pflanzenproduktion (100% NaWaRo) konnte kein entsprechender Referenzbetrieb gegenübergestellt werden. Es werden nur die reinen Emissionen bzw. Aufwendungen dargestellt, da diese Form der Betriebsführung keine Verdrängung eines Tiere produzierenden Betriebs verursachen würde. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse (vgl. Kap. 4.4) werden dieser reinen NaWaRo-Betriebsführung die Emissionen, welche aus einer extensiv bewirtschafteten Brache herrühren, gegenübergestellt.

#### **4.1.1 Kumulierter Primärenergieaufwand**

Den Aufwendungen, welche bei allen Betriebsformen zwischen 20 und ca. 30 GJ je ha und Jahr auf relativ gleichem Niveau liegen, stehen unterschiedlich hohe Gutschriften für den erzeugten Strom gegenüber. Je größer die erzeugte Strommenge desto geringer fällt das Gesamtergebnis aus. Deutlich ist der Aufwand, welcher für den Betrieb der Biogasanlage nötig ist, zu erkennen. Die Aufwendungen für den Bau einer Biogasanlage haben nur marginalen Einfluss. Der Betrieb 100% NaWaRo produziert eine besonders große Strommenge, welches sich in einer großen Gutschrift niederschlägt. Dieser Betrieb ist aber mit den anderen nur bedingt vergleichbar, weil keine Tiere produziert werden, diese logischerweise aber an anderer Stelle produziert werden müssten und dort Emissionen bzw. primärenergetische Aufwendungen verursachen würden. Unter den verschiedenen Optionen stellt sich insgesamt die kombinierte Nutzung von Gülle und einem Teil nachwachsender Rohstoffe als besonders positiv und verbunden mit einer Überkompensierung des eigenen Energiebedarfes dar (abgesehen von der Nutzung von Roggenganzpflanzensilage).

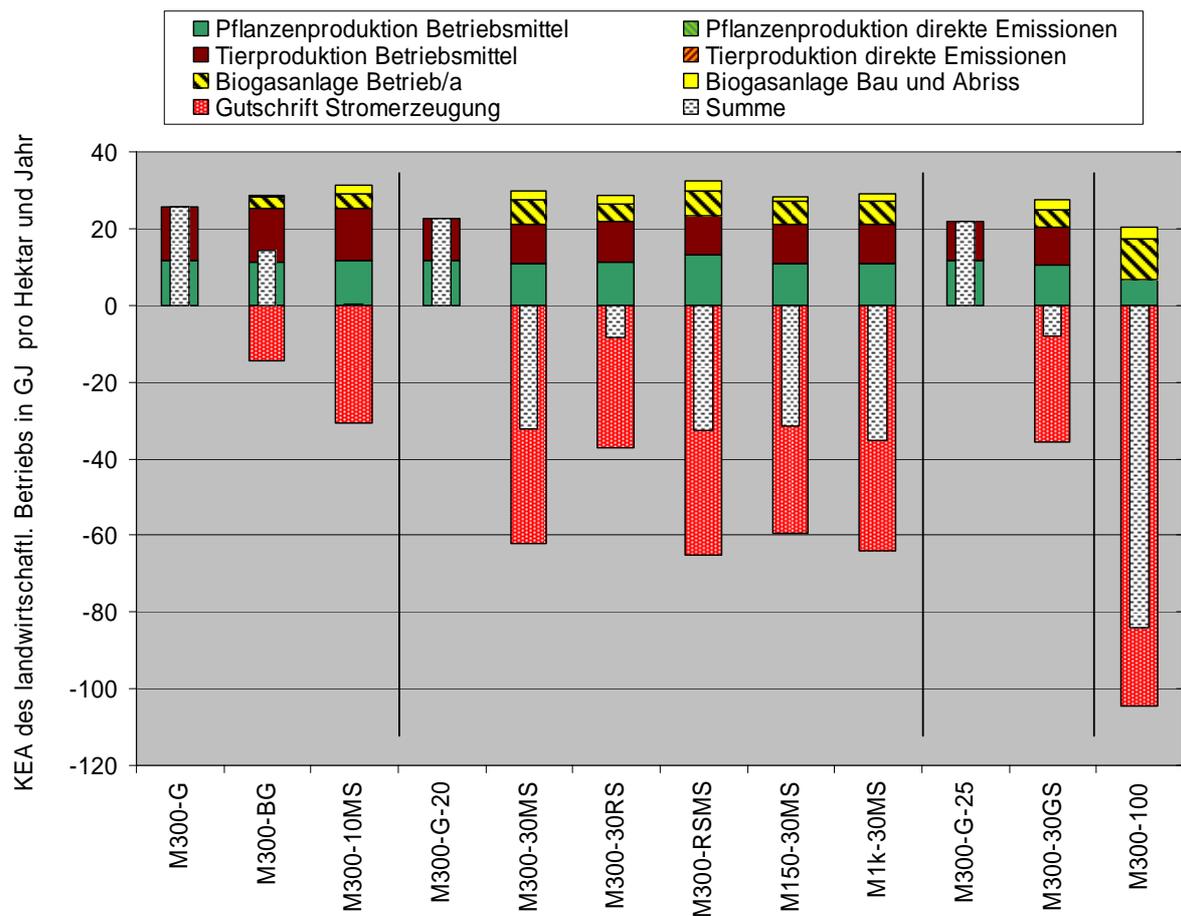


Abbildung 4: Primärenergieaufwand der Milchviehbetriebe in GJ je ha und Jahr

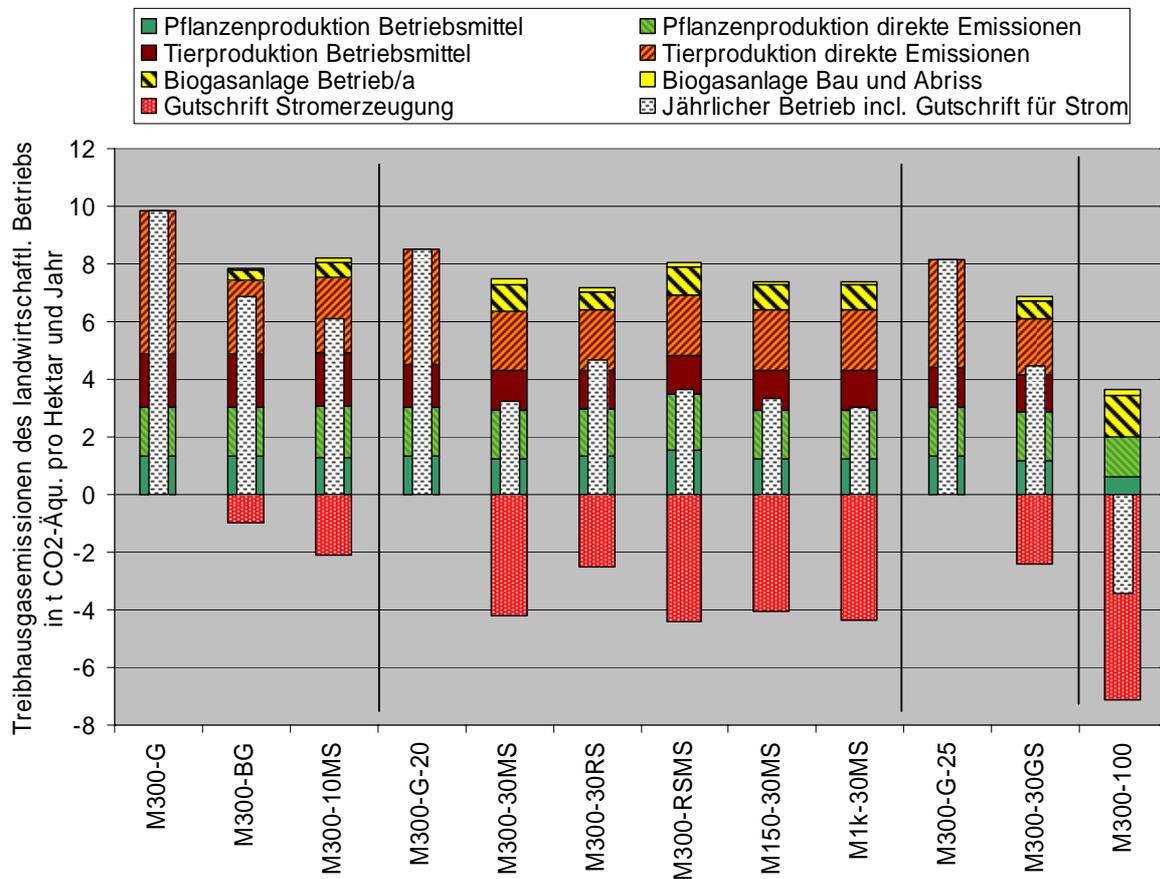
#### 4.1.2 Anthropogener Treibhauseffekt

Der besonders große Einfluss der Tierhaltung auf die Treibhausgasemissionen der landwirtschaftlichen Betriebe wird in der folgenden Abbildung deutlich. Hier schlagen vor allem die direkten Emissionen aus der Güllelagerung zu Buche, welche ca. die Hälfte der Gesamt-emissionen ausmachen (linke Säule). Die Emissionen aus Pflanzen- und Tierproduktion haben einen Anteil von je einem Drittel an der anderen Hälfte der gesamten Emissionen.

Wird die Gülle dem Fermentationsprozess zugeführt, halbieren sich die direkten Emissionen aus der Tierhaltung. Die anderen Emissionsquellen werden davon nur unwesentlich beeinflusst (siehe Abbildung 5: 2. Säule von links). Der zusätzliche Aufwand für den Betrieb der Biogasanlage wird in diesem Beispiel (wie bei allen Betrieben) durch die Stromgutschrift überkompensiert. Wird zusätzlich ein Mehraufwand in der Pflanzenproduktion betrieben



(3. Säule), um mehr Biogas erzeugen zu können, verringern sich die resultierenden Gesamtemissionen aufgrund der Stromgutschrift weiter.



**Abbildung 5: Treibhausgasemissionen der Milchviehbetriebe in t CO<sub>2</sub>-Äquivalente je ha und Jahr**

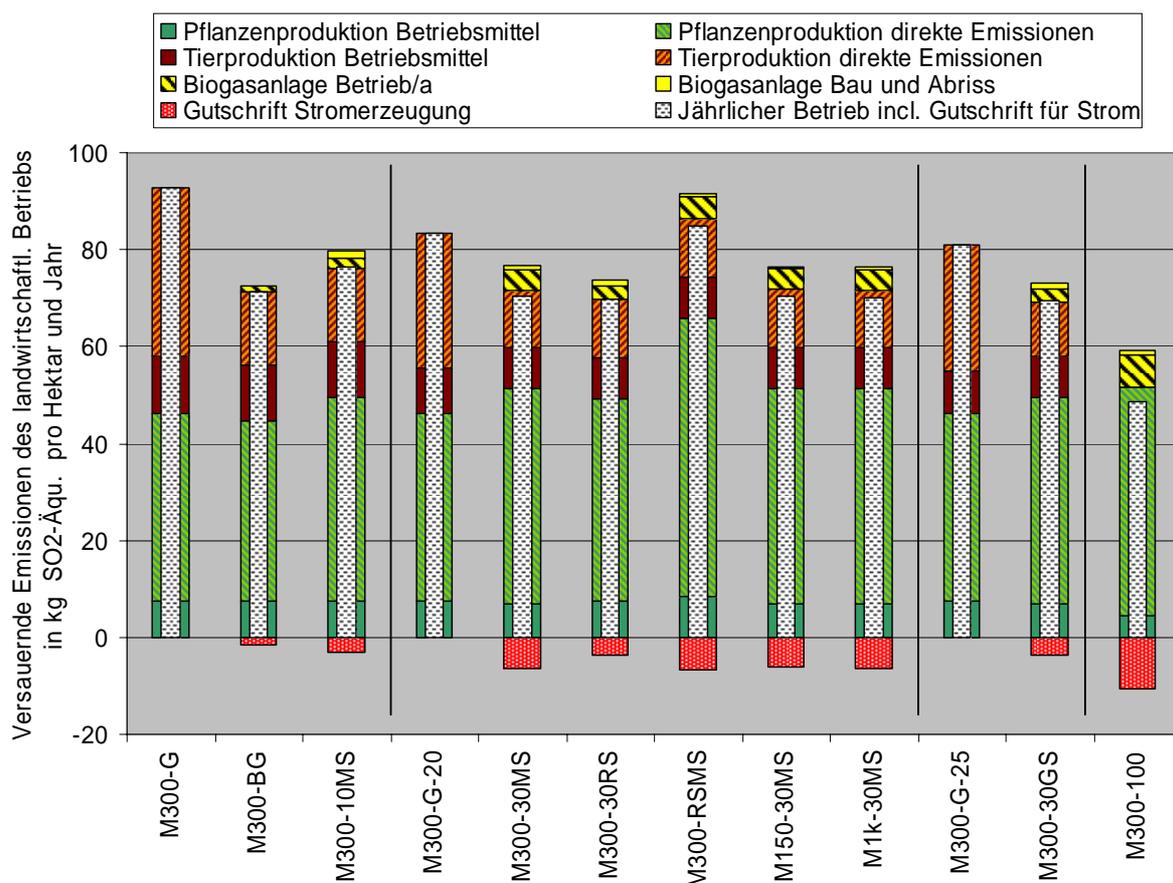
Betrachtet man die Betriebe mit 20% reduziertem Viehbesatz genauer (4. bis 9. Säule von links), so werden Unterschiede bei einzelnen landwirtschaftlichen Rohstoffen deutlich. Roggensilage weist durch eine geringere Biogasausbeute (kleinere Gutschrift für die Stromerzeugung) bei annähernd gleichem pflanzenbaulichem Aufwand in Summe also höhere Emissionen als z. B. das Wirtschaftssystem mit Maissilage (5. Säule) auf. Ein zwei-Kultursystem (7. Säule von links Mais- und Roggensilage) bringt im Vergleich zu alleiniger Maissilage geringe Vorteile. Den erhöhten pflanzenbaulichen Aufwendungen steht ein nur unwesentlich erhöhter Gasertrag und die daraus resultierende Stromgutschrift gegenüber. Grassilage (2. Säule von rechts) mit 25% reduziertem Viehbesatz kann mit etwas geringerem pflanzenbaulichem Aufwand erzeugt werden. Da aber der Gasertrag in der Biogasanlage wiederum geringer ausfällt als beim Betrieb mit Maissilage, sind die



resultierenden Emissionen höher. Im Vergleich zu Roggensilage schneidet Grassilage dagegen etwas besser ab. Eine Sonderrolle nimmt der Betrieb 100% NaWaRo ein (rechte Säule). Die Bewirtschaftung verfolgt ausschließlich das Ziel, möglichst viel und geeignete landwirtschaftliche Rohstoffe für den Betrieb einer Biogasanlage zu erzeugen. Daher ist es nicht überraschend, wenn hier aus der größten Stromgutschrift in Summe die geringsten Emissionen resultieren. Es bleibt zu bedenken, dass in dieser Betriebsform keine Viehhaltung realisiert wird, also keine Milch- und Fleischproduktion stattfindet. Da der Markt in Deutschland aber eine konstante Menge an Milch und Fleisch nachfragt, muss diese Produktion in anderen Betrieben stattfinden. Die, wie oben bereits erwähnt, hohen Emissionen aus der Tierhaltung treten daher bei einer Betriebsumstellung an anderer Stelle auf.

#### **4.1.3 Emissionen mit versauernder Wirkung**

Wesentlichen Einfluss auf die Emissionen mit versauernder Wirkung haben die direkten versauernd wirkenden Emissionen aus Tierhaltung und Pflanzenbau. Zusammen machen diese beiden Kategorien mehr als 2/3 der Gesamtemissionen aus (Abbildung 6, linke Säule). Wie auch bei den Treibhausgasemissionen werden die direkten Emissionen aus der Tierhaltung durch den Fermentationsprozess halbiert. Die restlichen betrieblichen Emissionen mit versauernder Wirkung bleiben davon jedoch nahezu unbeeinflusst (2. Säule von links). Der zusätzliche Aufwand für den Betrieb und die Errichtung der Biogasanlage wird von der Stromgutschrift gerade kompensiert. Wird ein weiterer zusätzlicher pflanzenbaulicher Aufwand betrieben, um mehr Biogas (und damit Strom) erzeugen zu können, wird dieser nicht kompensiert und höhere Gesamtemissionen mit versauernder Wirkung sind dementsprechend die Folge (3. Säule von links im Vergleich zur 2. Säule).



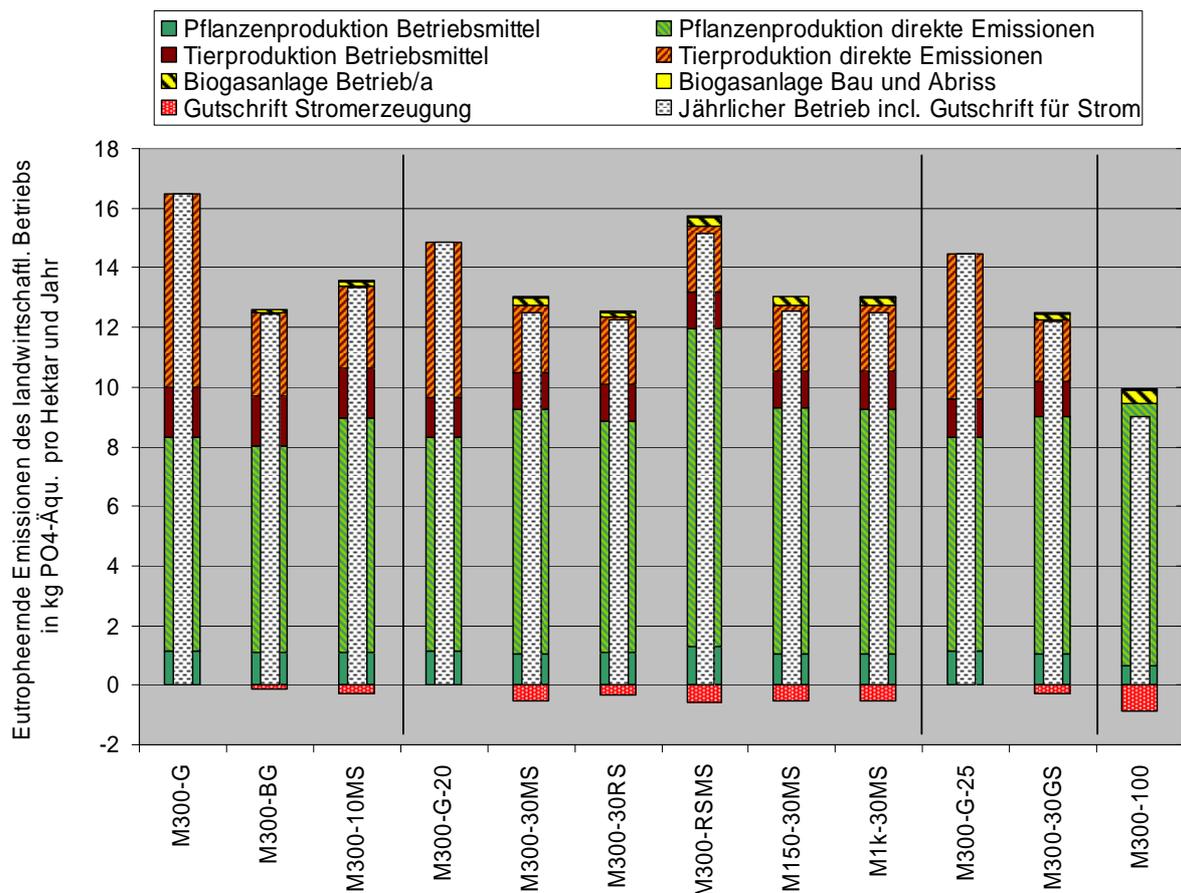
**Abbildung 6: Versauernd wirkende Emissionen der Milchviehbetriebe in kg SO<sub>2</sub>-Äquivalente je ha und Jahr**

Besonders deutlich wird diese Tendenz beim 2-Kultursystem (7. Säule von links) mit reduziertem Viehbesatz. Es ist ein erhöhter pflanzenbaulicher Aufwand zu sehen, der durch die Biogasgewinnung und die daraus resultierende Stromerzeugung nicht kompensiert wird. Aus diesem Grund schneidet das System mit Grassilage (2. Säule von rechts) in Bezug auf versauernd wirkende Emissionen im Vergleich aller Viehbetriebe am besten ab. Dieser Vorteil ist nicht durch den kleinsten Viehbesatz sondern durch die in diesem Fall relativ geringen pflanzenbaulichen Aufwendungen begründet. Das 100% NaWaRo System (rechte Säule) hat im Vergleich zu den Betrieben mit Tierproduktion um 20 bis 40% geringere versauernd wirkende Emissionen. Dieser Vorteil ist jedoch ausschließlich durch die fehlende Tierproduktion begründet.

#### 4.1.4 Emissionen mit eutrophierender Wirkung

Die Aussagen zu den versauernd wirkenden Emissionen treffen im Wesentlichen auch auf die eutrophierend wirkenden Emissionen zu. Die direkten Emissionen aus dem Pflanzenbau und

der Tierhaltung sind für den Hauptanteil der Emissionen (ca. 80%, linke Säule) verantwortlich. Der direkte Anteil aus der Tierhaltung wird durch die Fermentation auf ca. 40% des Ausgangswertes reduziert (2. Säule von links). Die Stromgutschrift kompensiert gerade eben den zusätzlichen Aufwand für den Betrieb und Bau der Biogasanlage. Besonders großen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben die direkten Emissionen des Pflanzenbaus (vgl. z. B. 2 Kulturenanbau, 7. Säule von links), der von der höheren Biogaserzeugung und der resultierenden Stromgutschrift bei weitem nicht kompensiert werden kann.



**Abbildung 7: Eutrophierend wirkende Emissionen der Milchviehbetriebe in kg PO<sub>4</sub>-Äquivalente je ha und Jahr**

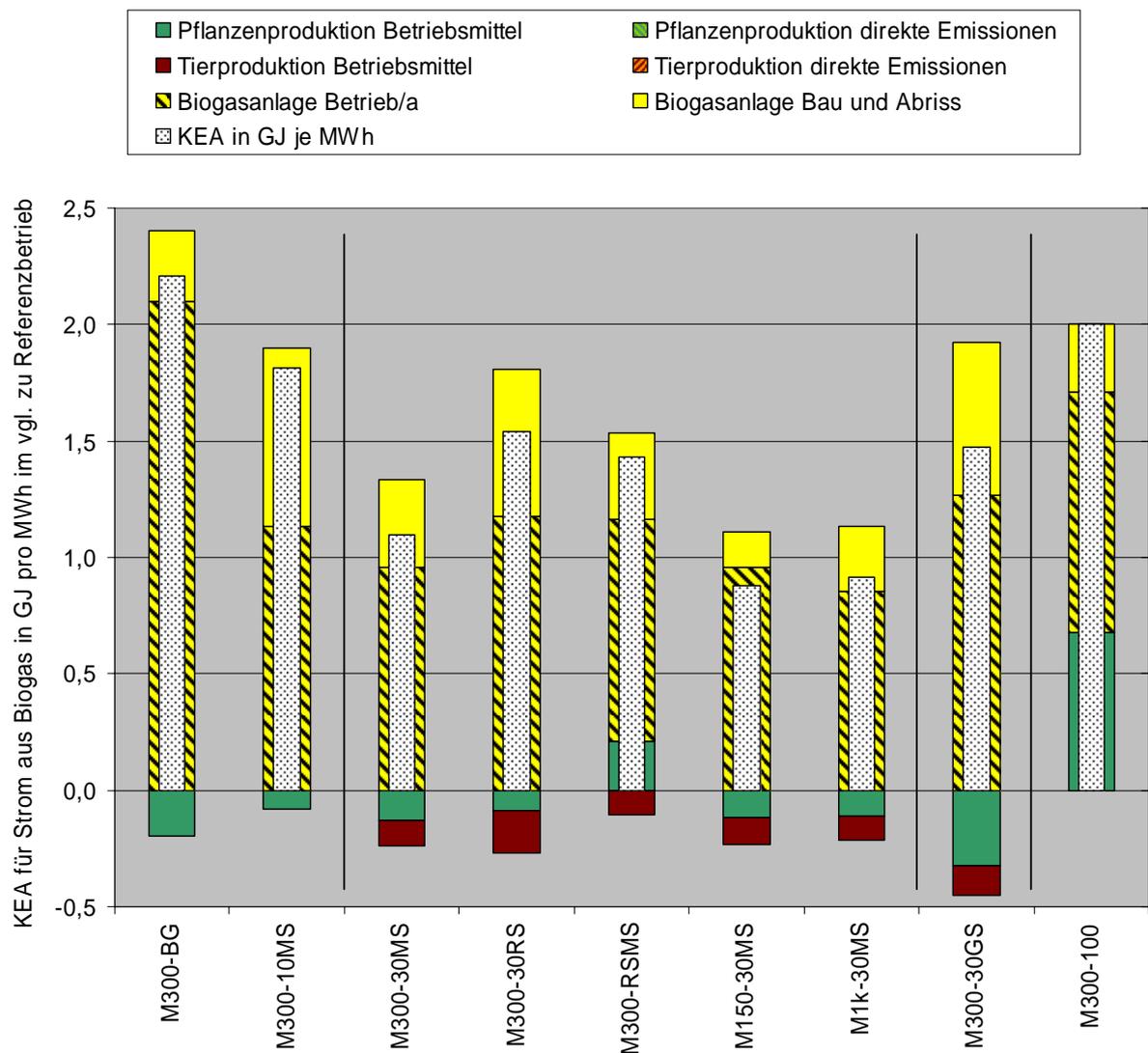


## 4.2 Analyse der Milchproduktionsbetriebe auf Stromerzeugungsebene

Um die Aufwendungen bzw. Emissionen auf die Menge des erzeugten Stroms beziehen zu können werden die unterschiedlichen Betriebe zum jeweiligen Referenzsystem mit gleichem Viehbesatz in Bezug gesetzt. Es wird jeweils die gleiche Anzahl an Tieren mit dem Unterschied, dass ein System „nebenbei“ Strom erzeugt, produziert. Im Referenzsystem wird kein Strom erzeugt. Daher können durch eine Subtraktion der Aufwendungen bzw. Emissionen des Referenzsystems vom untersuchten System, nach Division durch die erzeugte Strommenge, die spezifischen Aufwendungen bzw. Emissionen je bereitgestellter MWh Strom ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Dem Betrieb mit 100% NaWaRo steht kein Referenzsystem gegenüber, daher werden die Aufwendungen bzw. Emissionen nur mit der erzeugten Strommenge in Bezug gebracht.

### 4.2.1 Kumulierter Primärenergieaufwand

Die Unterschiede zum Referenzsystem sind in Bezug auf den Primärenergieaufwand hauptsächlich durch die Biogasanlage (vor allem durch deren Betrieb) bestimmt. Größere Biogaserträge verursachen, primärenergetisch betrachtet, geringere Aufwendungen (siehe 1. und 2. Säule im Vergleich zur 3., 6. und 7. Säule von links). Resultiert der größere Biogasertrag aus einem pflanzenbautechnisch größeren Aufwand (2-Kultursystem, mittlere Säule), so nehmen die Gesamtaufwendungen zu und der Wert von Roggen- bzw. Grassilage (4. und 8. Säule von links), welche geringere Biogaserträge aufweisen, wird annähernd erreicht. Der Aufwand an Primärenergie bei dem 100% NaWaRo Betrieb ist, spezifisch betrachtet, vergleichsweise hoch. Dies liegt insbesondere darin begründet, dass kein geeigneter Referenzbetrieb gegenübergestellt werden kann und die Aufwendungen für den Pflanzenbau in voller Höhe der Stromerzeugung angerechnet werden. Dem Pflanzenbau wird daher in Kap. 4.4 bei der Betrachtung der Sensitivitäten eine extensiv bewirtschaftete Brache gegenübergestellt.

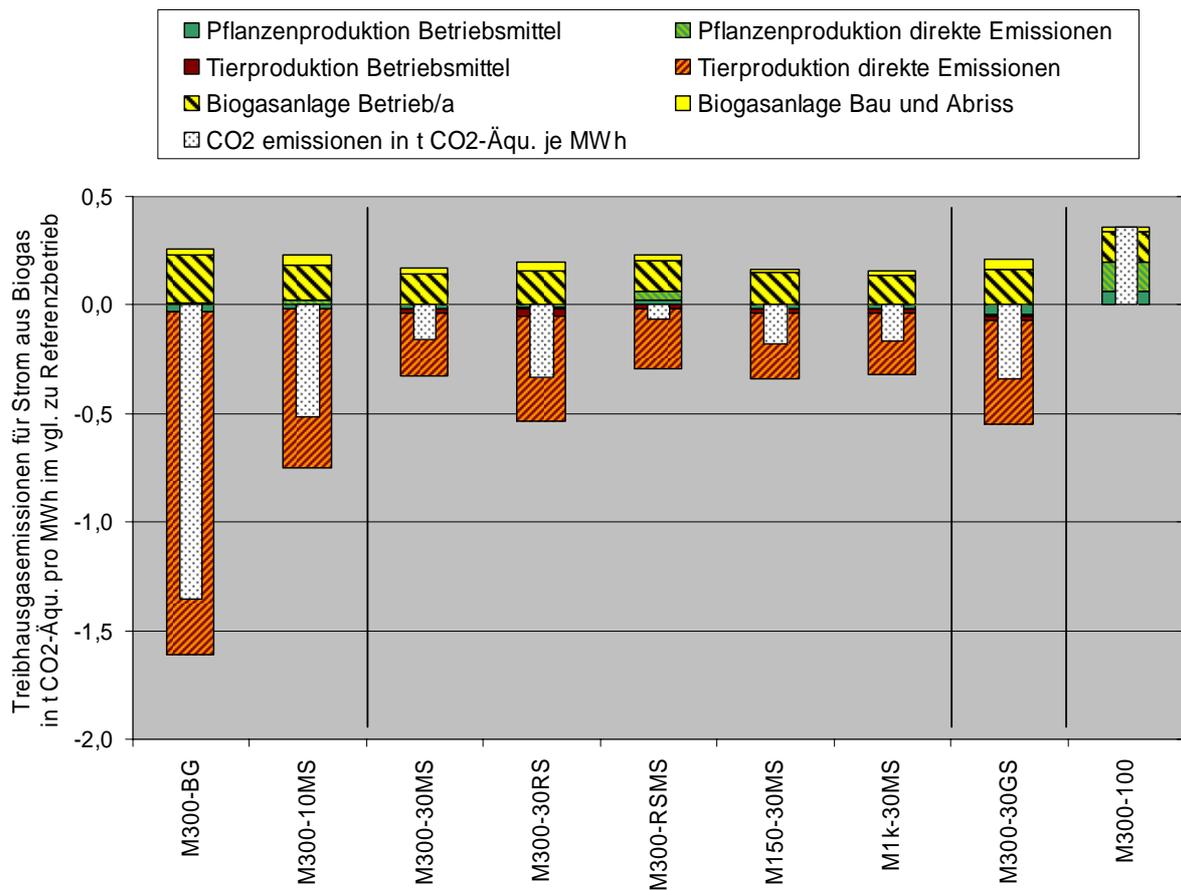


**Abbildung 8:** Primärenergieaufwand für Strom aus Biogas in GJ je MWh erzeugten Stroms, für den Aufwand des Milchviehbetriebes im Vergleich zum jeweils relevanten Referenzbetrieb

#### 4.2.2 Anthropogener Treibhauseffekt

Die besondere Abhängigkeit der Treibhausgasemissionen von den direkten Emissionen aus der Tierhaltung wurde in 4.1.2 bereits dargelegt. Da bei der Grundvariante mit Biogaserzeugung (linke Säule) die direkten Emissionen der Tierhaltung im gleichen Maß reduziert werden, wie bei den anderen Viehbetrieben, ist die Einsparung an Treibhausgasemissionen spezifisch betrachtet (je erzeugter MWh) hier am größten, da die geringste Menge an Strom erzeugt, also durch den kleinsten Divisor geteilt wird. Das 2-Kultursystem (mittlere Säule) schneidet unter den Viehbetrieben je erzeugter MWh am

schlechtesten ab. Das liegt an den vergleichsweise hohen pflanzenbaulichen Aufwendungen, welche zusammengenommen mit den Aufwendungen für die Biogasanlage die Einsparung an direkten Emissionen aus der Tierhaltung nahezu aufwiegen. Da dem 100% NaWaRo System (rechte Säule) kein Referenzbetrieb gegenübergestellt ist und keine vermiedenen direkten Emissionen aus der Tierhaltung angerechnet werden können, weist dieser Betrieb die höchsten Treibhausgasemissionen je erzeugter MWh auf.

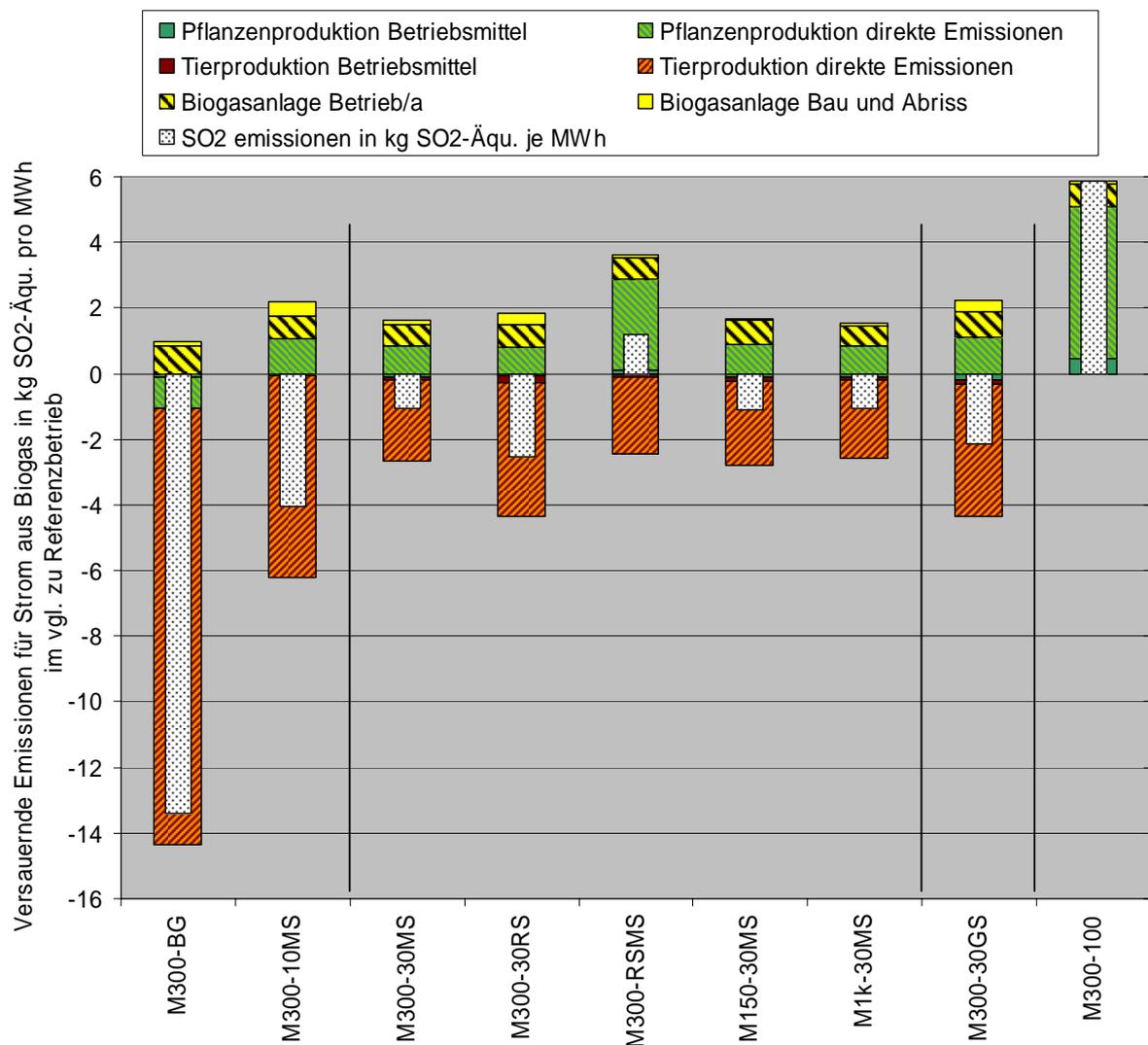


**Abbildung 9:** Treibhausgasemissionen für Strom aus Biogas in t je MWh erzeugten Stroms, für die Emissionen des Milchviehbetriebes im Vergleich zum jeweils relevanten Referenzbetrieb

#### 4.2.3 Emissionen mit versauernder Wirkung

In Bezug auf die erzeugten Strommengen stellt sich das Ergebnis für versauernd wirkende Emissionen ähnlich dar wie das der Treibhausgasemissionen. Die im Vergleich zu den jeweils relevanten Referenzbetrieben eingesparten direkten Emissionen aus der Tierhaltung haben den größten Einfluss auf das Gesamtergebnis. Die direkten Emissionen aus der Pflanzen-

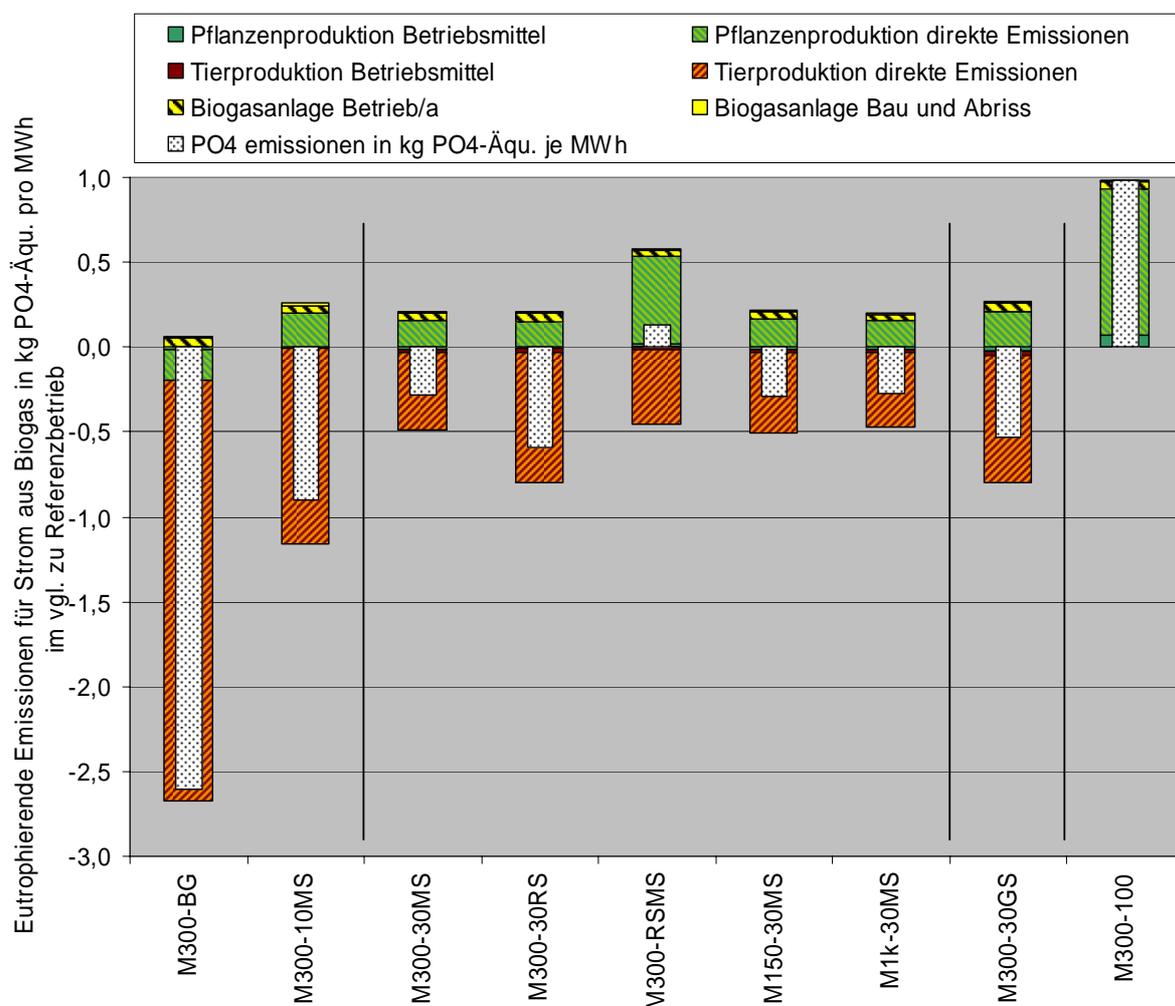
produktion zeigen hier im Vergleich zu den Auswirkungen bei den Treibhausgasemissionen jedoch sichtbare Effekte. Besonders deutlich wird dieser Einfluss beim 2-Kultursystem (mittlere Säule), wo die Auswirkungen der direkten Emissionen der Pflanzenproduktion die der Tierproduktion übersteigen und damit die Summe an  $\text{SO}_2$ -Äquivalenten, als einziger Viehbetrieb, positiv wird. Ansonsten ist der spezifische Wert, wie bei den Treibhausgasemissionen stark durch die erzeugte Strommenge bestimmt. Je mehr Strom produziert wird, desto geringer fallen die Auswirkungen einzelner Kategorien auf das Gesamtergebnis aus. Das Resultat des 100% NaWaRo Betriebs wird im Wesentlichen von den direkten Emissionen aus der Pflanzenproduktion bestimmt.



**Abbildung 10:** Emissionen mit versauernder Wirkung für Strom aus Biogas in kg je MWh erzeugten Stroms, für die Emissionen des landwirtschaftlichen Milchviehbetriebes im Vergleich zum jeweils relevanten Referenzbetrieb

#### 4.2.4 Emissionen mit eutrophierender Wirkung

Das Ergebnis der Analyse der versauernden Wirkungen wiederholt sich nahezu identisch bei den eutrophierend wirkenden Emissionen. Größten Einfluss auf das Ergebnis haben die direkten Emissionen aus der Tierhaltung. Der Einfluss der direkten Emissionen aus dem Pflanzenbau ist wiederum größer als bei den Treibhausgasemissionen, auffällig ist der besonders geringe Anteil, der durch den Bau und den Betrieb der Biogasanlage bestimmt ist. Durch die spezifische Betrachtungsweise scheint der Betrieb mit der geringsten Stromerzeugung (linke Säule) wiederum das beste Resultat aufzuweisen. Diese negativen Endergebnisse sind schwierig zu interpretieren und werden beim späteren Vergleich mit anderen Stromerzeugungsoptionen (Kap. 4.5) nicht einzeln, explizit dargestellt sondern als Bandbreite wiedergegeben.



**Abbildung 11:** Emissionen mit eutrophierender Wirkung für Strom aus Biogas in kg je MWh erzeugten Stroms, für die Emissionen des landwirtschaftlichen Milchviehbetriebes im Vergleich zum jeweils relevanten Referenzbetrieb



### **4.3 Analyse auf Betriebsebene – Schweinemastbetriebe**

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyse für Schweinemastbetriebe dargestellt. Hierbei wird ausschließlich auf Besonderheiten im Vergleich zu den Ergebnissen der Milchbetriebe eingegangen, um eine Wiederholung ähnlicher Ergebnisse und Erläuterungen zu vermeiden.

#### **4.3.1 Kumulierter Primärenergieaufwand**

Der primärenergetische Aufwand wird bei Schweinemastbetrieben anteilig stärker durch die Tierproduktion bestimmt als bei Milchbetrieben, vgl. mit Abbildung 4. Darüber hinaus wird mit der anfallenden Gülle und den eingesetzten Co-Substraten im Vergleich geringfügig weniger Strom erzeugt. Dadurch fällt die Stromgutschrift etwas geringer aus. Im Vergleich einzelner Betriebsmittel der Pflanzenproduktion kann kein relevanter Unterschied zu den Milchbetrieben festgestellt werden. Durch die oben genannten Effekte ist die Auswirkung der Reduzierung des Viehbesatzes in den Betrieben erheblich größer. Dies ist für alle betrachteten ökologischen Effekte der Fall.

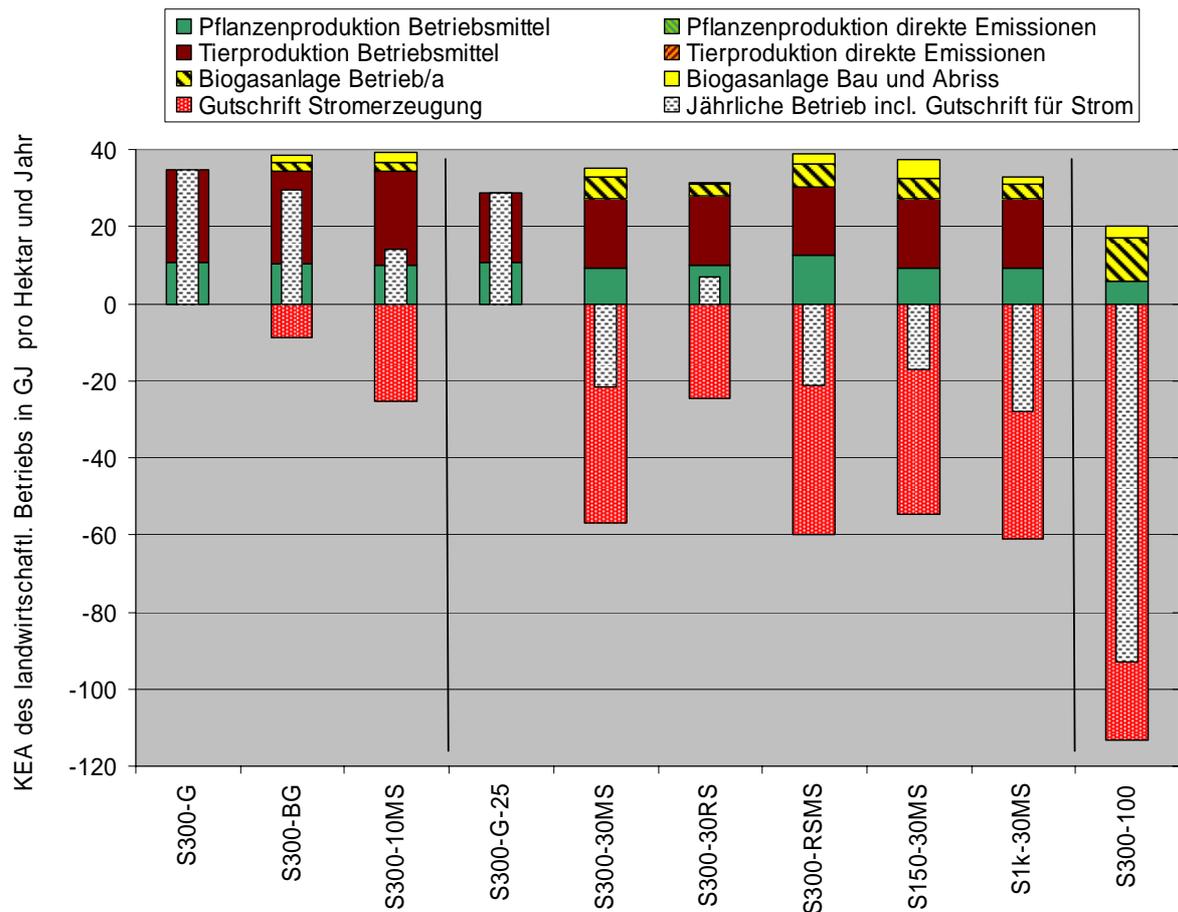


Abbildung 12: Primärenergieaufwand der Schweinemastbetriebe in GJ je ha und Jahr

### 4.3.2 Anthropogener Treibhauseffekt

In Bezug auf Treibhausgasemissionen fällt auch bei den Schweinemastbetrieben eine große Abhängigkeit von der Tierproduktion auf. Hier sind es aber weniger die direkten Emissionen aus der Tierproduktion, sondern vielmehr der Verbrauch von Betriebsmitteln, welcher einen besonders starken Einfluss auf das Ergebnis hat (vgl. mit Abbildung 5). Durch den Biogasprozess werden die direkten Emissionen der Tierproduktion nahezu beseitigt. Diese Verringerung kompensiert den zusätzlich Aufwand der Biogasanlage. Durch die zusätzliche Gutschrift der Stromerzeugung wird das Ergebnis jedoch verbessert. Im Vergleich der Rohstoffe untereinander können keine weiteren Erkenntnisse abgeleitet werden, welche einen Unterschied zu den Milchproduktionsbetrieben darstellen.

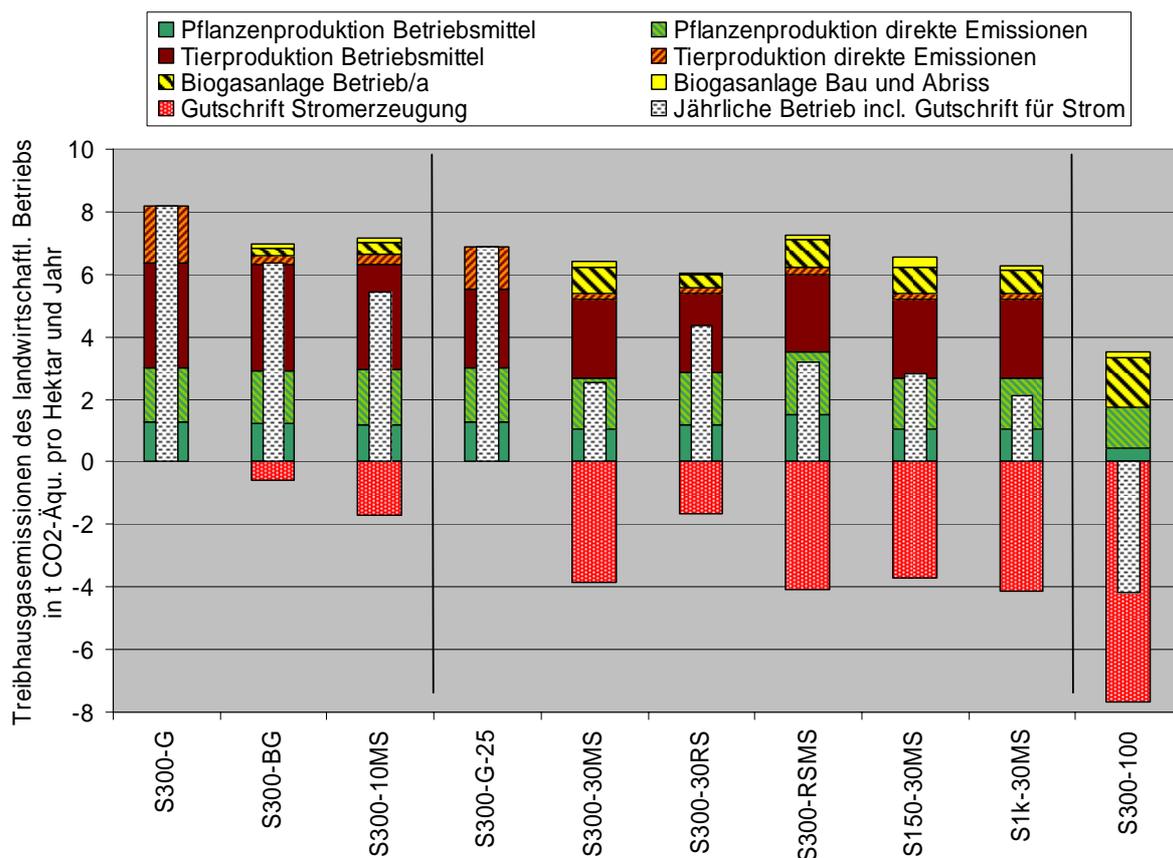


Abbildung 13: Treibhausgasemissionen der Schweinemastbetriebe in t CO<sub>2</sub>-Äquivalente je ha und Jahr

### 4.3.3 Emissionen mit versauernder Wirkung

Für versauernd wirkende Emissionen gelten die gleichen Aussagen wie in Kap. 4.3.1 und 4.3.2. Der Einfluss der Betriebsmittel der Tierproduktion auf das Gesamtergebnis ist etwas größer. Andere relevante Unterschiede sind nicht festzustellen. Wie bei den Milchbetrieben (vgl. mit Abbildung 6) wird der zusätzliche Aufwand für die Biogasanlage durch die Stromgutschrift gerade eben kompensiert. Eine Verbesserung des Gesamtergebnisses wird hier ebenso wie bei den Milchbetrieben durch eine Verringerung (Halbierung) der direkten Emissionen aus der Tierhaltung erreicht.

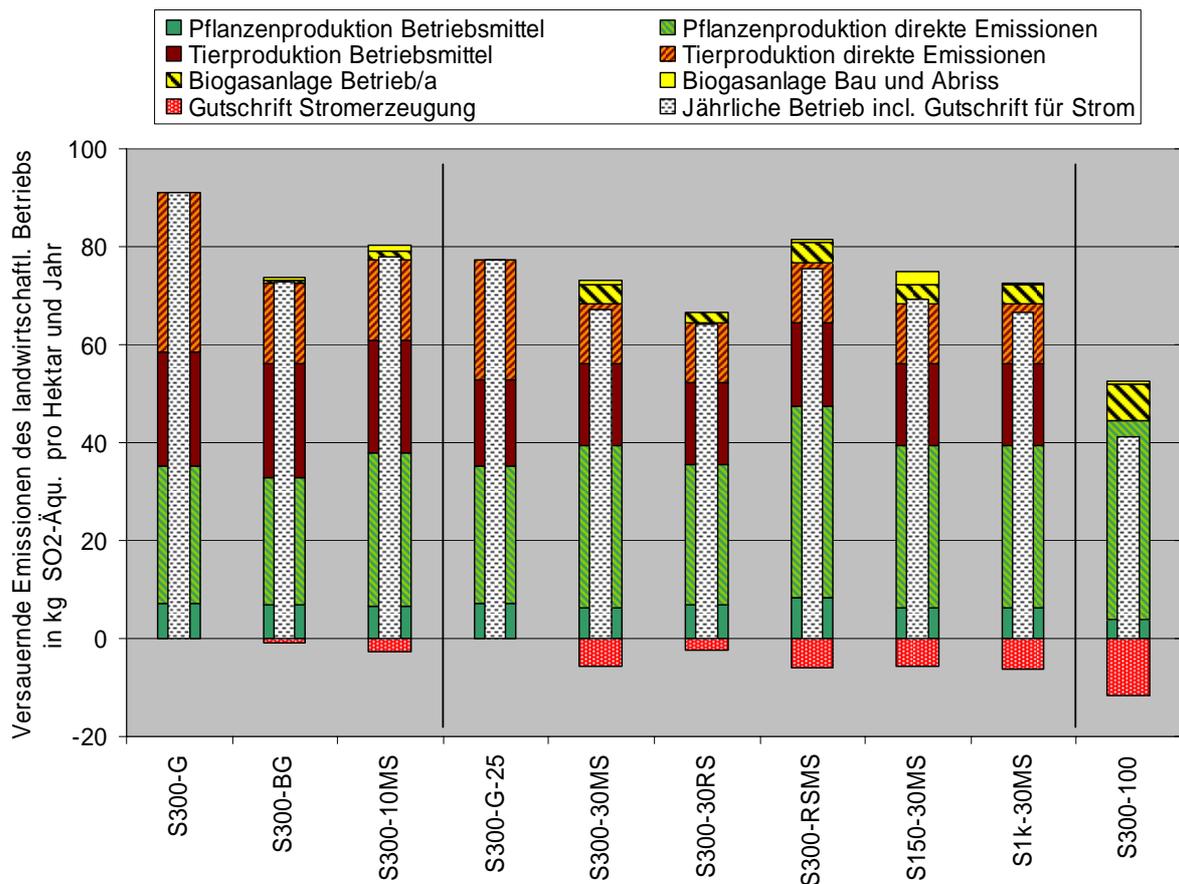
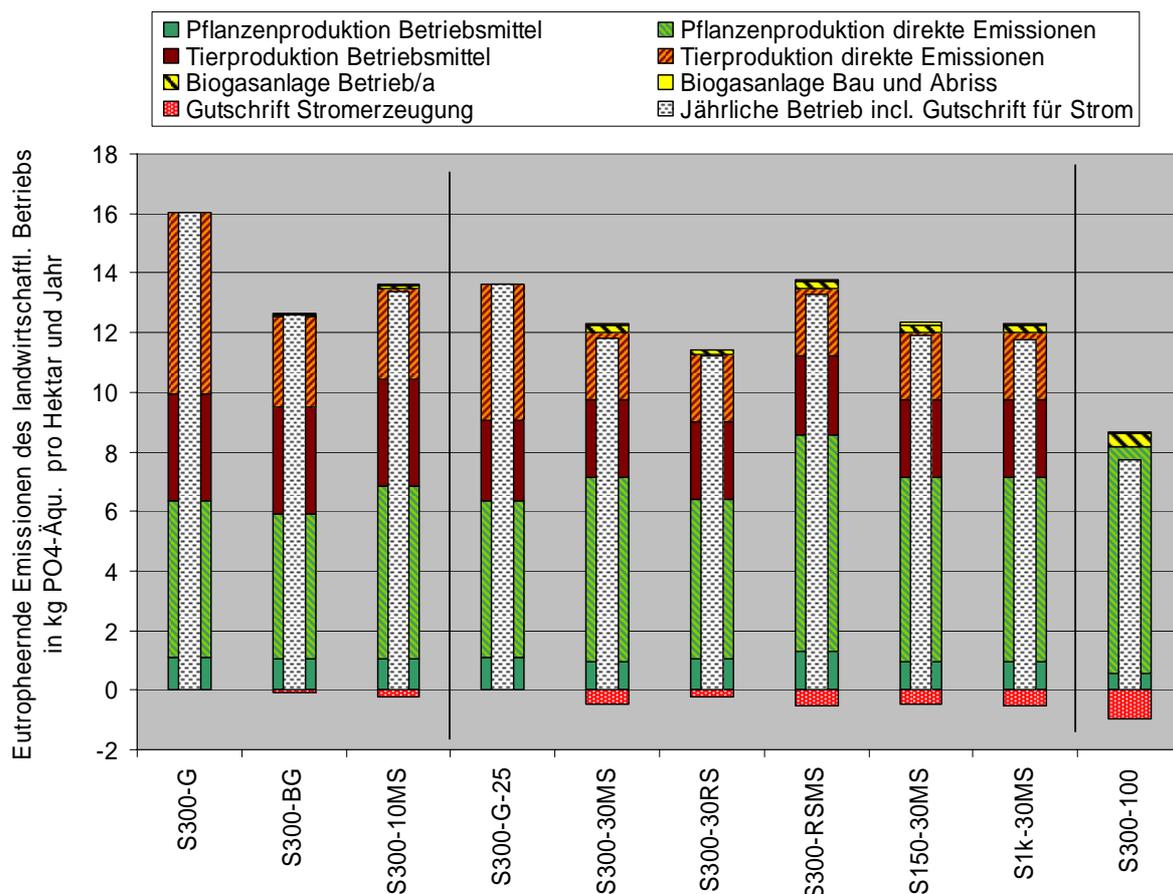


Abbildung 14: Versauernd wirkende Emissionen der Schweinemastbetriebe in kg SO<sub>2</sub>-Äquivalente je ha und Jahr

#### 4.3.4 Emissionen mit eutrophierender Wirkung

Dieses Ergebnis und die dazu verknüpften Aussagen wiederholen sich in Bezug auf eutrophierend wirkende Emissionen nahezu identisch im Vergleich zur Milchproduktion (vgl. mit Abbildung 7).



**Abbildung 15:** Eutrophierend wirkende Emissionen der Schweinemastbetriebe in kg PO<sub>4</sub>-Äquivalente je ha und Jahr

Aufgrund der Tatsache, dass keine relevanten Unterschiede in den diskutierten Ursachen und zugehörigen Tendenzen zwischen Milch- und Schweinemastbetrieben in Bezug auf die Fragestellung festgestellt werden konnten, wird im Weiteren auf die Darstellung der Schweinemastbetriebe auf Stromerzeugungsebene verzichtet und direkt zu den Sensitivitätsanalysen übergegangen. Auch bei den Sensitivitätsanalysen werden aufgrund ähnlicher Aussagekraft und erhöhter Praxisrelevanz Milchbetriebe als exemplarisches Untersuchungsobjekt verwendet.

#### 4.4 Sensitivitäten

Für die Sensitivitätsanalyse wurden zwei Betriebe ausgewählt (M300-10MS und M300-100 NaWaRo), da der Einfluss auf alle anderen Betriebe sowohl der Milchproduktion als auch der Schweineproduktion vergleichbar ist und diese Betriebe eine hohe Praxisrelevanz aufweisen.



Als untersuchte Parameter werden im Folgenden der Einfluss einer zusätzlichen Wärmeauskopplung, der Einsatz eines Zündstrahl-Motors im BHKW anstatt eines Gas-Otto-Motors und abschließend der Einfluss von Restgasemissionen aus einem nicht gasdicht abgedeckten Gärrestelager auf das Gesamtergebnis dargestellt. Im Einzelnen werden die folgenden Veränderungen vorgenommen:

- Der Einfluss einer zusätzlichen Wärmeauskopplung wird mittels vier unterschiedlicher Anteile (10, 20, 50 und 100%) an der maximal möglichen Wärmeauskopplung des BHKW's, ohne den Biogasprozess zu beeinträchtigen, untersucht. Die zusätzlich ausgekoppelte Wärme wird in Form einer Wärmegutschrift in der Lebenszyklusanalyse berücksichtigt.
- Anstatt eines Gas-Otto-Motors wird ein Zündstrahlmotor mit dem dafür notwendigen Zündöl betrachtet. Als Zündöl wird einerseits herkömmlicher Diesel, andererseits Rapsöl eingesetzt. Die zusätzlich auftretenden Belastungen durch Zündöl und dessen Verbrennung, sind der Kategorie „Biogasanlage Betrieb“ zugeordnet. Darüber hinaus ist zu beachten, dass durch das zusätzliche Zündöl einerseits mit der gleichen Menge Biogas mehr Strom erzeugt werden kann. Andererseits kommen aus der Verbrennung des Zündöls und aus dessen Vorkette (Produktion) aber auch zusätzliche Aufwendungen bzw. Emissionen (z. B. fossiles CO<sub>2</sub> bei Diesel) zum Tragen.
- Es wird der Einfluss von Restgasemissionen untersucht, welche aus einem nicht gasdicht abgekapselten Gärrestelagers entweichen. Die Emissionen an dieser Stelle betragen – als möglicher Maximalwert bei einer nicht optimal funktionierenden oder schlecht ausgelegten Anlage - 10% des insgesamt erzeugten Biogases. Diese zusätzlich auftretenden Emissionen werden in Form einer neuen Kategorie „direkte Emissionen Gärreste“ in der Lebenszyklusanalyse berücksichtigt.

Darüber hinaus werden dem 100% NaWaRo Betrieb die Aufwendungen bzw. Emissionen, welche aus einer extensiv bewirtschafteten Brachfläche herrühren, gutgeschrieben und zur Einordnung der Größenverhältnisse dargestellt.

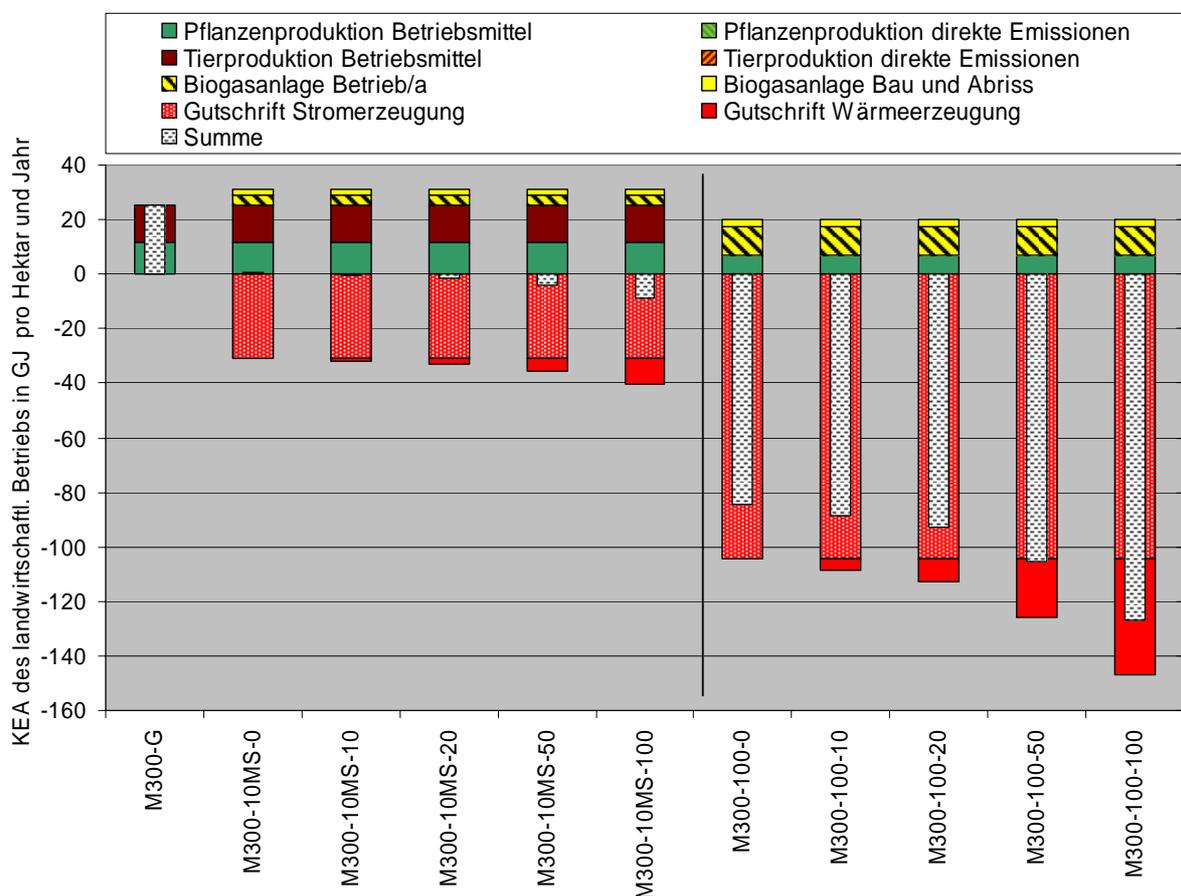
#### **4.4.1 Analyse auf Betriebsebene**

Die Auswertung erfolgt wieder in zwei Schritten, auf Betriebsebene und anschließend in Bezug zur erzeugten Menge an Elektrizität. Die Analyse erfolgt ausschließlich anhand von Milchviehbetrieben, da die grundsätzliche Wirkung sowohl bei Milchviehbetrieben als auch

bei Schweinemastbetrieben weitestgehend deckungsgleich und daher eine Übertragbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist.

#### 4.4.1.1 Kumulierter Primärenergieaufwand

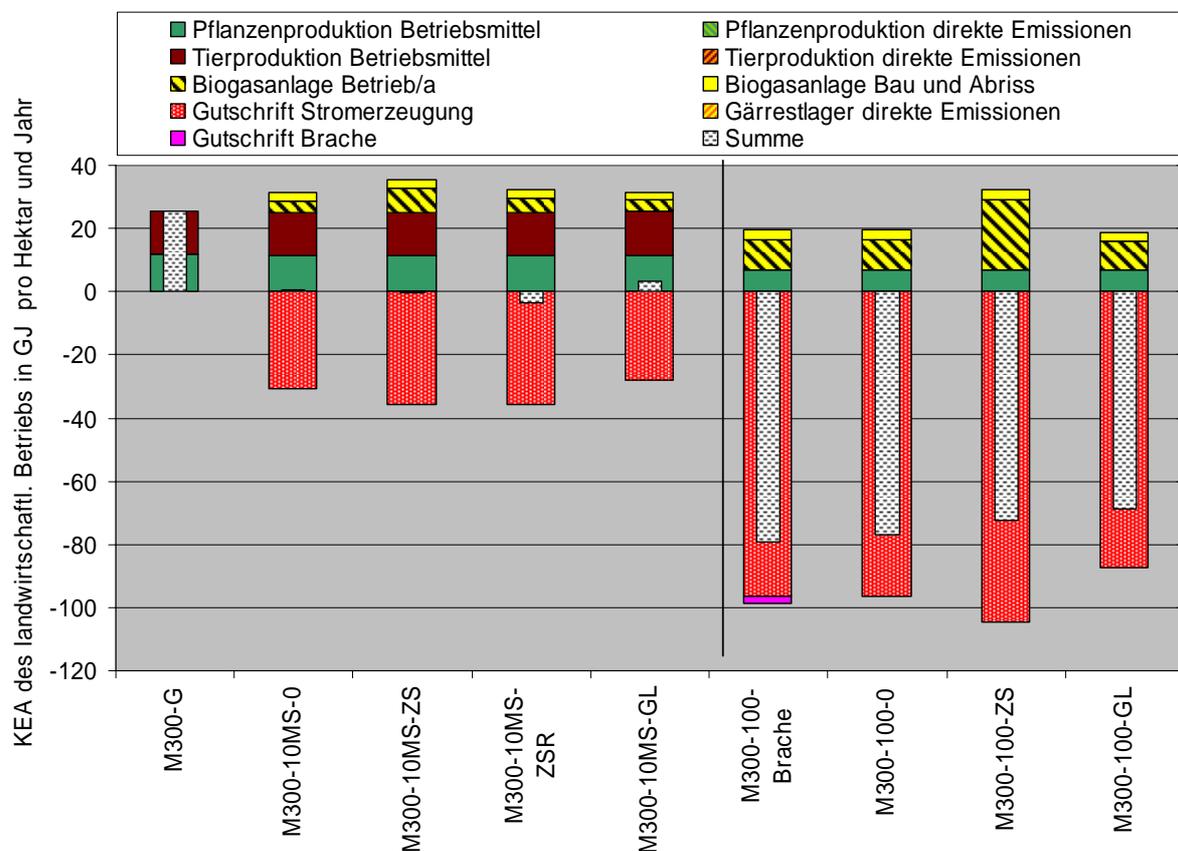
In Abbildung 16 ist der Einfluss der Wärmeauskopplung, welche zwischen 10 und 100% der maximal möglichen Auskopplung variiert wurde, dargestellt. Die Auskopplung von Wärme verbessert die Bilanz des kumulierten Primärenergieaufwands merklich. Die Höhe der Gutschrift erreicht bei Auskopplung von der maximal möglichen Wärmemenge ca.  $\frac{1}{3}$  bis  $\frac{1}{4}$  der Höhe der Stromgutschrift.



**Abbildung 16:** Primärenergieaufwand des landwirtschaftlichen Betriebs in GJ je ha und Jahr bei Variation einer zusätzlichen Wärmeauskopplung; die Zahl hinter der Betriebsbezeichnung zeigt den Anteil der Wärmenutzung im Vergleich zur maximal verfügbaren Wärmemenge

Der Einfluss der in Abbildung 17 dargestellten Parameter der Sensitivitätsanalyse: Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache auf den Primärenergieaufwand ist sehr gering.

Wird ein Zündstrahlmotor mit Diesel als Zündöl anstatt eines Gas-Otto-Motors eingesetzt (3. Säule von links), so nimmt der Aufwand des Biogasanlagenbetriebs im Vergleich zur Grundvariante (2. Säule von links) zu. In annähernd gleichem Maß steigt aber auch die Stromerzeugung an, so dass in Summe fast der gleiche Betrag resultiert. Beim 100% NaWaRo Betrieb (2. Säule von rechts im vlg. zur 3. Säule von rechts), der insgesamt wesentlich mehr Strom produziert, wird deutlich, dass der zusätzliche Mehraufwand durch das Zündöl die Zunahme an Stromgutschrift überwiegt. Wird dagegen Biodiesel als Zündöl eingesetzt (4. Säule von links), verbessert sich die Primärenergiebilanz, da der Aufwand weniger stark zunimmt als die Stromproduktion.



**Abbildung 17:** Primärenergieaufwand des landwirtschaftlichen Betriebs in GJ je ha und Jahr bei Variation Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache, Nomenklatur hinter der Betriebsbezeichnung: 0-wie bisher, ZS-Zündstrahlmotor, ZSR-Zündstrahlmotor mit Rapsöl als Zündöl, GL Gärrest-lager-emissionen, Brache-Gutschrift für extensiv bewirtschaftete Brachfläche

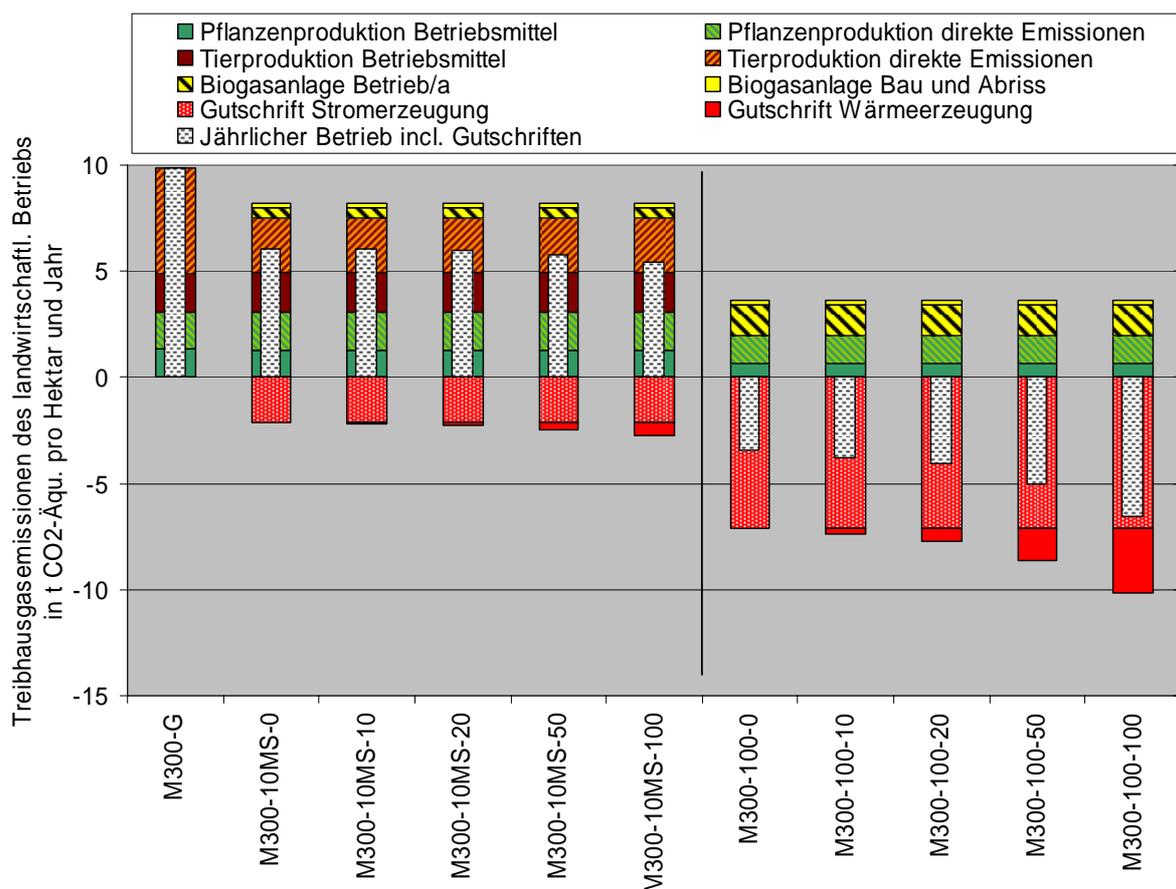
Gärrestemissionen spielen bezüglich des Primärenergieaufwandes keine Rolle, weil direkte Emissionen in dieser Kategorie nicht berücksichtigt werden. Durch die Tatsache, dass durch den Verlust von Methan weniger Strom erzeugt werden kann, verschlechtert sich die Bilanz des Primärenergieaufwandes trotzdem in geringem Maße (rechte Säule und 5. Säule von

links). Der Minderaufwand bei der Biogasanlagennerrichtung ist zu gering, als dass er bemerkbar ist.

Der Einfluss auf die Bilanz des KEA durch die Gegenüberstellung einer Brache zum 100% NaWaRo Betrieb nur sehr wenig bedeutend, sie verbessert die Bilanz um ca. 5%.

#### 4.4.1.2 Anthropogener Treibhauseffekt

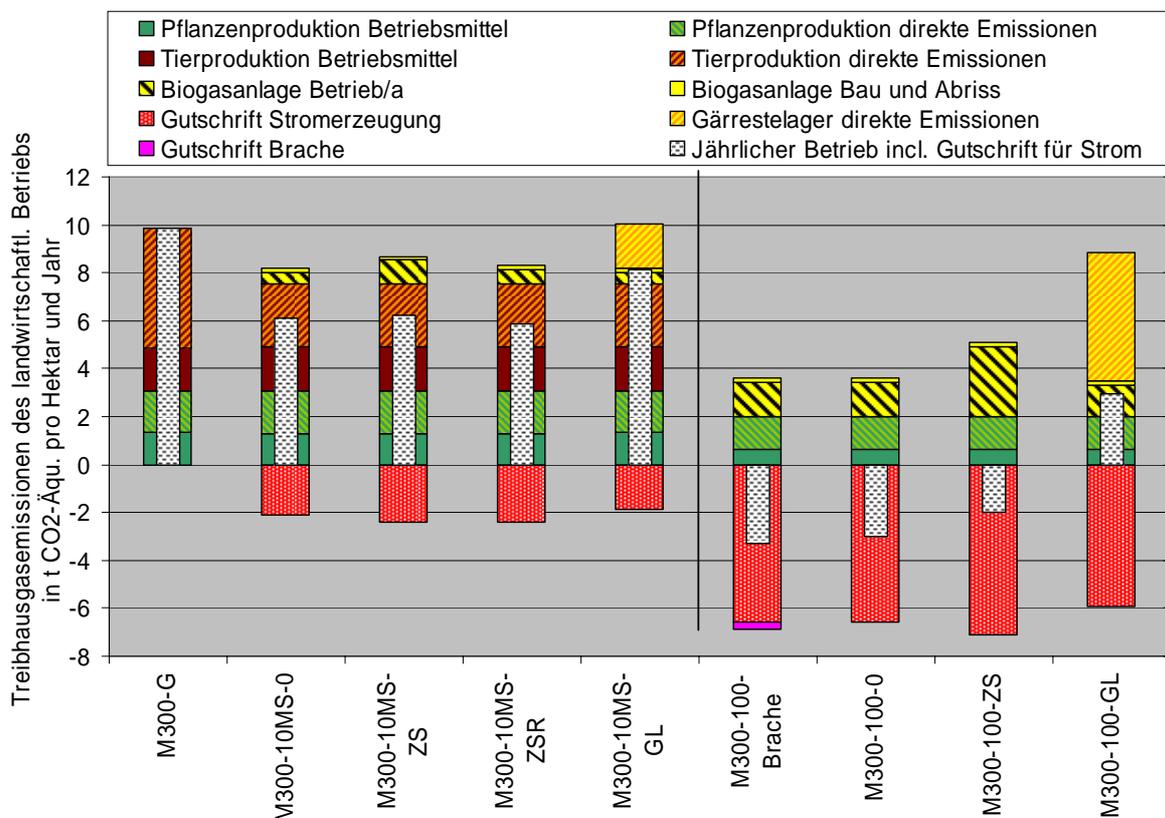
Die Auskopplung von Wärme hat auf die Bilanz der Treibhausgasemissionen einen ähnlichen Einfluss wie auf den zuvor beschriebenen kumulierten Primärenergieaufwand. Wird 100% der maximal möglichen Wärme ausgekoppelt, so erreicht die Gutschrift für die Wärmeerzeugung ca.  $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{3}$  der Stromgutschrift. Die Treibhausgasemissionen verringern sich dementsprechend. Da beim 100% NaWaRo Betrieb insgesamt mehr Strom oder Wärme bereitgestellt werden kann, ist der Einfluss auf das Gesamtergebnis entsprechend größer.



**Abbildung 18:** Treibhausgasemissionen des landwirtschaftlichen Betriebs in t CO<sub>2</sub>-Äquivalente je ha und Jahr bei Variation der zusätzlichen Wärmeauskopplung; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 16

Der Einfluss der anderen untersuchten Parameter auf die Bilanz der Treibhausgasemissionen ist zum Teil deutlicher. Während beim Einsatz eines Zündstrahlmotors nur geringe Veränderungen zu beobachten sind, im Wesentlichen ähnlich wie beim Primärenergieaufwand, haben die Emissionen aus dem Gärrestelager große Auswirkungen (5. Säule von links und rechte Säule). Da der 100% NaWaRo Betrieb auf die Versorgung einer Biogasanlage ausgerichtet ist und keine Tierproduktion oder anderweitige Produktion verfolgt, wird durch die Emission aus dem Gärrestelager das Endergebnis besonders deutlich verändert (rechte Säule im vgl. zur 3. Säule von rechts) und unterstreicht damit die große Bedeutung von gasdichten Gärrestlager-Abdeckungen.

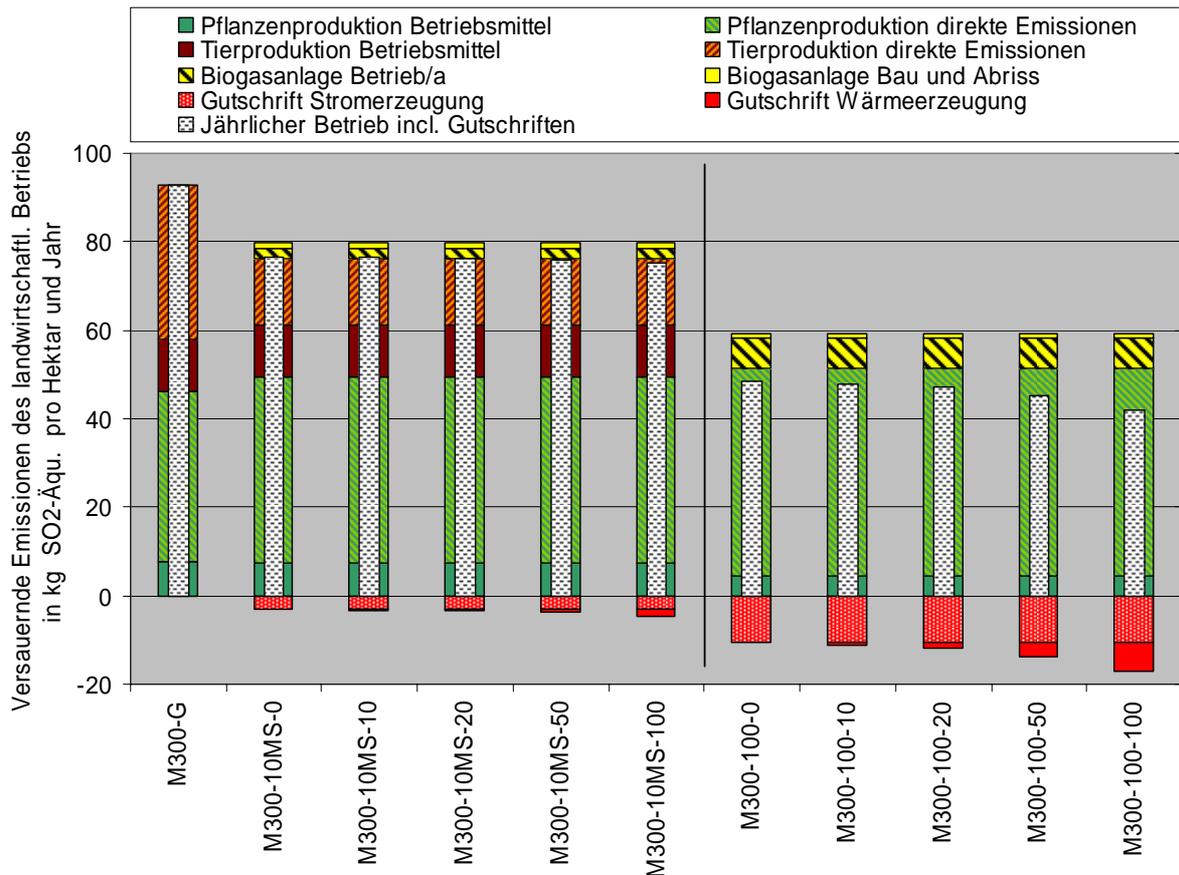
Der Einsatz eines Zündstrahlmotors mit Diesel als Zündöl verschlechtert die Klimagasbilanz geringfügig (3. Säule von links im vgl. zu 2. Säule von links, oder 2. Säule von rechts im vgl. zu 3. Säule von rechts). Wird der Diesel durch Biodiesel ersetzt (3. Säule von links), so ist eine geringfügige Verbesserung im Vergleich zur Grundvariante zu beobachten. Der Einfluss der Brache auf die Klimagasbilanz ist wiederum marginal (4. Säule von rechts im vgl. zu 3. Säule von rechts).



**Abbildung 19:** Treibhausgasemissionen des landwirtschaftlichen Betriebs in t CO<sub>2</sub>-Äquivalente je ha und Jahr bei Variation Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 17

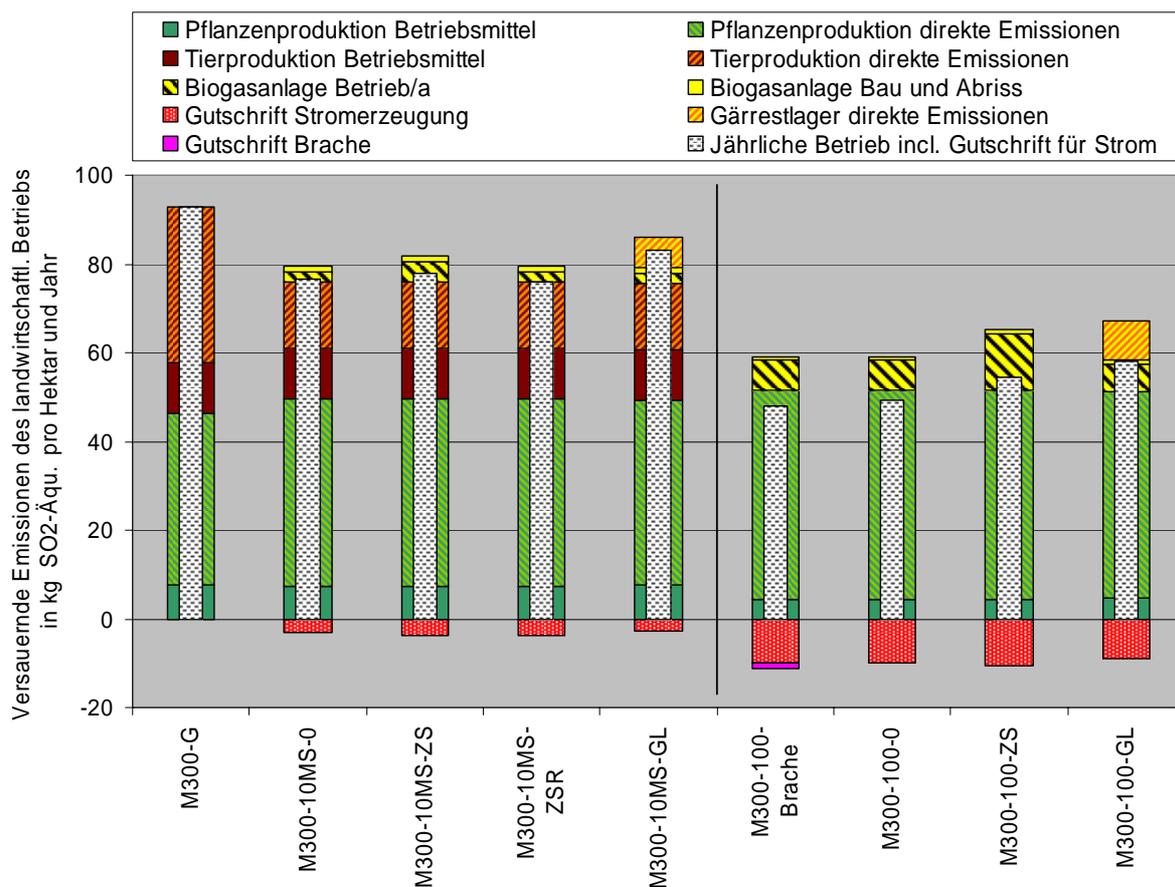
#### 4.4.1.3 Emissionen mit versauernder Wirkung

Eine zusätzliche Wärmeauskopplung beeinflusst das Ergebnis der versauernd wirkenden Emissionen nur geringfügig. Die Höhe der Wärmegutschrift erreicht bei 100% möglicher Auskopplung zwar ca. 80% der Stromgutschrift, aber da die Stromgutschrift in dieser Kategorie keinen großen Einfluss hat, ist die Auswirkung der Wärmeauskopplung dadurch nur gering.



**Abbildung 20:** Versauernd wirkende Emissionen des landwirtschaftlichen Betriebs in kg SO<sub>2</sub>-Äquivalente je ha und Jahr bei Variation der zusätzlichen Wärmeauskopplung; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 16

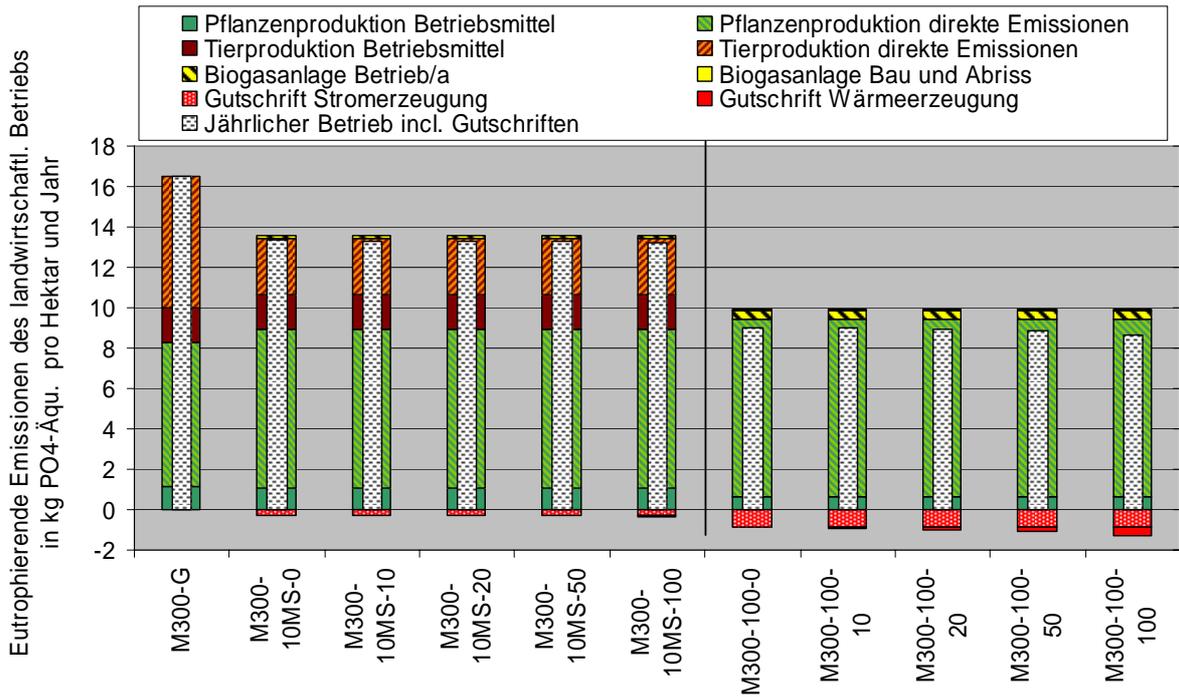
Auch bei den anderen untersuchten Parametern (Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache) sind im Gegensatz zum Einfluss auf die Klimagasemissionen hier die maximalen Auswirkungen gering. Lediglich die Emissionen aus dem Gärrestelager beeinflussen das Ergebnis in einer Größenordnung, welche 12% übersteigt (rechte Säule).



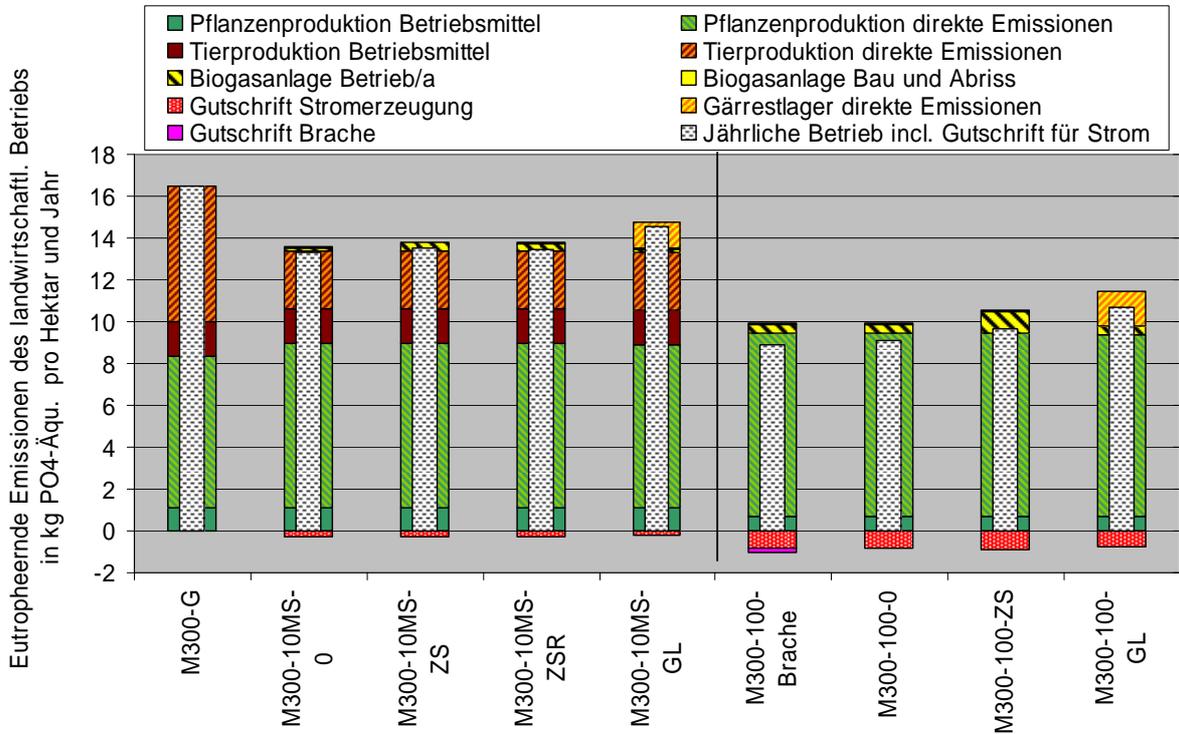
**Abbildung 21:** Versauernd wirkende Emissionen des landwirtschaftlichen Betriebs in kg SO<sub>2</sub>-Äquivalente je ha und Jahr bei Variation Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 17

#### 4.4.1.4 Emissionen mit eutrophierender Wirkung

In ähnlicher Weise stellt sich das Ergebnis in der Kategorie eutrophierend wirkender Emissionen dar. Eine zusätzliche Wärmeauskopplung beeinflusst wie ein Zündstrahlmotor das Ergebnis nur gering, die Brache hat lediglich einen marginalen Einfluss. Am meisten wirken sich Emissionen aus einem nicht gasdicht abgedeckten Gärrestlager auf das Gesamtergebnis aus (siehe Abbildung 22 und Abbildung 23). Zwischen Zündstrahlmotor mit Diesel als Zündöl und Rapsöl können in dieser Kategorie im Gegensatz zu den versauernd wirkenden Emissionen oder Klimagasemissionen keine Unterschiede festgestellt werden.



**Abbildung 22:** Eutrophierend wirkende Emissionen des landwirtschaftlichen Betriebs in kg PO<sub>4</sub>-Äquivalente je ha und Jahr bei Variation der zusätzlichen Wärmeauskopp- lung; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 16



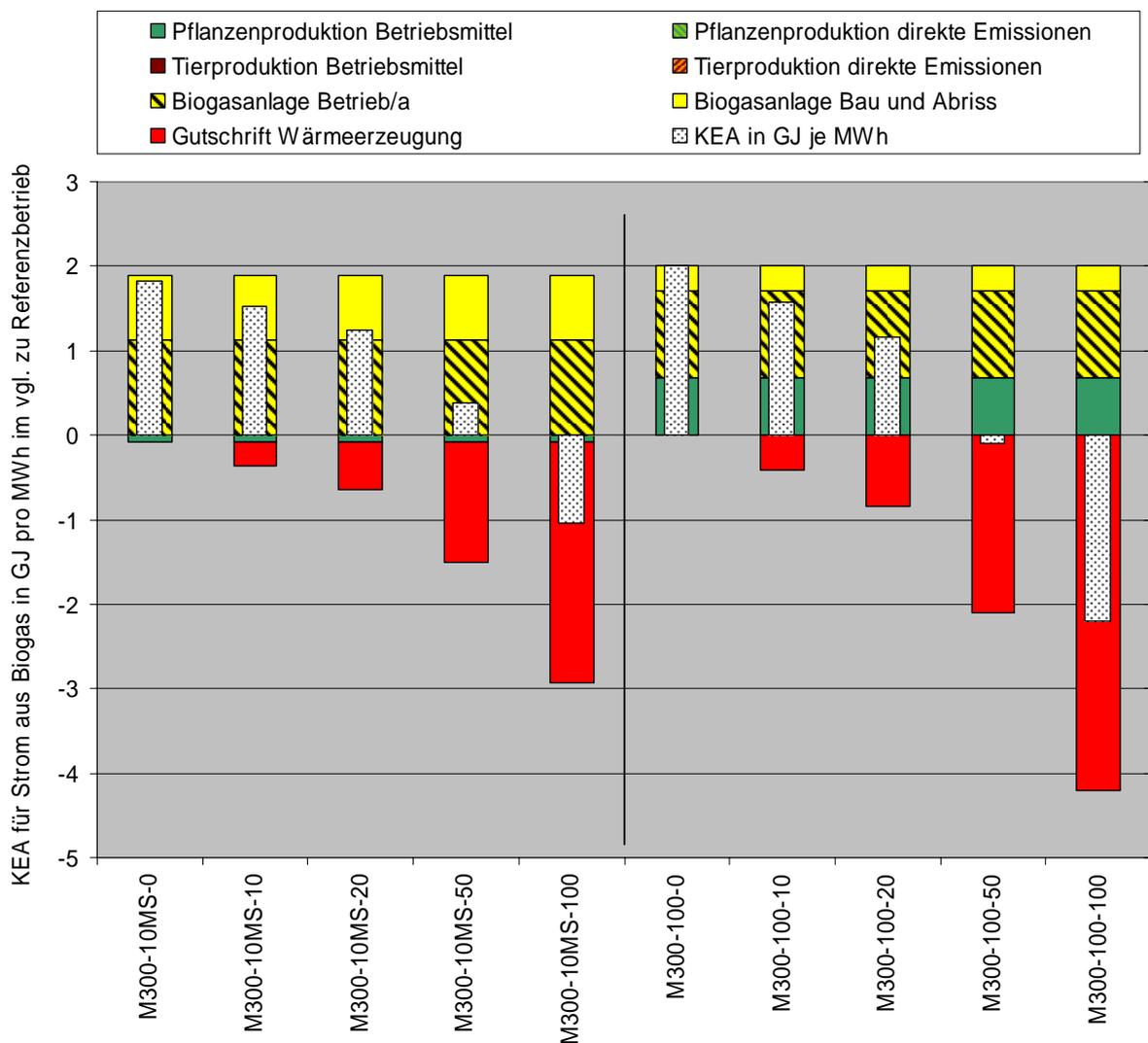
**Abbildung 23:** Eutrophierend wirkende Emissionen des landwirtschaftlichen Betriebs in kg PO<sub>4</sub>-Äquivalente je ha und Jahr bei Variation Zündstrahlmotor, Gärrest- emissionen und Brache; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 17

### 4.4.2 Analyse auf Stromerzeugungsebene

Im Folgenden wird der Einfluss der sensitiven Parameter in Bezug zur erzeugten Strommenge gebracht und die Auswirkungen auf das Ergebnis für die einzelnen Wirkungskategorien dargestellt.

#### 4.4.2.1 Kumulierter Primärenergieaufwand

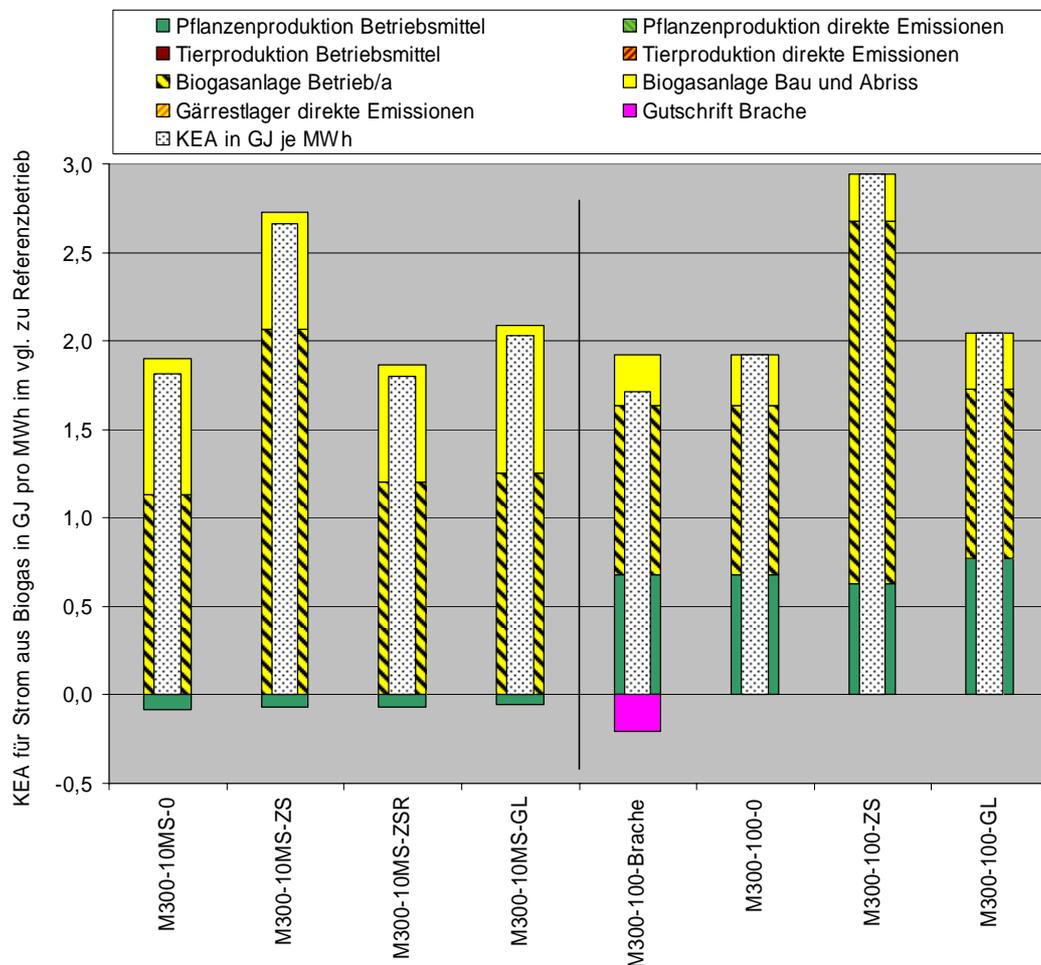
Der Einfluss einer zusätzlichen Wärmeauskopplung auf den spezifischen Primärenergieaufwand je erzeugter MWh ist groß und weist für beide untersuchten Fälle wenig Unterschiede auf (siehe Abbildung 24).



**Abbildung 24:** Primärenergieaufwand für Strom aus Biogas in GJ je MWh erzeugten Stroms, für den Aufwand des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation der zusätzlichen Wärmeauskopplung, Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 16

Durch die Wärmegutschrift wird in beiden Fällen bei maximaler Wärmeauskopplung ein negatives Endergebnis erreicht (jeweils rechte Säule), wobei anzumerken ist, dass eine 100%ige Auskopplung der Wärme in der Praxis meistens nicht erreicht werden kann.

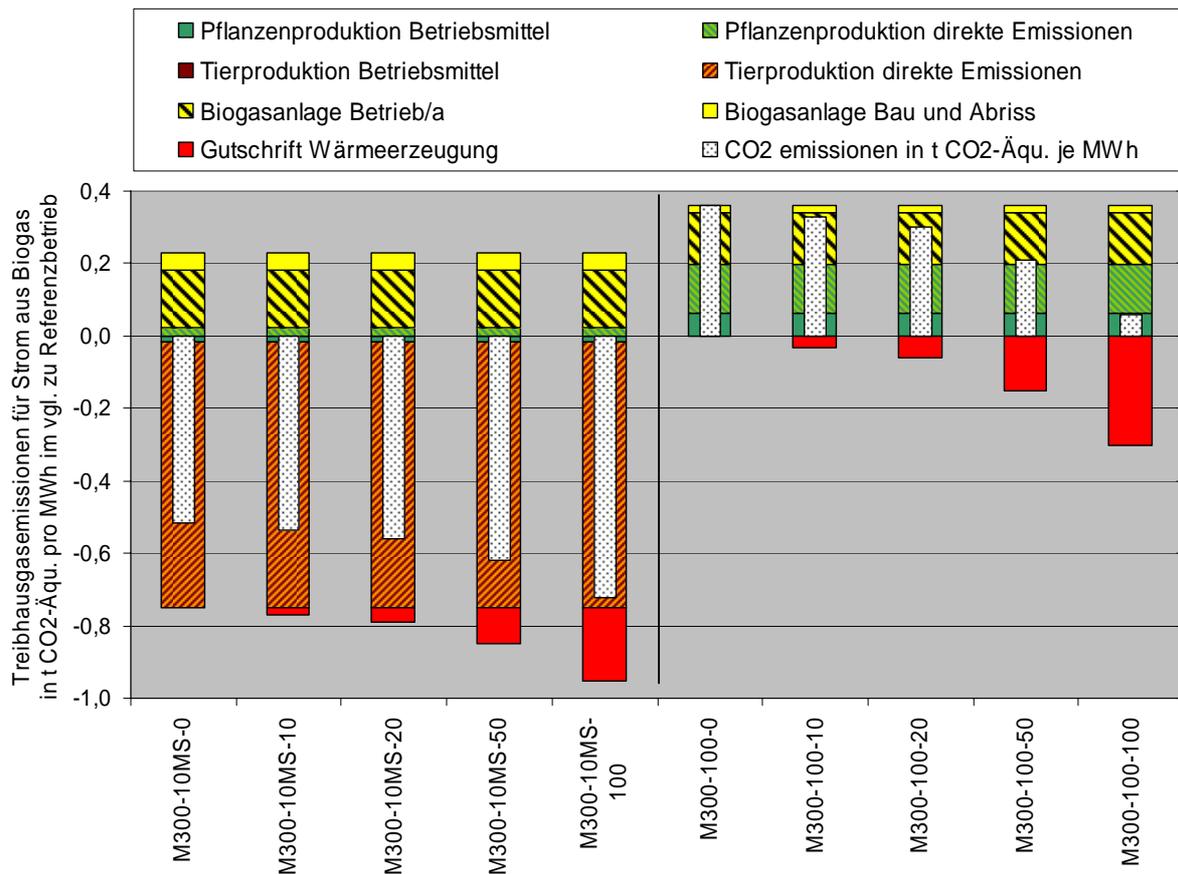
Etwas anders verhält es sich bei den weiteren untersuchten sensitiven Parametern. Während Gärrestlageremissionen und Brache nur geringen Einfluss haben, wird durch den Einsatz eines Zündstrahlmotors, wenn Diesel als Zündöl eingesetzt wird, ca.  $\frac{1}{3}$  mehr Primärenergie je erzeugter MWh verbraucht (2. Säule von links und rechts). Wird der eingesetzte Diesel durch Biodiesel, ersetzt kann diese Steigerung wieder aufgehoben werden (vgl. Abbildung 25 ZSR). Die leichte Zunahme des spezifischen Primärenergieaufwandes bei Gärrestlageremissionen wird nicht durch die direkten Emissionen (diese haben keinen Einfluss auf den Primärenergieaufwand) sondern durch die geringere produzierte Strommenge verursacht.



**Abbildung 25:** Primärenergieaufwand für Strom aus Biogas in GJ je MWh erzeugten Stroms, für den Aufwand des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 17

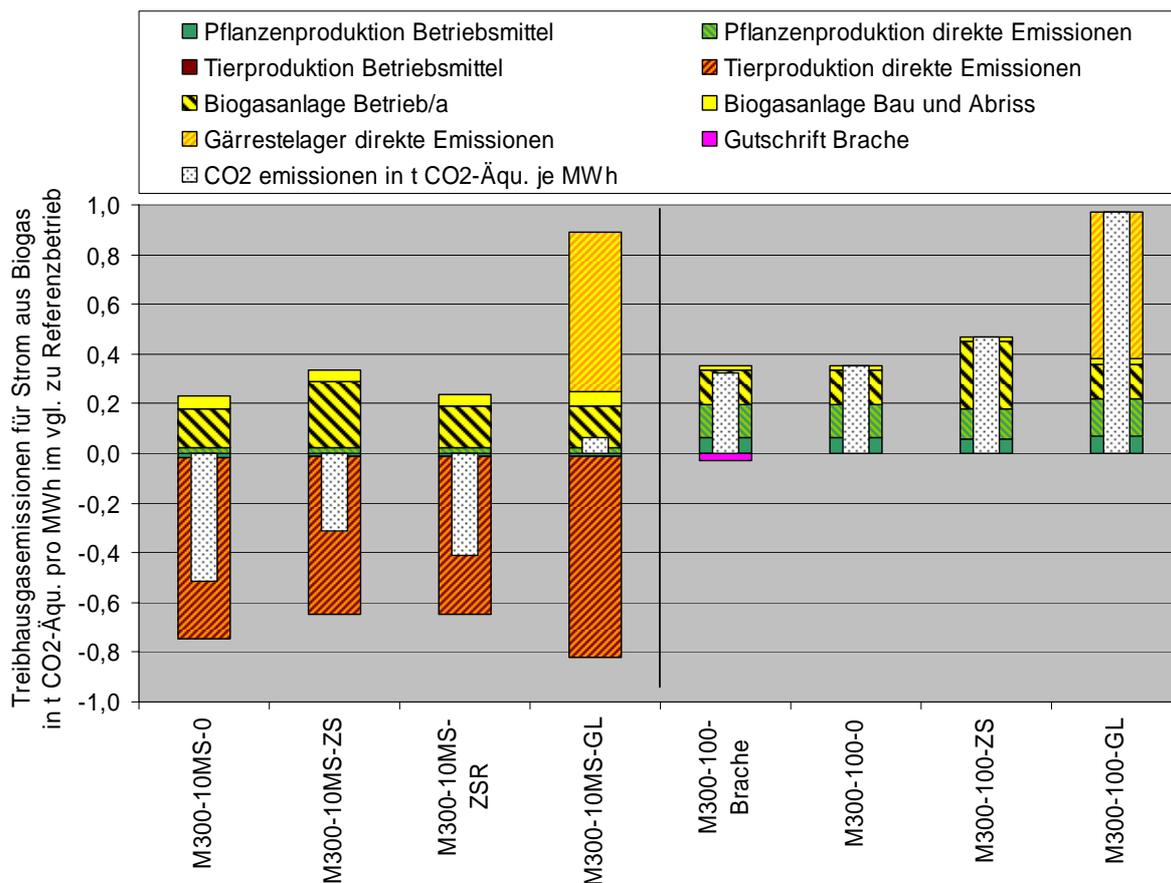
#### 4.4.3 Anthropogener Treibhauseffekt

In Bezug auf die Treibhausgasemissionen ist der Einfluss einer zusätzlichen Wärmeauskopplung je erzeugter MWh Strom zwar merklich aber geringer als beim Primärenergieaufwand. Durch die Wärmegutschrift wird bei maximaler Auskopplung das Gesamtergebnis um ein bis zwei Drittel verringert bzw. verbessert.



**Abbildung 26:** Treibhausgasemissionen für Strom aus Biogas in t je MWh erzeugten Stroms, für die Emissionen des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation der zusätzlichen Wärmeauskopplung, Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 16

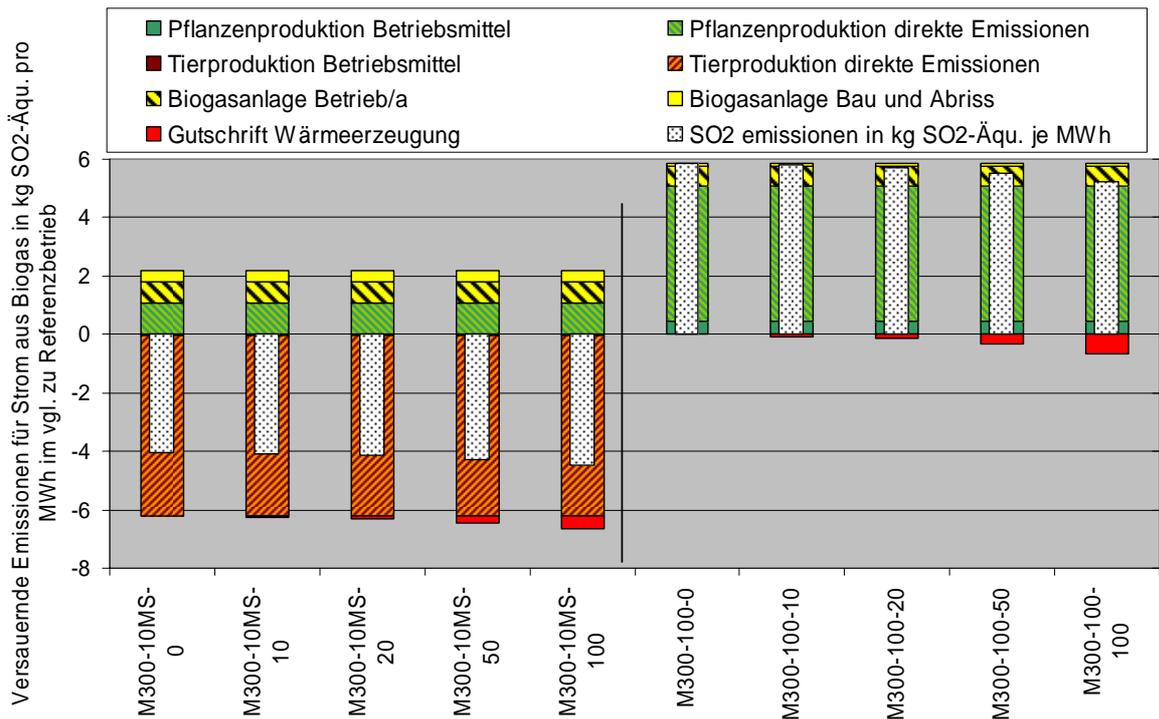
Einen größeren Einfluss auf das Ergebnis haben zum Teil die weiteren, untersuchten sensitiven Parameter. Besonders bemerkbar machen sich hier die Methanemissionen aus dem Gärrestlager (GL), welche das Ergebnis um mehr als 100% verschlechtern (siehe Abbildung 30). Die Branche hat einen marginalen Einfluss, während durch den Einsatz eines Zündstrahlmotors um ca.  $\frac{1}{3}$  vermehrte Treibhausgasemissionen auftreten. Wird der Zündstrahlmotor mit Rapsöl anstatt Diesel betrieben, wird ein Teil der Verschlechterung kompensiert, so dass am Ende eine Verschlechterung von ca. 20% resultiert (ZSR).



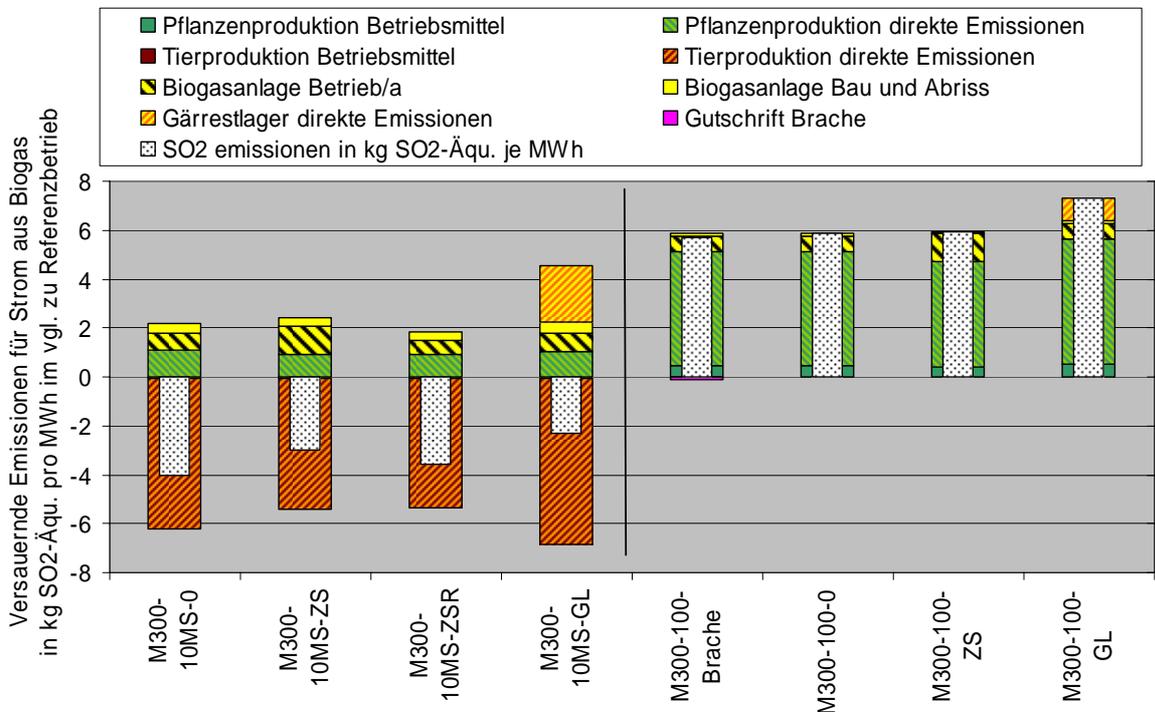
**Abbildung 27:** Treibhausgasemissionen für Strom aus Biogas in t je MWh erzeugten Stroms, für den Aufwand des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 17

#### 4.4.3.1 Emissionen mit versauernder Wirkung

Wie bereits bei der Analyse auf Betriebsebene ersichtlich war, ist der Einfluss der untersuchten, sensitiven Parameter auf die versauernd wirkenden Emissionen relativ gering. Zusätzlich ausgekoppelte Wärme verbessert das Ergebnis bei maximal möglicher Auskopplung um ca. 10%. Wird der Strom im BHKW durch einen Zündstrahlmotor erzeugt, so steigen die Emissionen im Viehbetrieb um ca.  $\frac{1}{3}$  an, wogegen sie sich beim reinen Pflanzenbetrieb nur unmerklich verändern. Dieses Ergebnis ist wiederum auf den Einfluss der negativen Teilterme zurückzuführen (in diesem Fall direkte Emissionen aus der Tierproduktion), welche durch den spezifischen Bezug je MWh das Ergebnis bei vermehrter Stromproduktion (mit Zündöl) verfälschen. Im Endeffekt ist der Einfluss des Zündstrahlmotors sehr gering, der der Brache marginal und der der Gärrestemissionen ca. 20%.



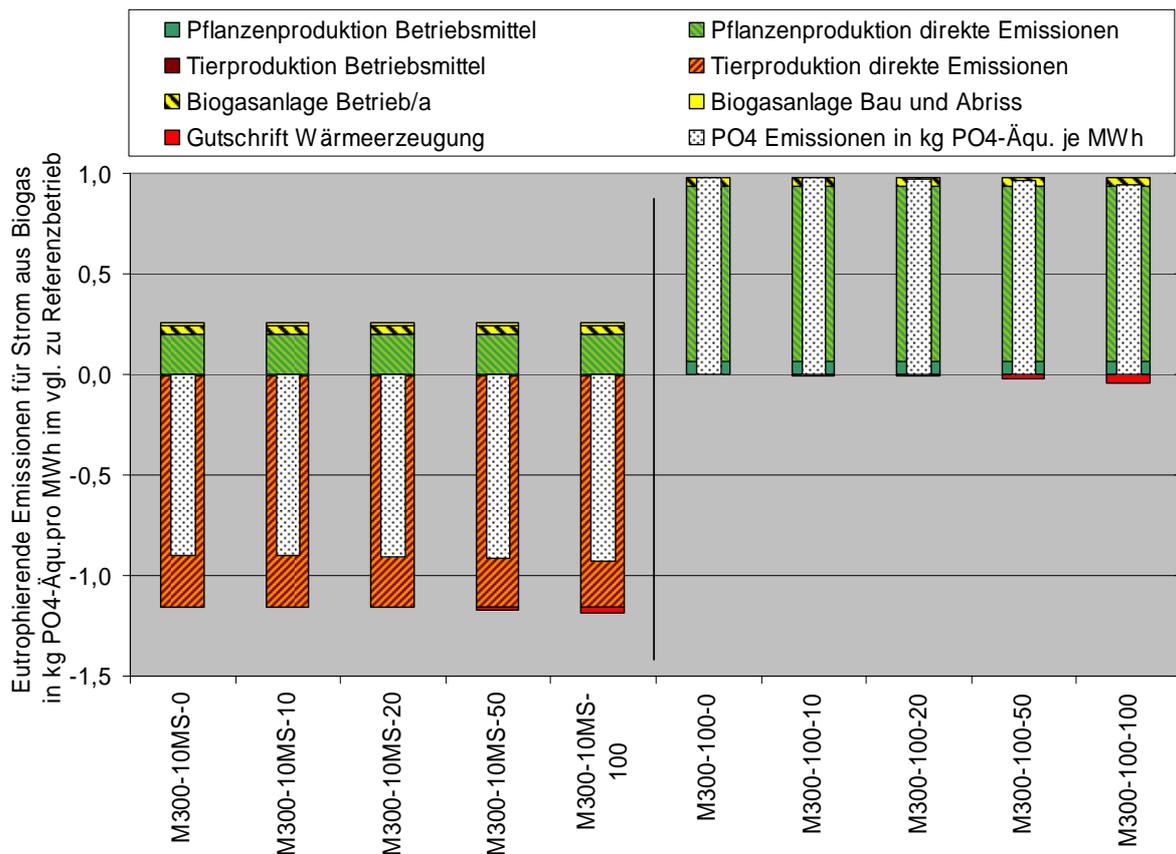
**Abbildung 28:** Emissionen mit versauernder Wirkung für Strom aus Biogas in kg je MWh erzeugten Stroms, für die Emissionen des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation der zusätzlichen Wärmeauskopplung, Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 16



**Abbildung 29:** Emissionen mit versauernder Wirkung für Strom aus Biogas in kg je MWh erzeugten Stroms, für den Aufwand des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 17

#### 4.4.3.2 Emissionen mit eutrophierender Wirkung

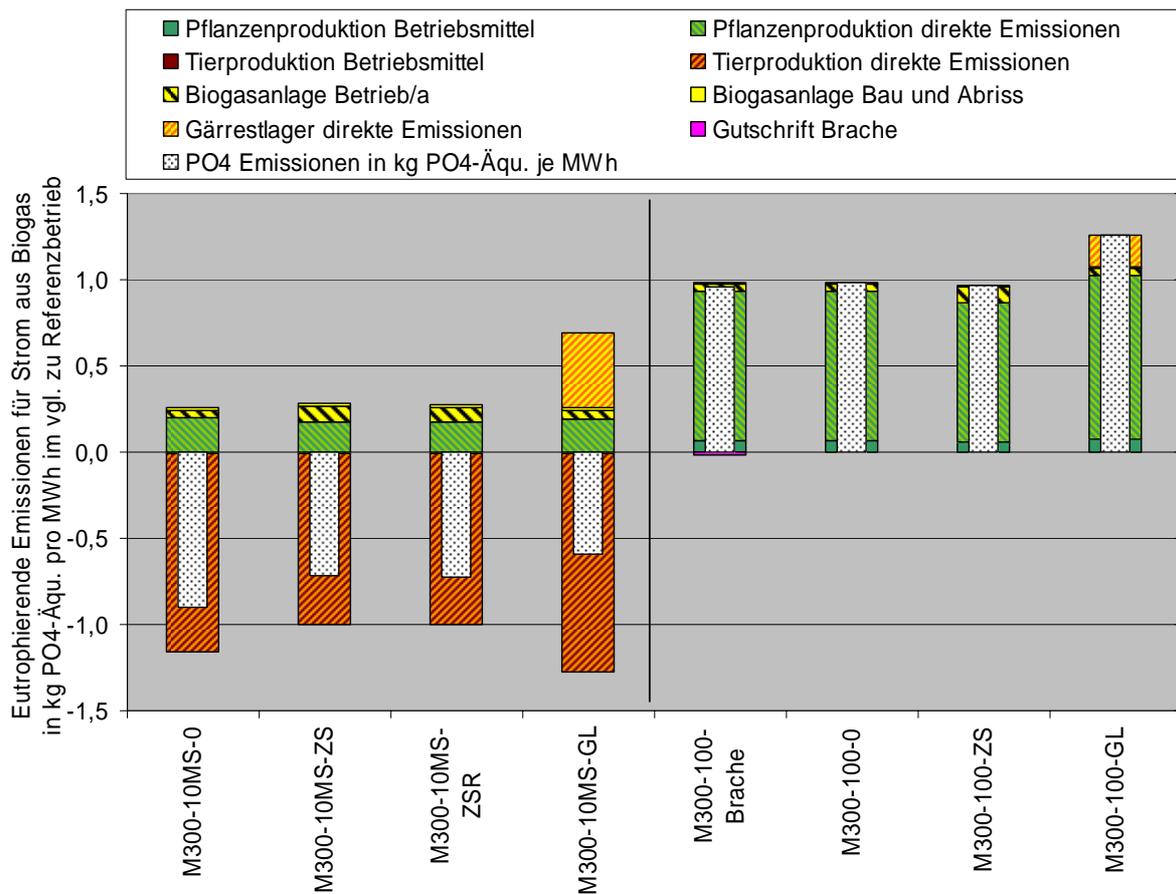
Nahezu identische Aussagen (vgl. mit versauernd wirkende Emissionen) sind bei den eutrophierend wirkenden Emissionen zu treffen, wobei abgesehen von den Gärrestlageremissionen der Einfluss auf das Endergebnis jeweils eher geringer ist. Das trifft für den Einfluss zusätzlicher Wärmeauskopplung und der Brache zu.



**Abbildung 30:** Emissionen mit eutrophierender Wirkung für Strom aus Biogas in kg je MWh erzeugten Stroms, für die Emissionen des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation der zusätzlichen Wärmeauskopplung, Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 16

Zu beachten ist, dass durch den Einsatz von Diesel als Zündöl spezifisch weniger Emissionen mit eutrophierender Wirkung verursacht werden, da die Auswirkungen der zusätzlichen Emissionen durch eine größere Stromproduktion kompensiert werden (siehe 2. Säule von rechts im vgl. zu 3. Säule von rechts in Abbildung 31, diese Interpretation trifft auch für den Tierproduktionsbetrieb zu (linke Hälfte des Diagramms), auch wenn hier das Ergebnis durch negative Teilterme zusätzlich verfälscht wird).

Die Gärrestemissionen verschlechtern das Ergebnis um ca. 20% (jeweils rechte Säule).



**Abbildung 31:** Emissionen mit eutrophierender Wirkung für Strom aus Biogas in kg je MWh erzeugten Stroms, für den Aufwand des landwirtschaftlichen Betriebs im Vergleich zu relevantem Referenzbetrieb bei Variation Zündstrahlmotor, Gärrestemissionen und Brache; Erläuterungen der Abkürzungen siehe Abbildung 17

#### 4.5 Vergleich mit anderen Techniken

Wie sich die Aufwendungen bzw. Emissionen einer Stromerzeugung aus Biogas im Vergleich zu anderen Optionen der Stromerzeugung darstellen, sowohl regenerativen als auch fossilen Ursprungs, wird im folgenden Kapitel gezeigt. Die Vergleichswerte (außer Biogas) werden aus Nill (2004) /28/ durch Mittelwertbildung der Jahre 2000 und 2010 entnommen. Für Biogas ist immer eine Spannbreite angegeben, welche sich aus den unterschiedlichen detailliert betrachteten Betrieben ergeben hat. Der Min-Wert resultiert in der Regel aus einem reinen Viehhaltungsbetrieb, der Max-Wert resultiert aus dem 100% NaWaRo Betrieb. Alle anderen Optionen der gemeinsamen Vergärung von Gülle mit nachwachsenden Rohstoffen liegen innerhalb dieser Spannbreite. Hierbei ist zu beachten, dass zum Teil eine erhebliche



Verbesserung des Ergebnisses durch zusätzliche Maßnahmen, wie sie z. B. in den Sensitivitätsanalysen (Kap.4.4) dargestellt wurden, erreicht werden kann. Es ist zu beachten, dass die Skalierung der negativen Achsen nicht maßstabsgetreu ist.

#### 4.5.1 Kumulierter Primärenergieaufwand

Die reine Stromerzeugung aus Biogas ist im Vergleich mit anderen Stromerzeugungstechnologien aus Sicht der Primärenergienutzung zwischen der Nutzung fester Biomasse bzw. Geothermie und der Nutzung von Strom aus Photovoltaikmodulen angesiedelt. Dabei sind besonders Mischnutzungen von Gülle und Nachwachsenden Rohstoffen mit den geringsten Primärenergieaufwendungen verbunden, wenn durch eine Betriebsveränderung eine Reduzierung der Tierbesatzdichte verbunden ist. Gerade durch eine zusätzliche Wärmeauskopplung kann für alle Modellbetriebe der Min-Wert und auch der Max-Wert bis auf Null abgesenkt werden und damit sehr vorteilhaft im Vergleich zu den anderen Technologien sein. Der Einsatz eines Zündstrahlmotors wirkt sich dagegen negativ auf den Primärenergieeinsatz aus.

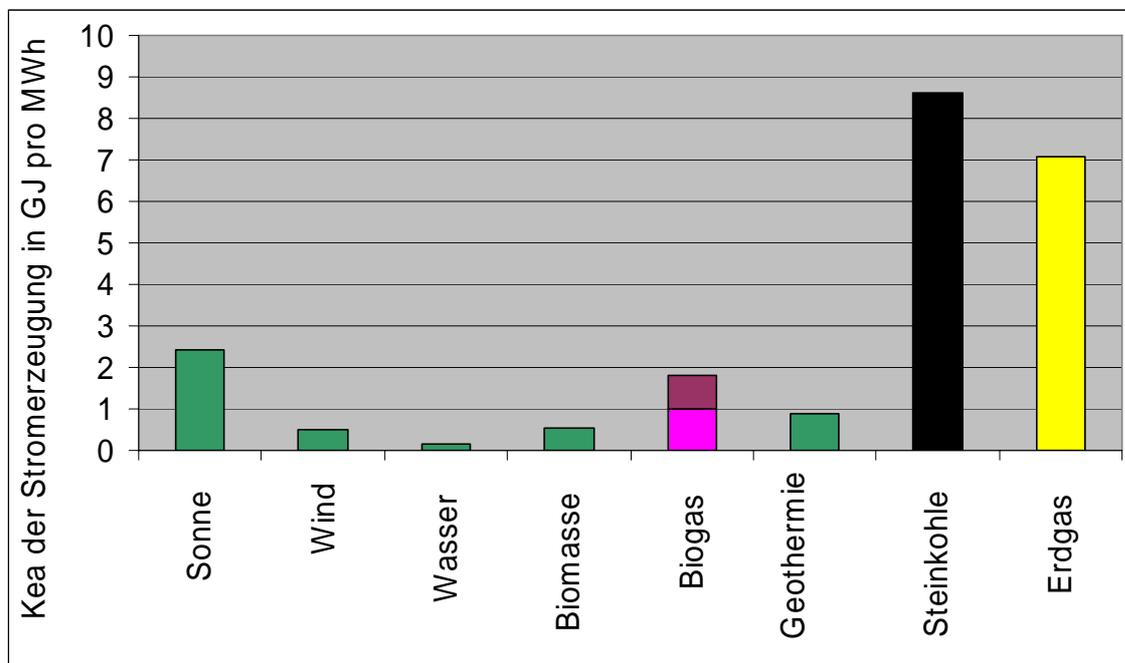


Abbildung 32: Primärenergieaufwand für Strom in GJ je MWh erzeugten Stroms (/28/ und eigene Berechnung)

#### 4.5.2 Anthropogener Treibhauseffekt

Die Variation der ökologischen Wirkungen bezogen auf den anthropogenen Treibhauseffekt sind außerordentlich groß. Sie können von erheblich negativen Emissionen bei der Nutzung von Gülle (hier sind die Effekte im Vergleich zu allen betrachteten Technologien als positiv zu bewerten) bis zu stark positiven Emissionen im Fall der reinen Nutzung nachwachsender Rohstoffe, die im Bereich der Nutzung von Erdgas liegen, variieren. Dabei muss bemerkt werden, dass alle betrachteten Varianten der kombinierten Nutzung von Gülle und nachwachsenden Rohstoffen (Anteil bis 30 Masse-%) negative Emissionswerte aufweisen und damit allen anderen Technologien vorzuziehen sind. Die Emissionen können erheblich durch hohe Nutzungsgrade der Abwärme verringert (im Max-Fall bis zu 1/3) und durch hohe Restgasemissionen aus dem Gärrestlager noch weiter erhöht werden.

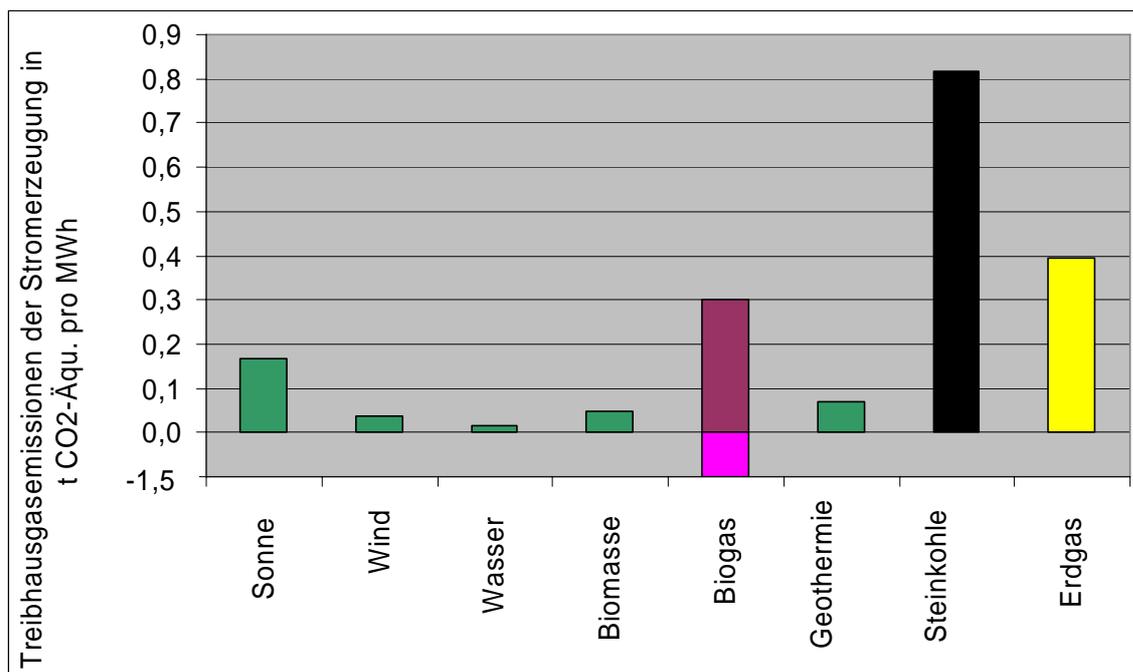


Abbildung 33: Treibhausgasemissionen für Strom in t je MWh erzeugten Stroms, (/28/ und eigene Berechnung)

### 4.5.3 Emissionen mit versauernder Wirkung

Auch für die versauernden Wirkungen weisen die betrachteten Betriebe mit Biogasverstromung eine sehr große Spannweite auf. Dabei ist festzustellen, dass gerade die Nutzung von Gülle (mindestens 70 Masse-%) zu stark negativen Wirkungen führt, wobei wiederum die reine Nutzung nachwachsender Rohstoffe erheblich versauernde Wirkungen aufweist und deutlich über allen anderen Stromerzeugungstechnologien liegt. Der Max-Wert kann z. B. durch Wärmeauskopplung nur um ca. 10% verringert werden.

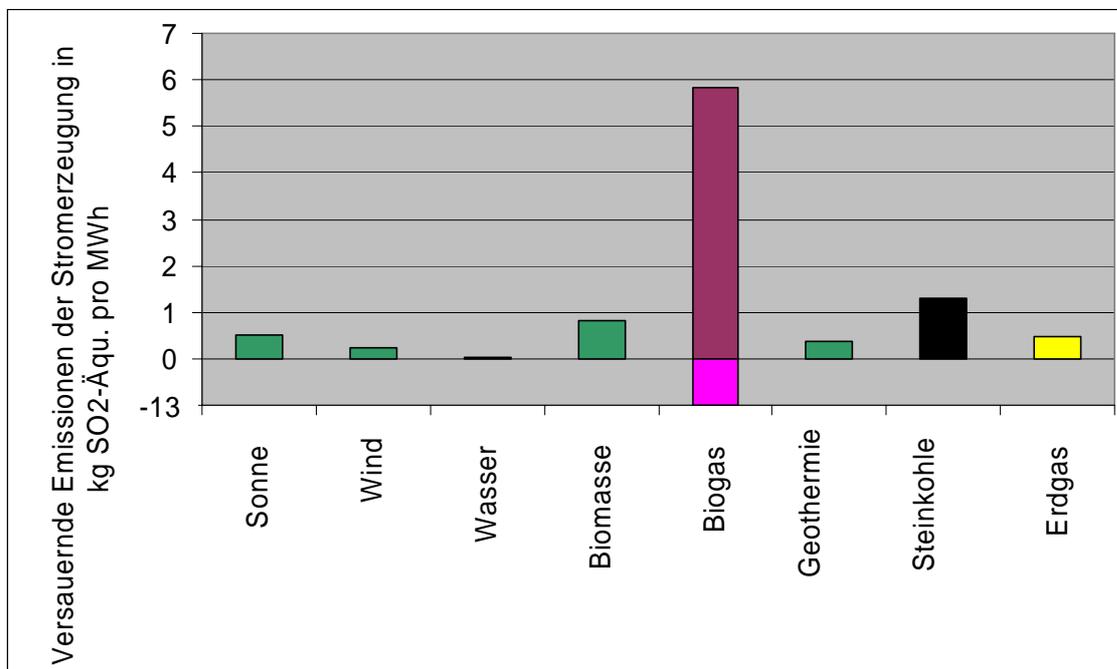


Abbildung 34: Emissionen mit versauernder Wirkung für Strom in kg je MWh erzeugten Stroms, (/28/ und eigene Berechnung)

#### 4.5.4 Emissionen mit eutrophierender Wirkung

Auch die eutrophierenden Wirkungen sind durch große Schwankungsbreiten gekennzeichnet. Das grundsätzliche Bild entspricht in etwa genau den versauernden Wirkungen, auch die Nutzung reiner nachwachsender Rohstoffe ist für die stärksten Wirkungen verantwortlich. Nur die Optionen mit Mischungen aus Gülle haben – mit zunehmendem Gülleanteil – günstigere Auswirkungen und führen zum großen Teil zu Reduktionen eutrophierender Emissionen. Auch hier kann z. B. durch Wärmeauskopplung nur eine Verminderung der Emissionen bei nachwachsenden Rohstoffen um ca. 10% erreicht werden.

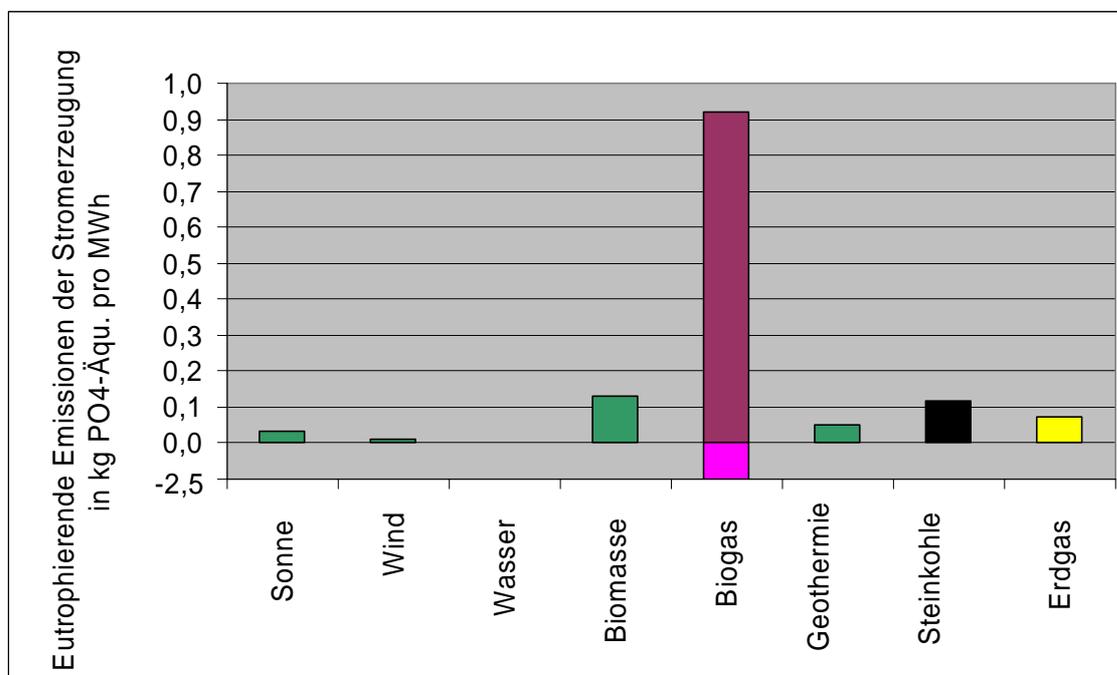


Abbildung 35: Emissionen mit eutrophierender Wirkung für Strom in kg je MWh erzeugten Stroms, (/28/ und eigene Berechnung)



## 5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ausgehend von Vieh haltenden landwirtschaftlichen **Betrieben** kann aus den Berechnungen abgeleitet werden, dass die Integration einer Biogasanlage in den Betriebsablauf erhebliche positive Wirkungen hat.

Für den Primärenergieaufwand kann dabei eine erhebliche Reduktion erreicht werden. Bei Einsatz von Mischungen aus Gülle und nachwachsenden Rohstoffen kann sogar ein erheblich negativer Primärenergieaufwand erreicht werden, der im Wesentlichen aus den Stromgutschriften resultiert.

Im Bereich der Treibhausgasemissionen spielen vor Allem vermiedene Emissionen aus der Güllelagerung die Hauptrolle. Damit lassen sich allein durch die Nutzung der Gülle in der Biogasanlage in erheblichem Maß Emissionen senken. Zusätzliche Effekte können ebenfalls durch die Stromgutschriften erreicht werden. Diese zusätzlichen Effekte spielen die wesentliche Rolle beim Einsatz nachwachsender Rohstoffe, die aufgrund des Aufwandes an Primärenergieträgern gegenüber den Stromgutschriften auch eine geringfügige Steigerung der absoluten Emissionen mit sich bringen. Insgesamt wird aber durch den zusätzlichen Einsatz nachwachsender Rohstoffe mit steigenden Anteilen der NaWaRo eine Verbesserung der Treibhausgasemissionen des Betriebes bis hin zur Klimagasemissions-Senke erreicht. Diese Verbesserung geht allerdings mit einer Verminderung der Besatzdichte einher, die sich hier erheblich positiv auswirkt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass aufgrund weitgehend konstanter Nachfrage nach Fleisch- und Milchprodukten diese Produktionszweige nicht ganz aufgegeben sondern eher auf andere Betriebe umgelagert werden.

Die Auswirkungen der Integration einer Biogasanlage auf die versauernden Emissionen des Betriebes sind von der Tendenz her mit den Effekten auf die Treibhausgasemissionen vergleichbar, die Reduktion ist allerdings deutlich geringer, so dass alle Modellbetriebe weiter versauernde Emissionen verursachen. Haupteinflussgrößen sind hier wiederum die verminderten Emissionen aus der Güllelagerung sowie die Stromgutschriften. Darüber hinaus spielen allerdings auch die Aufwendungen für den Anbau der nachwachsenden Rohstoffe hinsichtlich der Steigerung der Emissionen eine große Rolle.

Nahezu deckungsgleich mit den Wirkungen auf die versauernden Emissionen sind die eutrophierenden Emissionen der Betriebe. Auch die Ursachen stimmen weitgehend überein.

Im **Vergleich zwischen Rinder- und Schweinehaltung** kann ganz deutlich ein Unterschied zwischen den Ursachen der Emissionen festgestellt werden. Die Emissionen aus der Rinder-



haltung werden weitgehend durch direkte Emissionen aus der Viehhaltung verursacht wobei sie bei der Schweinehaltung wesentlich deutlicher aus dem Betriebsmittelaufwand resultieren. Durch die Integration einer Biogasanlage in den Betrieb werden allerdings bei der Rinder- als auch bei der Schweinehaltung vorwiegend die direkten Emissionen beeinflusst, die dann zu den entsprechenden ökologischen Vorteilen führen. Gerade in Bezug auf den Primärenergieaufwand und die Treibhausgasemissionen sind die erreichbaren Verbesserungen der ökologischen Bilanzierung durch die Integration einer Biogasanlage in den Betrieb in der Milchviehhaltung größer als in der Schweinemast. Bezogen auf die versauernden und eutrophierenden Emissionen sind die Wirkungen in beiden Viehhaltungsoptionen nahezu gleich.

Hinsichtlich der ökologischen Wirkungen mit **Bezug auf die erzeugte Strommenge** sind die Effekte im Wesentlichen mit den Effekten, die auf den jeweiligen Betrieb bezogen wurden vergleichbar. Einen Unterschied stellt hier nur die Stromerzeugung aus reinen nachwachsenden Rohstoffen dar. Der kumulierte Primärenergieaufwand ist in diesem Fall und bei der Vergärung reiner Gülle am höchsten. Hier stellen sich die Mischsysteme aus Gülle und nachwachsenden Rohstoffen am günstigsten dar, da die Raumausnutzung der Biogasanlage erheblich gesteigert werden kann, ohne erheblichen zusätzlichen technischen Aufwand zu erfordern. Hinsichtlich der Treibhausgasemissionen ist nur die Stromerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen mit zusätzlichen Emissionen verbunden, während alle Güllenutzungsoptionen eine Treibhausgassenke darstellen. Dies gilt ebenfalls für die Verursachung von versauernden und eutrophierenden Wirkungen.

Aufgrund der Tatsache, dass Biogasanlagen mit sehr unterschiedlichen Konfigurationen der Anlagentechnik und der Energienutzung betrieben werden können, wurden einige **Sensitivitätsuntersuchungen** durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Intensität der Abwärmenutzung von Biogasanlagen erheblichen Einfluss auf die ökologischen Wirkungen der Anlage hat, sofern eine reale Substitution von fossilen Energieträgern erfolgt. Der Primärenergieaufwand lässt sich durch steigende Wärmenutzungsgrade deutlich reduzieren. Hinsichtlich der Treibhausgasemissionen ist es bei mindestens 50 % Abwärmenutzung möglich, die durch Bau und Betrieb der Biogasanlage erzeugten Emissionen zu substituieren. Hinsichtlich der versauernden und eutrophierenden Effekte sind ebenfalls Minderungen erkennbar, die jedoch weniger bedeutend sind, als bei den beiden erstgenannten Indikatoren.



Der Einsatz von Zündstrahlmotoren im Vergleich zu Gas-Otto-Motoren ist neben dem Einsatz eines zusätzlichen Kraftstoffes mit etwas erhöhten direkten Emissionen verbunden. Bei Einsatz von Diesel ist dabei hinsichtlich aller kalkulierten Indikatoren eine Verschlechterung der ökologischen Wirkungen sichtbar. Diese Verschlechterung wird aber durch den Einsatz von Pflanzenöl, das ebenfalls als nachwachsender Rohstoff erzeugt wird, kompensiert und zum Teil überkompensiert.

Außerordentlich große Auswirkungen können freiwerdende Emissionen aus dem Gärrestlager haben. Die Emissionen sind sehr stark von der Effizienz des Anlagenbetriebes abhängig und sind damit sehr variabel. Bei sehr hohen Emissionen aus offenen Gärrestlagern können im Extremfall die positiven Wirkungen der Integration einer Biogasanlage in den landwirtschaftlichen Betrieb nahezu aufgehoben werden. Dabei ist zu erkennen, dass die angenommenen Maximalwerte der Emissionen aus dem offenen Endlager bei den Optionen mit Güllebehandlung dazu führen, dass insgesamt trotzdem eine ökologische Vorteilhaftigkeit der Biogasanlagenerrichtung erreicht wird, im Fall der reinen Nutzung nachwachsender Rohstoffe können jedoch sehr erhebliche zusätzliche Emissionen verursacht werden.

Im **Vergleich mit anderen beispielhaften Stromerzeugungsoptionen** /28/ ist die Bandbreite der ökologischen Wirkungen der Biogaserzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen mit und ohne Mischung mit Gülle sehr groß. Hinsichtlich des Primärenergieaufwandes liegt die Stromerzeugung aus Biogas zwischen der Stromerzeugung aus Geothermie und aus Photovoltaikmodulen, jedoch sehr deutlich günstiger als die Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern. Bezogen auf die an die Stromerzeugung gekoppelten Treibhausgasemissionen ist die Bandbreite der Biogasnutzung außerordentlich groß. Bezogen auf die typischen Vergleichsoptionen können vor Allem durch den Einsatz von Gülle erhebliche Minderungen erreicht werden und die Biogasnutzung ist die einzige Option der erneuerbaren Strombereitstellung, die eine Klimagasemissions-Senke sein kann. Die Nutzung reiner nachwachsender Rohstoffe ist dagegen mit Treibhausgasemissionen verbunden, die im Maximalfall höher sind als alle anderen erneuerbaren Energiequellen und nur durch eine zusätzliche Wärmenutzung an diese angenähert werden können. Die Emissionen liegen weit unter denen der Kohleverstromung, jedoch bereits sehr nahe an den Emissionen der Erdgasnutzung. Hinsichtlich der versauernden und eutrophierenden Wirkungen ist die Bandbreite bei der Biogasnutzung extrem groß. Auch hier sind gerade die Güllebehandlungsoptionen (rein oder in Mischung mit NaWaRo) als vorteilhaft im Vergleich zu



allen anderen Stromerzeugungstechnologien einzustufen, die reine Nutzung nachwachsender Rohstoffe ist allerdings mit erheblichen negativen Wirkungen verbunden.

Der **Vergleich verschiedener Anbaukulturen** in praxisnahen Fruchtfolgen kann am besten aus den Modellanlagen mit 30 % Anteil nachwachsenden Rohstoffen abgeleitet werden. Zum Teil sind sehr deutliche Unterschiede ersichtlich, die hauptsächlich auf die Differenzen hinsichtlich des Energieertrages von der Fläche zurückzuführen sind. Dabei können hinsichtlich aller Kulturen sehr ähnliche Aufwendungen für den Anbau der verschiedenen Kulturen bezogen auf alle Wirkungskategorien und die Betriebsfläche festgestellt werden. Das in diesem Rahmen betrachtete 2-Kulturen-System ist dabei in allen Kategorien mit erhöhten und die Nutzung von Grassilage mit geringeren Aufwendungen verbunden. Hinsichtlich der Energieerträge pro Flächeneinheit liegen deutlich die reine Maissilage und die Kombination aus Maissilage und Roggenganzpflanzensilage vorn. Aufgrund der Tatsache, dass die Gutschrift für den erzeugten Strom die höchsten Auswirkungen auf alle Wirkungskategorien zeigt, sind auch aus ökologischen Gesichtspunkten diese beiden Nutzungsoptionen zu bevorzugen. Vor dem Hintergrund des positiven Ergebnisses für die Nutzpflanze Mais ist darauf hinzuweisen, dass dies hauptsächlich in der relativ hohen Effizienz der Flächennutzung begründet liegt. Werden andere, im Rahmen der Ökobilanzen nicht bewertbare Faktoren mit einbezogen, kann sich dieses Bild etwas verändern. Vor allem hinsichtlich anderer Bewertungsfaktoren wie z. B. Einfluss auf die Artenvielfalt (z.B. Lebensraumverlust für Vögel), Erosion, Verdichtung, Humuszehrung, Nähr- / Schadstoffeintrag in Oberflächen sowie Grundwasser, den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und anderen kann der Anbau von Mais als Energiepflanze lokal auch in Zweifel gezogen werden. Letztlich ist die anwendbare Fruchtart und Fruchtfolge von der lokal verfügbaren Bodenqualität abhängig und kann nicht für ganz Deutschland verallgemeinert werden.

Bezogen auf die erzeugte Strommenge bietet sich ein leicht verändertes Bild. Aufgrund der verschiedenen aus den Betrachtungen resultierten Leistungsklassen der in die Modellbetriebe integrierten Biogasanlagen wirken sich gerade die Veränderungen der Tierbesatzdichte wesentlich stärker auf die Umweltwirkungen aus. Aufgrund der Tatsache, dass der größere Flächenbedarf sowohl für die Nutzung von Dauergrünland als auch für den Anbau von Roggen-Ganzpflanzensilage zu einer insgesamt geringeren Tierbesatzdichte und damit absolut verminderten Emissionen aus der Tierhaltung führt, liegen hier die Emissionen der Modellbetriebe in den Wirkungskategorien Treibhausgasemissionen, versauernde und eutrophierende Wirkungen mit diesen beiden Kulturen unter den Emissionen der anderen



Anbauoptionen. Dieses Resultat lässt aber nur begrenzt Rückschlüsse auf die Vorteilhaftigkeit von spezifischen nachwachsenden Rohstoffen zu.

Ausgehend von den zusammengefassten Resultaten der Analysen können in begrenztem Umfang notwendige bzw. sinnvolle **Maßnahmen** für die Integration von Biogasanlagen in landwirtschaftliche Betriebe abgeleitet werden.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass jegliche Nutzung von Gülle zur Biogaserzeugung mit anschließender Strombereitstellung mit deutlich positiven ökologischen Effekten verbunden ist. Aus diesem Grunde sollten die vorhandenen Bestrebungen, die Güllenutzung zur Biogaserzeugung zu fördern, weiter verfolgt und ggfs. verstärkt werden. Dabei können die größten Effekte durch Mischung von Gülle mit geringen Energiebereitstellungspotenzialen mit nachwachsenden Rohstoffen mit hoher Energiedichte erreicht werden. Mit derartigen Maßnahmen können sowohl die politischen Ziele, Emissionen zu vermindern, als auch die Ziele, nachhaltig Energie bereitzustellen, erreicht werden.

Dagegen ist die Nutzung von reinen nachwachsenden Rohstoffen zur Biogas- und anschließenden Stromerzeugung mit deutlichen Umweltauswirkungen verbunden. Diese Wirkungen können durch fehlende Wärmenutzung oder offene Gärrestlager noch weiter verstärkt werden. Aus diesem Grund sollte die Stromerzeugung aus Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen immer in sehr effizienten Anlagen erfolgen, die sowohl über gasdicht abgedeckte Gärrestlager verfügen als auch möglichst hohe Wärmenutzungsgrade aufweisen.

Aus technischer Sicht können nur begrenzt Maßnahmen aus den durchgeführten Kalkulationen abgeleitet werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Datenlage hinsichtlich der Emissionen einzelner Anlagenkomponenten und Anlagentypen sehr schlecht und inhomogen ist. Trotzdem wird sehr deutlich, dass gerade in gesteigerten Nutzungsgraden der Abwärme und der gasdichten Abdeckung von Gärrestlagern die wesentlichen Optimierungspotenziale von Biogasanlagen liegen. Damit sollten hier weiter deutliche Anreize geschaffen werden, die beiden Potenziale zu erschließen. Hinsichtlich der Wärmenutzung ist jedoch ausgehend von den bisher praktizierten Wärmenutzungen, die zur Erschließung des KWK-Bonus des Erneuerbare-Energien-Gesetzes führen sollen, sehr stark darauf zu achten, dass in der Anlagenpraxis real fossile Energieträger ersetzt werden. Dies ist bisher nicht in allen Fällen gegeben. Hinsichtlich der Abdeckung von Gärrestlagern können die Potenziale im



Wesentlichen durch die Genehmigungspraxis bzw. durch Anpassung des Genehmigungsrechts erschlossen werden.

Die ökologischen Wirkungen von Bau und Betrieb von Biogasanlagen sind ansonsten als relativ gering einzuschätzen. Durch die Abschaffung des Einsatzes von Zündstrahlmotoren durch das EEG ab 1.1.2007, die auf der Basis von fossilen Treibstoffen arbeiten, werden die damit verbundenen negativen Wirkungen voraussichtlich effektiv vermindert.

Weitere technische Maßnahmen können grundsätzlich zu einer stärkeren Verminderung der negativen Wirkungen der Biogasnutzung beitragen, aber nicht quantitativ belegt werden. Hier sind Maßnahmen von der Anbautechnologie der nachwachsenden Rohstoffe über die Lagerung der Rohstoffe bis hin zur Biogasanlagentechnologie zu erwarten. In diesen Bereichen besteht jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf hinsichtlich der belastbaren Erfassung von Emissionsdaten, die der Berechnung zugrunde gelegt werden können. Als Schwerpunkte werden im Einzelnen gesehen:

- Lagerung / Silierung nachwachsender Rohstoffe
- Einbringung der Rohstoffe in die Biogasanlage
- Emissionen aus der Anlage (Schwerpunkt Foliendächer / Folienspeicher)
- Emissionen aus dem BHKW (unverbrannte Gasbestandteile)
- Einsatz verschiedener Lagerungstechnologien

Bei der Ermittlung von Emissionskenndaten für diese Schritte können sicher weitere Maßnahmen für die Emissionsminderung aus Biogasanlagen zur Vergärung nachwachsender Rohstoffe abgeleitet werden.



## Literaturverzeichnis

- /1/ AG Energiebilanzen: Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, Berlin 1995
- /2/ Boeckx, P., van Cleemput, O. (2001): Estimates of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes from agricultural lands in various regions in Europe. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60, S. 35-47
- /3/ Borken, J., Patyk, A., Reinhardt, G. A. (1999): Basisdaten für ökologische Bilanzierungen. Vieweg, Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig / Wiesbaden
- /4/ BTL (2002): Bayerische Landesanstalt für Tierzucht (Hrsg.): Fütterung der Milchkühe, Zuchtrinder, Mastrinder, Schafe, Ziegen. 23. Auflage, Poring
- /5/ Clausen, N. (2000): Analyse des Elektroenergieverbrauchs und Konzeption energetisch und verfahrenstechnisch optimierter Lösungen für die Milchvieh- und Schweinehaltung. Dissertation, Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik, Christian-Albrechts-Universität, Kiel
- /6/ DBU (2003a): Biogasgewinnung aus Gülle, organischen Abfällen und aus angebauter Biomasse – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse. DBU Projekt 15071, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig
- /7/ DBU (2003b): Untersuchungen der Emission direkt und indirekt klimawirksamer Spurengase (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub>) während der Lagerung und nach der Ausbringung von Kofermentationsrückständen sowie Entwicklung von Verminderungsstrategien. Abschlußbericht zum DBU Projekt AZ 08912
- /8/ ECOINVENT (2004): Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems Data v1.1 (2004) Ecoinvent report No. 15. Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Hrsg.), Dübendorf
- /9/ Edelmann, W., Schleiss, K., Engeli, H., Baier, U. (2001): Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas. Bundesamt für Energie, Bern.
- /10/ ELTRA (2003): Kortlægning af emissionsfaktorere fra decentral kraftvarme. Report ELTRA PSO project 3141, Fredericia, Denmark
- /11/ FAL (2000): Bewertung von Verfahren der ökologischen und konventionellen landwirtschaftlichen Produktion im Hinblick auf den Energieeinsatz und bestimmte Schadgasemissionen. Sonderheft 211, Braunschweig
- /12/ Heijungs, R. (final editor): Environmental Life Cycle Assessment of Products. Leiden 1992
- /13/ Institut für Energetik und Umwelt gGmbH et al.: Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. 3. Zwischenbericht. Leipzig, 2006
- /14/ Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC): WGI Third Assessment Report. 2001
- /15/ IPCC (1996): Greenhouse Gas Inventories. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
- /16/ IPCC (2000): IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories
- /17/ ISO 14040 (1997): Umweltmanagement - Produkt-Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen.
- /18/ ISO 14041 (1998): Umweltmanagement - Ökobilanz – Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz
- /19/ ISO 14042 (1998): Umweltmanagement - Ökobilanz – Wirkungsabschätzung (Entwurf).
- /20/ ISO 14043 (1998): Umweltmanagement - Ökobilanz – Auswertung (Entwurf).
- /21/ Kaltschmitt, M., Reinhardt, G. A. (1997): Nachwachsende Energieträger Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung; Vieweg, Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig / Wiesbaden
- /22/ KTBL (2002): Ökologische Landbau - Kalkulationsdaten zu Ackerfrüchten, Feldgemüse, Rindern, Schafen und Legehennen. KTBL (Hrsg.), Darmstadt



- /23/ KTBL (2004): Betriebsplanung Landwirtschaft 2004/05 – Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. KTBL (Hrsg.), Darmstadt
- /24/ Michel, J., A. Weiske und M. Kaltschmitt: Ökologische und ökonomische Bilanzierung; in: Universität Gießen: „Biogas im ökologischen Landbau“, Abschlussbericht eines durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderten Vorhabens, Gießen, 2006
- /25/ Mittelfränkische Landwirtschaftsverwaltung (2004): Die Datensammlung für die Landwirtschaft 2004. 14. Auflage, Ansbach
- /26/ Moerschner, E. J. (2000): Stoff- und Energiebilanzen von Ackerbausystemen unterschiedlicher Intensität - eine Untersuchung an den Rapsfruchtfolgen des Göttinger INTEX-Systemversuchs. Dissertation, Georg-August-Universität, Göttingen
- /27/ Neufeldt, H. (2005): Persönliche Mitteilung, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig
- /28/ Nill, M. (2004): Die zukünftige Entwicklung von Stromerzeugungstechniken – Eine ökologische Analyse vor dem Hintergrund technischer und ökonomischer Zusammenhänge. Fortschritt-Bericht VDI Reihe 6 Nr. 518, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf
- /29/ Olesen, J.E., Weiske, A., Asman, W. A., Weisbjerg, M. R., Djufhuus, J., Schelde, K. (2004): FarmGHG – A model for estimating greenhouse gas emissions from livestock farm – Do-cumentation, Danish Institute of Agricultural Sciences
- /30/ Patyk, A., Reinhardt, G. A. (1997): Düngemittel-, Energie- und Stoffstrombilanzen. Vieweg, Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig / Wiesbaden.
- /31/ Poulsen, H. D., Børsting, C. F., Rom, H. B., Sommer, S. G., (2001). Kvælstof, fosfor og kalium i husdyrgødning – normalt 2000. Danish Institute of Agricultural Sciences, DJF report no. 36
- /32/ SETAC-Europe(1999): Second Working Group on LCIA: Best Available Practice Regarding Impact Categories and Category Indicators in Life Cycle Impact Assessment. Int. J. LCA 4 (2) 66
- /33/ Søgaard, H.T., Sommer, S.G., Hutchings, N.J., Huijsmans, J.F.M., Bussink, D.W., Nicholson, F., (2002): Ammonia volatilization from field-applied animal slurry – the ALFAM model. Atmospheric Environment 36, S. 3309-3319
- /34/ UBA (2005): Deutsches Treibhausgasinventar 1990-2003 - Nationaler Inventarbericht 2005. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau
- /35/ VdOe (2001): 300 Futterrationen für Milchkühe. 4. Auflage, Verband Deutscher Ölmühlen e. V. (Hrsg.), Bonn