Materialband: E

Ökobilanzen

Im Rahmen des BMU-Forschungsvorhabens „Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland“, FKZ: 0327544

Sven Gärtner [1], Julia Münch [1], Dr. Guido Reinhardt [1], Regine Vogt [1]

Inhaltsverzeichnis

1 Hintergrund und Ziel 2
2 Vorgehensweise und Definitionen im Detail 3
2.1 Grundsätzliche Vorgehensweise 3
2.2 Betrachtete Biogaspfade 3
2.2.1 Biogaspfade im Überblick 4
2.2.2 Basisszenario 5
2.2.3 Substrate zur Biogaserzeugung 9
2.2.4 Anlagenspezifische Variationen 13
2.2.5 Nutzung des Biogases und Gutschriften 15
2.2.6 Biogasaufbereitung auf Erdgasqualität 16
2.3 Methodische Festlegungen 19
2.3.1 Betrachtete Umweltwirkungen 19
2.3.2 Energie aus Biogas: Wahl der Vergleichssysteme 21
2.3.3 Bewertung der Nebenprodukte 22
2.3.4 Berechnung der Klimagasemissionen 22
2.3.5 Landnutzungsänderung 23
3 Ergebnisse zu den betrachteten Biogaspfaden 25
3.1 Ergebnisse im Basisszenario 25
3.1.1 Biogas – ja oder nein? 25
3.1.2 Biogas aus Maissilage versus Biogas aus Rindergülle 26
3.1.3 Detaillierte Ergebnisse und weitere Umweltwirkungen 27
3.2 Verschiedene Substrate 32
3.3 Anlagenspezifische Variationen 38
3.3.1 Emissions-Optimierungspotenzial 38
3.3.2 Anlagengröße und -art 42
3.3.3 Nutzung des Biogases und Gutschriften für Vergleichsysteme 44
3.3.4 Biogasaufbereitung zu Biomethan 50
4 Ergebnisse, Schlussfolgerungen & Handlungsempfehlungen 54
4.1 Ergebnisübersicht 54
4.2 Schlussfolgerungen & Handlungsempfehlungen 54
4.3 Forschungsbedarf 56
5 Literatur 57
6 Forschungspartner und Adressen 60

[1] IFEU-Institut, Heidelberg; Kontaktdaten s. Kapitel 6

1 Hintergrund und Ziel

Hintergrund und Erkenntnisinteresse

In den letzten Jahren hat die Biogasbranche einen gewaltigen Aufschwung erlebt. Bedingt durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz wurde der Zubau von Biogasanlagen zunehmend attraktiv. Dabei hat sich gezeigt, dass die Biogasproduktion einen wichtigen Beitrag zur Einsparung von Treibhausgasen leisten und damit zur Realisierung der bundesdeutschen Klimaschutzziele beitragen kann. Ebenso wurde aber deutlich, dass es auch nachteilige ökologische Effekte geben kann: So kann die Treibhausgasbilanz durchaus negativ ausfallen, z. B. wenn aus den Gärrestlagern hohe Methanemissionen freigesetzt werden.

Damit wird deutlich, dass es einer systematischen Untersuchung der verschiedenen ökologischen Auswirkungen unter Berücksichtigung aller ergebnisbestimmenden Parameter bedarf. In der vorliegenden Teilstudie „Ökobilanzen“ wird dazu eine Fülle unterschiedlicher Szenarien untersucht, die sich aus der Kombination verschiedener Ausgangssubstrate, Vergärungstechnologien und Nutzungsmöglichkeiten des Biogases ergeben und auf diese Weise eine differenzierte ökologische Bewertung zulassen.

Ziel der Untersuchung

Ziel der Studie ist die Erfassung der ökologischen Auswirkungen der Bereitstellung und Nutzung von Biogas in Deutschland sowie das Ableiten von diesbezüglichen Handlungsempfehlungen. Als Unterziele sind insbesondere zu nennen:

- Ob und unter welchen Bedingungen eine Produktion und Nutzung von Biogas im Vergleich zur konventionellen Energieerzeugung aus meist fossilen Energieträgern aus ökologischer Sicht sinnvoll ist. Dabei soll die Biogasproduktion und -nutzung in Deutschland unter Berücksichtigung aller geeigneten Biogassubstrate sowie unterschiedlichen Anlagen- und Biogasnutzungskonzepten betrachtet werden.
- Ökologische Analyse der unterschiedlichen Biogaspfade im Vergleich untereinander.
- Ableitung der jeweils Ergebnis bestimmenden Einzelprozesse und deren quantitativen Zusammenhänge bei allen betrachteten Biogaspfaden.
- Identifikation, welche ökologischen Optimierungspotenziale vorhanden sind und wie sie gegebenenfalls ausgeschöpft werden können.
- Ableitung aussagekräftiger Schlussfolgerungen sowie Handlungsempfehlungen und gegebenenfalls Forschungsbedarf.

2 Vorgehensweise und Definitionen im Detail

In diesem Kapitel wird zunächst die grundsätzliche Vorgehensweise präsentiert (Kap. 2.1), dann werden alle betrachteten Biogaspfade beschrieben (Kap. 2.2) und anschließend methodische Festlegungen detailliert erläutert (Kap. 2.3).

2.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Das Schaubild Abb. 2-1 zeigt als Beispiel den Lebensweg (Prozesskette) für die Biogaserzeugung aus Gülle bzw. Anbaubiomasse wie Silomais und die Biogasnutzung in einem Blockheizkraftwerk (BHKW). Für jeden Prozessschritt entlang der Kette werden die Emissionen bzw. Umweltwirkungen ermittelt. So gelingt es, die Bedeutung der einzelnen Prozesse zu identifizieren, um Optimierungsmaßnahmen ableiten zu können. Am Ende der Prozesskette steht ein Nutzen, hier in Form von ins öffentliche Netz eingespeistem Strom, und extern nutzbarer Wärme. Durch diesen Nutzen können andere Produktionsprozesse ersetzt werden. In der Abbildung ist dies durch die rechts stehenden so genannten Vergleichssysteme Strom und Wärme dargestellt.

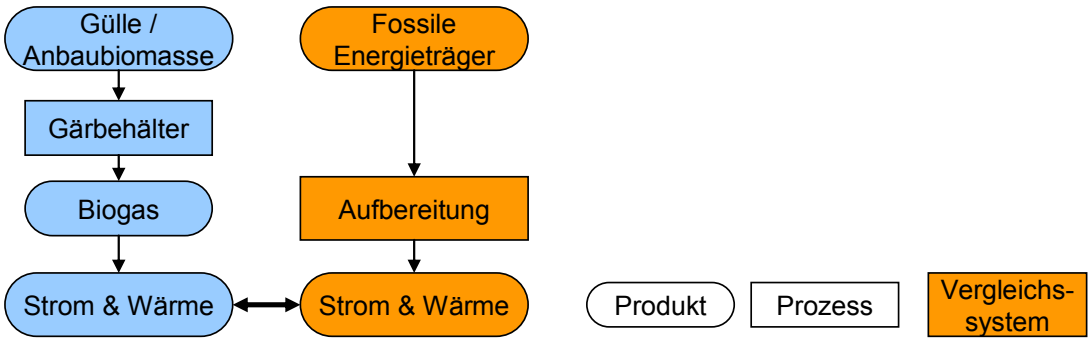


Abb. 2-1 Schema eines exemplarischen Lebenswegvergleichs von Biogas aus Gülle und Vergleichssystem

Die Biogasproduktion lässt sich noch wesentlich differenzierter darstellen. So fallen auch Nebenprodukte an, beispielsweise ein Gärrest, der als Dünger verwendet werden kann. In Kap. 2.2 werden die Lebenswege detaillierter betrachtet.

Die Untersuchung der ökologischen Auswirkungen erfolgt in Anlehnung an die Ökobilanznorm (ISO 14040/14044). Dementsprechend werden die gesamten Lebenswege der Nutzung von Biogas zur Wärme- und Stromproduktion oder als Kraftstoff von der Biomassebereitstellung über die Biogaserzeugung und Entsorgung der Reststoffe bis hin zu den Schadstoffemissionen im Vergleich zu fossiler Wärme-, Strom- und Kraftstoffproduktion und -nutzung betrachtet. Darauf aufbauend werden Variationen und Sensitivitätsanalysen über wichtige Lebenswegabschnitte bzw. Einzelprozesse durchgeführt, so z. B. für unterschiedliche Substrate oder Anlagengrößen, und gegebenenfalls Optimierungspotenziale abgeleitet. Somit können die wesentlichen ökologischen Zusammenhänge der Biogasnutzung aufgezeigt und bewertet werden.

2.2 Betrachtete Biogaspfade

Welche ökologischen Auswirkungen die Nutzung und Produktion von Biogas hat, ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Je nach Kombination dieser Einzelfaktoren ergeben

sich Dutzende von Biogaspfaden, die sich in ihren ökologischen Auswirkungen stark unterscheiden können und daher differenziert zu betrachten sind.

2.2.1 Biogaspfade im Überblick

In Tab. 2-1 sind Einflussgrößen aufgelistet, die bei der Biogasproduktion eine Rolle spielen können und es ist angegeben, wie sie differenziert wurden. Aus den Kombinationen dieser einzelnen Systemdaten miteinander ergibt sich eine Vielzahl an Biogaspfaden, die in dieser Studie hinsichtlich ihrer ökologischen Auswirkungen untersucht wurden.

Tab. 2-1 Systemdaten von Biogaspfaden

1	**Substrate**	• Rindergülle, Schweinegülle • Maissilage, Grassilage, Roggenkorn, Getreide-Ganzpflanzen-Silage (GPS) • Substratmischungen (siehe Tab. 2-5) • Bioabfälle
2	**Anlagengrößen & Wirkungsgrade**	• Anlagen bis 1,5 MW_{el}: diffuse Methanemissionen Biogasanlage 1 %; Methanschlupf BHKW 0,5 % • Anlagen ab 1,5 MW_{el}: diffuse Methanemissionen Biogasanlage 0,45 %; kein Methanschlupf BHKW da Einsatz Oxidationskatalysator • Kleinstanlage: 30 kW_{el} (Wirkungsgrad eta_{el} = 32 %, eta_{th} = 52 %) • BHKW 100 kW_{el} (Wirkungsgrad eta_{el} = 32 %, eta_{th} = 52 %) • BHKW 500 kW_{el} (Wirkungsgrad eta_{el} = 37,5 %, eta_{th} = 43 %) • BHKW 1 MW_{el} (Wirkungsgrad eta_{el} = 40 %, eta_{th} = 43 %) • BHKW 2 MW_{el} (Wirkungsgrad eta_{el} = 41 %, eta_{th} = 43 %) • Brennstoffzellen-BHKW (Wirkungsgrad eta_{el} = 47 %, eta_{th} = 23 %) • Zündstrahlmotor (Wirkungsgrad eta_{el} = 37 %)
	Wärmenutzung	• Keine Wärmenutzung (0 %) • Wärmenutzung 20 % (Basisszenario) • Wärmenutzung 80 % • Wärme in ORC
4	**Lagerung Gärrest**	• Offene Lagerung, CH_4-Emissionen 2,5 % (Basisszenario) • Offene Lagerung, CH_4-Emissionen: 15 % (hoch) • Gasdichte Lagerung, CH_4-Emissionen: 0 %
5	**Ausbringung & Einarbeitung Gärrest**	• Ausbringung mit Breitverteiler, Einarbeitung nach 24 h (Basisszenario), 100 % NH_3 • Ausbringung mit Breitverteiler, Einarbeitung nach 6 h, 70 % NH_3-Emissionen* • Ausbringung mit Breitverteiler, Einarbeitung nach 1 h, 20 % NH_3-Emissionen* • Ausbringung mit Schleppschlauch, keine Einarbeitung, 70 % NH_3-Emissionen*
6	**Biomethan-Aufbereitung**	• Einspeisung ins Erdgasnetz (Biogasanlage entsprechend 500 kW_{el} bzw. 2 MW_{el}) • Druckadsorption (PSA), Methanschlupf 2 % oder • Druckwasserwäsche (DWW), Methanschlupf 2 % oder • Aminwäsche, Methanschlupf 0,1 % • „Stand der Technik“: Gasdichte Abdeckung von Vor- u. Gärrestlager, Nachverbrennung des Methans ohne energetische Nutzung • Regenerative Energie: Wärme für Aufbereitung aus Holz-Heizwerk

7	**Biomethan-nutzung**	• Nutzung im BHKW (100 kW_{el}, 500 kW_{el}, 1 MW_{el}) mit 100 % Wärmenutzung • Nutzung als Kraftstoff (in bivalenten und monovalenten Fahrzeugen) • Nutzung als Erdgas-Ersatz • Nutzung im GuD-Kombikraftwerk (Wirkungsgrad eta_{el} = 50 %)
8	**Ersetzte fossile Energie**	• Marginalbetrachtung: Strom: 70 % Steinkohle, 30 % Erdgas; Wärme: 57 % Erdgas, 43 % Heizöl (Basisszenario) • Durchschnittsbetrachtung: Strom- und Wärmemix Deutschland

** gilt für alle Substrate außer Schweinegülle, dazu sind eigene Werte verfügbar (BMVEL/UBA 2002)*

Im Folgenden zwei Beispiele von Biogaspfaden:

Beispiel 1: Kombination 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 8

- Rindergülle als Substrat (1)
- Nutzung von Biogas in einem BHKW mit 500 kW elektrischer Leistung (2)
- Keine Wärmenutzung (3)
- Offene Gärrestlagerung (4)
- Ausbringung des Gärrestes mit einem Breitverteiler nach 24 Stunden (5)
- Ersetzte fossile Energie: Marginalbetrachtung (8)

Beispiel 2: Kombination 1 – 4 – 5 – 6 – 7

- Maissilage als Substrat (1)
- Gasdichte Gärrestlagerung (4)
- Ausbringung des Gärrestes mit einem Schleppschlauch (5)
- Produktion von Biogas, Aufbereitung zu Biomethan durch Aminwäsche nach Stand der Technik (6)
- Einsatz als Kraftstoff in monovalenten Fahrzeugen (7)

Die untersuchten Pfade werden im Folgenden näher beschrieben.

2.2.2 Basisszenario

Biogas kann aus den unterschiedlichsten Arten von Biomasse gewonnen werden. Im Basisszenario werden zwei Einsatzsubstrate unterschieden: Biogas aus 100 % Maissilage und Biogas aus 100 % Rindergülle. Tatsächlich findet eine solche Monovergärung in der Regel nicht statt, sondern häufig eine Co-Fermentation, in der verschiedene Substrate in unterschiedlicher Zusammensetzung vergoren werden. Im Zusammenhang der wissenschaftlichen Ermittlung ökologischer Auswirkungen ist es aber von Bedeutung, diese den einzelnen Substraten zuordnen zu können. Im Weiteren können dann anhand der Ergebnisse der Extrema „100 % Rindergülle“ und „100 % Maissilage“ für Co-Substrate von Rindergülle und Silomais die Umweltwirkungen unterschiedlicher Mischungsverhältnisse abgeleitet werden. Hier werden Daten für das Basisszenario einer mittleren Biogasanlage mit Rindergülle bzw. Maissilage sowie BHKW analysiert.

Basisszenario:

- BHKW-Anlage mit 500 kW_{el};
- Wirkungsgrad: eta_{el} = 37,5 %; eta_{th} = 43 %
- Substrate: Gülle: Rindergülle; Anbaubiomasse: Maissilage
- Gärrestlager: Anlage mit offenem Gärrestlager, Methanverluste 2,5 %
- Einarbeitung des Gärrestes nach 24 h nach Ausbringung mit Breitverteiler
- Wärmenutzung: 20 % der anfallenden Wärme werden genutzt (Beheizung Betriebsgebäude u. ä.)
- Methanverluste: Biogasproduktion 1 %, BHKW 0,5 %
- Substitution: Stromgutschrift: 70 % Steinkohle, 30 % Erdgas (Marginalbetrachtung), Wärmegutschrift: 57 % Erdgas, 43 % Heizöl (Marginalbetrachtung)
- Wirkungsabschätzung mit Äquivalenzfaktoren aus IPCC 2007 (vgl. Tab. 2-9)

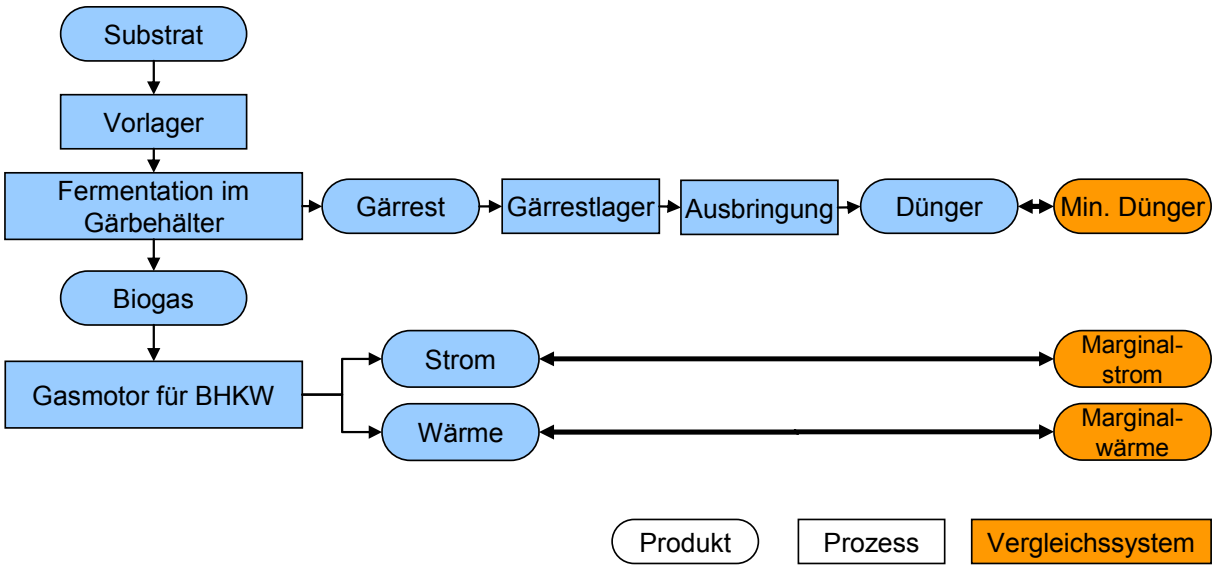


Abb. 2-2 Schematischer Lebenswegvergleich einer Biogasanlage mit 500 kW_{el} und 20%iger Wärmenutzung (Basisszenario)

Im Basisszenario wird entweder Maissilage oder Rindergülle im Gärbehälter fermentiert. Anschließend wird das Biogas ohne oder nach nur einfacher Aufbereitung (biologische Entschwefelung) im Gasmotor in einem BHKW von 500 kW_{el} ohne Katalysator energetisch genutzt, um Strom und Wärme zu erzeugen. Der Strom wird in das Netz eingespeist. Von der Wärme, die nicht anlagenintern zum Halten der Betriebstemperatur der Vergärung benötigt wird, werden im Standardfall 20 % für Heizzwecke genutzt. Die jeweils dadurch in erster Linie ersetzten konventionellen Prozesse der Strom- und Wärmeerzeugung sind in Kap. 2.2.5 erläutert und im Weiteren in Kap. 2.3 Für das Basisszenario wird weiterhin zugrunde gelegt, dass die eingesetzte Gülle in einem offenen Vorlager gelagert, die Gärreste offen zwischengelagert, mit einem Breitverteiler ausgebracht und in Anlehnung an (UBA/BMVEL 2002) nach durchschnittlich 24 Stunden eingearbeitet werden. Die pflanzen-

verfügbaren Nährstoffe im ausgebrachten Gärrest ersetzen Mineraldünger. In Abb. 2-2 ist ein solcher Lebensweg schematisch dargestellt.

Rindergülle als Substrat

Gülle kann in Biogasanlagen sehr gut eingesetzt werden. Ein Vorteil ist, dass sie kostenlos zur Verfügung steht. Zudem erfährt sie durch die Vergärung eine Veredelung, so dass sie im Vergleich zur Direktausbringung von unbehandelter Gülle besser in den Boden eindringen kann und für weniger Stickstoffverluste sorgt. Aufgrund des hohen Wasseranteils von Gülle ist allerdings die Energieausbeute pro Kilogramm gering. Daher ist beispielsweise Gülle von gut 4000 Rindern nötig, um eine Biogasanlage mit 500 kW_{el} zu betreiben. Ein Einsatz von reinem Güllesubstrat in großen Biogasanlagen ist daher nur in Gebieten mit sehr hohem Viehbesatz möglich, der in Deutschland in dieser Größenordnung nur in Einzelfällen gegeben ist. Die geringe Energiedichte macht weite Transportwege ökonomisch unrentabel. Da Gülle ein Reststoff ist, der ohnehin anfällt, muss dessen ansonsten übliche Handhabung in die Ökobilanzierung durch Systemraumerweiterung einbezogen werden. Entsprechend werden der Biogasgülle die durch die Vergärung ggf. vermiedenen Emissionen der ansonsten üblichen Behandlung gegenübergestellt.

Da die Datenbasis für Emissionen aus der Behandlung von vergorener und unvergorener Gülle teilweise auf qualitativen Experteneinschätzungen oder nur wenigen Messergebnissen beruht, werden in den Ergebnissen in Kap. 3 die Ergebnissalden für den Treibhauseffekt, den Nährstoffeintrag und die Versauerung mit Unsicherheitsbandbreiten dargestellt. Die Standardfehlerabweichung wurde mit 10 % angesetzt, entsprechend ergeben sich die Unsicherheitsbandbreiten aus jeweils um den Faktor 1,1 erhöhten bzw. erniedrigten Ammoniak-, Lachgas- und Methan-Emissionen beim Vorlager, Gärrestlager, der Ausbringung des Gärrestes sowie aus den um denselben Faktor erniedrigten bzw. erhöhten Emissionen aus dem Güllelager und der Direktausbringung von Gülle. Mit dem Faktor wird eine Abschätzung der Datenunsicherheit angegeben, sie kann allerdings sogar noch höher liegen (FAL 2007).

Abb. 2-3 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Lebenswegs der Verarbeitung von Gülle zu Biogas. In diesem Projekt wird neben Rindergülle auch Schweinegülle ökobilanziell untersucht.

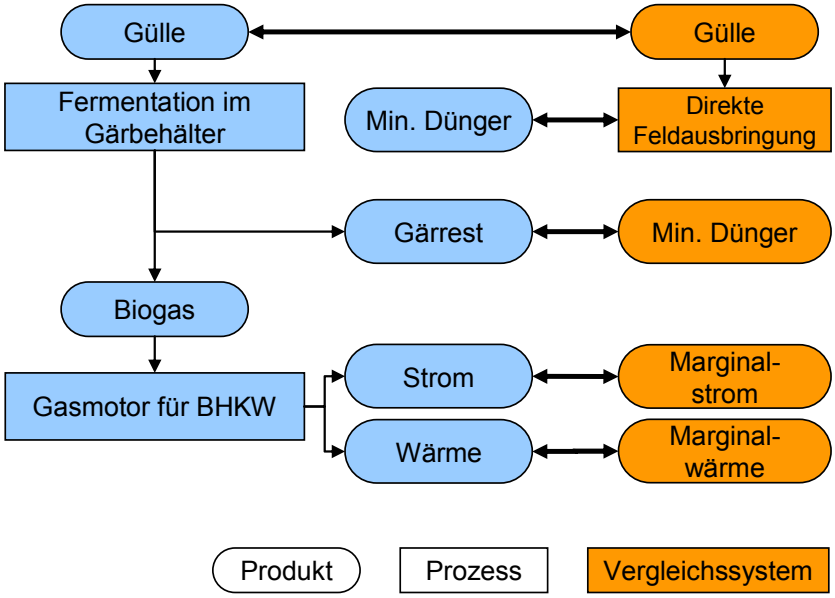


Abb. 2-3 Schematischer Lebenswegvergleich der Biogasproduktion und -nutzung aus Gülle

Maissilage als Substrat

Eine 100%ige Vergärung von Anbaubiomasse stellt gegenüber einer 100%igen Vergärung von Gülle das andere Extremum dar. Der Vorteil von beispielsweise Maissilage als Substrat zur Biogaserzeugung ist der gegenüber Gülle deutlich höhere Energieertrag pro Kilogramm. Daher muss weniger Substrat in einer Anlage eingesetzt werden und so können die Transportwege kurz gehalten werden.

Die ökologischen Auswirkungen des Maiseinsatzes werden auch durch die Wahl des Äquivalenzprozesses im Vergleichssystem bestimmt. Mais kann auf Bracheflächen angebaut werden, daneben sind aber auch Fälle bekannt, in denen aufgrund Flächenknappheit auch Grünland umgebrochen wird, was aus Gründen des Umwelt- und Naturschutzes zu vermeiden ist (siehe auch Kap. 3.2). In Abb. 2-4 ist ein einfacher Lebensweg der Verarbeitung von Mais zu Biogas dargestellt.

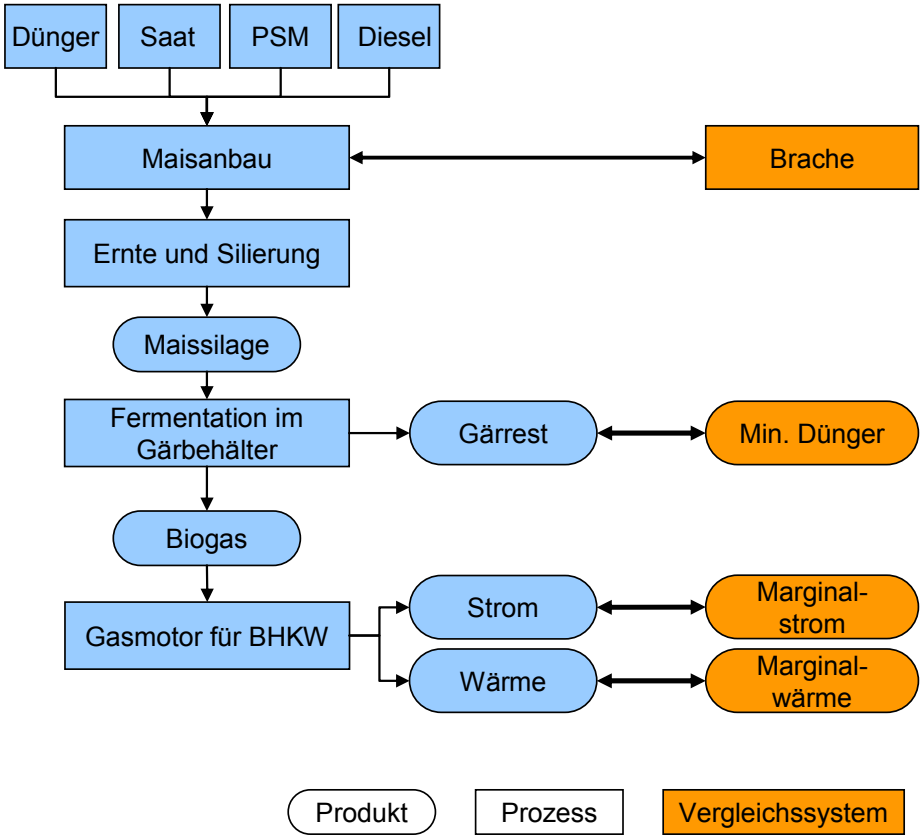


Abb. 2-4 Schematischer Lebenswegvergleich der Biogasproduktion und -nutzung aus Maissilage

2.2.3 Substrate zur Biogaserzeugung

Zur Biogaserzeugung können unterschiedliche Substrate verwendet werden. Im Folgenden werden die Substrate beschrieben, die in dieser Studie betrachtet werden. Deren Kenndaten sind in Tab. 2-2 aufgeführt.

Tab. 2-2 Kenndaten untersuchte Substrate

Substrat	Ernteertrag[1] [t FM / (ha·a)]	Wassergehalt [%]	Biogasertrag [GJ / t Substrat]	N-Gehalt [t N / t FM]	Ammonium-gehalt [t NH_4 / t FM]	P-Gehalt [t P_2O_5 / t FM]	K-Gehalt [t K_2O / t FM]
Rindergülle	–	91,5	0,5	0,40 %	0,25 %	0,16 %	0,59 %
Schweinegülle	–	94,0	0,6	0,48 %	0,33 %	0,36 %	0,24 %
Hühnermist	–	68,0	1,7	1,73 %	0,12 %	0,84 %	0,96 %
Rinderfestmist	–	85,0	1,0	0,39 %	0,19 %	0,08 %	0,53 %
Maissilage	44	67,0	3,6	0,38 %	0,06 %	0,36 %	0,90 %
Grassilage	40	70,0	2,8	0,45 %	0,02 %	0,18 %	1,07 %
Roggenkorn	5	14,0	12,2	2,40 %	0,00 %	0,80 %	0,60 %
Getreide-GPS	31	67,5	3,2	0,34 %	0,07 %	0,23 %	0,49 %

[1] Silierungsverluste 10 %

In Tab. 2-3 sind die Kenndaten der Gärreste verschiedener Substrate aufgelistet.

Tab. 2-3 Kenndaten Gärreste (alle Angaben beziehen sich auf Feuchtmasse)

Substrat	Gärrest-Menge [t / t Substrat]	N-Gehalt [t N / t Gärrest]	Ammoniumgehalt [t NH_4 / t Gärrest]	P-Gehalt [t P_2O_5 / t Gärrest]	K-Gehalt [t K_2O / t Gärrest]
Rindergülle	0,97	0,37 %	0,28 %	1,90 %	6,94 %
Schweinegülle	0,97	0,44 %	0,35 %	6,00 %	4,00 %
Hühnermist	0,91	1,71 %	0,22 %	2,62 %	3,00 %
Rinderfestmist	0,95	0,37 %	0,32 %	0,56 %	3,52 %
Maissilage	0,78	0,44 %	0,11 %	0,43 %	2,72 %
Grassilage	0,82	0,49 %	0,03 %	0,60 %	3,46 %
Roggenkorn	0,27	8,02 %	2,10 %	0,93 %	0,70 %
Getreide-GPS	0,81	0,38 %	0,13 %	0,71 %	1,52 %

Tab. 2-4 zeigt die zugrunde gelegten Werte für den pflanzenverfügbaren Stickstoff sowie die Emissionen, die aus dem Gärrestlager und dem Vorlager bei verschiedenen Substraten entstehen. Falls die Emissionen nicht bei allen Substraten auftreten, so ist das mit hochgestellten Zahlen gekennzeichnet.

Tab. 2-4 Emissionsfaktoren

	Vorlager	Fermenter		Gärrestlager[a]		Pflanzenverfügbarer Stickstoff		Ausbringung[b]	
Substrat	Emiss. ggü. Lagerung Rohgülle [% NH_3, CH_4, N_2O]	Ammoniumanreicherung [kg NH_4 Gärrest/ kg NH_4 Substrat]	Stickstoffverlust durch Fermentation [kg N / kg N Substrat]	Ammoniakemissionen [kg NH_3-N / kg NH_4-N]	Lachgasemissionen [kg N_2O-N / kg N]	Vergorenes Substrat [kg N / kg N_{org}]	Rohsubstrat [kg N / kg N_{org}]	Ammoniakemissionen unvergorener Gülle [kg NH_3-N / kg NH_4-N]	Ammoniakemissionen vergorener Gülle [% NH_3 aus unverg. Gülle]
Meiste Substrate	10 %	180 %	10 %	13,5 %	0,1 %	23,6 %	22,5 %	46 %	80 %
Ausnahmen		119 %[1], 116 %[2]	–	18,0 %[2]	2,0 %[3]	19,6 %[3]	31,3 %[3]	21 %[2]	80 %

[1] Rindergülle, [2] Schweinegülle, [3] Festmist

[a] Werte für offenes Gärrestlager

[b] Ausbringung mit Breitverteiler, Einarbeitung nach 24 h

Gülle

In Deutschland werden zur Biogasproduktion Rinder- und Schweinegülle eingesetzt. Details zum Einsatz von Rindergülle finden sich in Kap. 2.2.2. Schweinegülle unterscheidet sich in ihrer Zusammensetzung von Rindergülle. Sie ist dünnflüssiger als Rindergülle und weist

andere Nährstoffgehalte auf (siehe Tab. 2-2), so dass die ökologischen Auswirkungen aus der Biogasproduktion und -nutzung bei Rinder- und Schweinegülle unterschiedlich ausfallen können.

Anbaubiomasse

Neben Mais bieten sich weitere Biomassearten zur Biogaserzeugung an. Besonders gut eignen sich Pflanzen mit hohem Biomasseertrag, geringem Lignin- und Cellulosegehalt und hohem Zucker- und Stärkeertrag. In dieser Studie werden neben der Maissilage auch die in der Praxis eingesetzten Substrate Grassilage, Getreide-Ganzpflanzensilage (Getreide-GPS) und Roggenkorn betrachtet. Wie schon in Kapitel 2.2.2 erwähnt, werden diese Substrate nicht oder nicht immer in Monovergärung zur Biogasproduktion eingesetzt. Um hier den wissenschaftlichen Bezug zum einzelnen Substrat zu bekommen, werden diese Substrate jeweils dennoch für sich genommen (sozusagen in Monovergärung) untersucht. Die stoffliche Zusammensetzung jedes Substrats beeinflusst das Biogaspotenzial. Gras hat den Vorteil, dass es preisgünstiger ist als Mais. Allerdings sind die Energieerträge von Gras flächen- und massenbezogen geringer. Für Getreide-Ganzpflanzensilage wurden repräsentativ Getreide-GPS-Mischungen gewählt. Da die Kenndaten verschiedener Getreide-GPS-Arten sehr ähnlich sind, ergäbe eine feinere Differenzierung keinen weiteren Erkenntnisgewinn.

Substratmischungen

In der Praxis findet, wie bereits erwähnt, oft eine Co-Fermentation statt, in der mehrere Substanzen zusammen vergoren werden. So wirkt beispielsweise die Beimischung von Gülle zu Energiepflanzen prozessstabilisierend. Betrachtet werden in dieser Studie Substratmischungen von jeweils einer der verschiedenen untersuchten Anbaubiomassen mit Rindergülle, von denen die Energiepflanze und die Gülle jeweils 50 % des produzierten Biogases liefern, sowie unterschiedliche Mischungen von Rindergülle mit verschiedenen Festmistarten, wie in Tab. 2-5 aufgelistet.

Tab. 2-5 Betrachtete Substratmischungen, massen- und energiebezogene Anteile

Masse der Rindergülle	Masse des Co-Substrats	Energieanteil des Co-Substrats
88 % Rindergülle	12 % Maissilage	50 %
85 % Rindergülle	15 % Grassilage	50 %
87 % Rindergülle	13 % Getreide-GPS	50 %
96 % Rindergülle	4 % Roggenkorn	50 %
78 % Rindergülle	22 % Hühnermist	50 %
10 % Rindergülle	90 % Rinderfestmist	95 %

Gülleerschließung

Im Rahmen des Projektes wurde Gülle als besonders erschließungswürdig identifiziert. Geeignet und ggf. wirtschaftlich sind hierzu kleine Gemeinschaftsanlagen (100 kW_{el}) und Kleinstanlagen (30 kW_{el}) (s. Materialband B und O, PG Biogas 2008). Für diese Varianten werden nun in dieser Studie auch die ökologischen Auswirkungen untersucht. Zwei Aspekte stehen dabei im Vordergrund: die Substratzusammensetzung und verschiedene Transportszenarien, wie in Tab. 2-6 dargestellt.

Tab. 2-6 Verschiedene Anlagenkonzepte zur Gülleerschließung

Substratmix	Variante	Anlagenkonzept
100 % Gülle	a	Einzelanlage, reine Gülleanlage, 30 kW_{el}
100 % Gülle	b	Gemeinschaftsanlage, 4 Landwirte, 5 km Transportentfernung der Gülle zur Biogasanlage, Transportkosten für 75 % der Gülle (3 Landwirte stellen je 25 % der Güllemenge), 100 kW_{el}
100 % Gülle	c	Gemeinschaftsanlage, 3 Landwirte, 5 km Transportentfernung der Gülle zur Biogasanlage, Transportkosten für 50 % der Gülle (2 Landwirte stellen je 25 % der Güllemenge), 100 kW_{el}
75 %Gülle / 25 % Grünschnitt	d	Gemeinschaftsanlage, 3 Landwirte, 5 km Transportentfernung der Gülle zur Biogasanlage, Transportkosten für 50 % der Gülle (2 Landwirte stellen je 25 % der Güllemenge), 100 kW_{el}

Bioabfall als Substrat

Neben den zuvor beschriebenen Substraten, die typischerweise in der Landwirtschaft anfallen und in landwirtschaftlichen Biogasanlagen eingesetzt werden, sind auch kommunale organische Abfälle für eine Vergärung geeignet, insbesondere Bioabfall aus Haushalten (v. a. Küchen- und Speiseabfälle, daneben auch krautige Grünabfälle). Die in Deutschland getrennt erfassten Bio- und Grünabfälle werden derzeit nur zu etwa 10 % über eine Vergärung – überwiegend in Monobioabfallvergärungsanlagen – genutzt, der Großteil der Abfälle wird ausschließlich stofflich über eine Kompostierung verwertet. Eine kombinierte stoffliche und energetische Nutzung ist grundsätzlich möglich (s. Materialband B, PG Biogas 2008). Die ökologischen Auswirkungen der durchschnittlichen Behandlung getrennt erfasster Bioabfälle wurden gegenüber einer optimierten Vergärung untersucht. Für die optimierte Vergärung wurde dabei davon ausgegangen, dass die monovergorenen Bioabfälle vollständig in geschlossenen Anlagen nachkompostiert werden. Die Anwendung der so erzeugten kompostierten Gärreste wurde gegenüber der derzeit üblichen Praxis der Anwendung von Fertigkompost nicht variiert (rund 49 % Landwirtschaft und Obstbau, 28 % Hobbygarten- sowie Garten- und Landschaftsbau, 10 % Erwerbsgartenbau und Substraterzeugung in Erdenwerken, 13 % Rekultivierung). Hier bestünde grundsätzlich ein weiteres Optimierungspotenzial durch verstärkte Vermarktung der Komposte in Richtung Torfsubstitution. Für die Vergärung und Biogasnutzung selbst wurde im optimierten Fall von diffusen Methanemissionen aus der Biogasanlage von 0,5 % ausgegangen, das BHKW wurde mit Oxidationskatalysator angesetzt, für die erzeugte Überschusswärme wurde eine 80%ige Nutzung unterstellt. Als Vergleichssysteme für die erzeugte Energie wurde analog dem Basisszenario die Strom- und Wärmebereitstellung nach der Marginalbetrachtung zugrunde gelegt.

Biogaserzeugung aus Zweikultur- und Mischkulturanbau

In verschiedenen Studien wurden bereits ökobilanzielle Untersuchungen zum Zweikultur- und Mischkulturanbau durchgeführt. So beispielsweise im „Stoffstromprojekt“ (Öko-Institut et al. 2004). Des Weiteren wurde in der FNR Ökobilanz NawaRo (IE 2006) als Modellfall ein Zweifruchtanbau untersucht, und zwar Maissilage kombiniert mit Roggenganzpflanzensilage. Silomais wird dabei direkt nach einer frühen Ernte der Winterroggensilage ausgesät (Modellfall „RSMS“). Im Ergebnis zeigt sich diese Variante gegenüber den ebenfalls untersuchten Einzelsubstraten ökologisch ungünstiger, der erreichte Mehrertrag durch den Zweifruchtan-

bau reicht gegenüber den höheren Aufwendungen für den Anbau beider Früchte nicht für eine Besserstellung aus.

Im Rahmen des Biogasprojektes wurde der Austausch mit laufenden Forschungsprojekten gesucht, um ggf. neue Erkenntnisse ökobilanziell bewerten zu können. Nach Rückmeldung aus einem der umfassendsten laufenden Forschungsprojekte, EVA, liegen derzeit (Stand Januar 08) noch keine belastbaren Erkenntnisse für Zweikultur- und Mischkulturanbau vor bzw. sind bisher keine klaren Tendenzen erkennbar (EVA laufend). So sind z. B. Mischkulturen teils nur auf begrenzten Standorten möglich, teilweise ergeben sich sehr geringe spezifische Erträge. Insofern sind bisher nur standortspezifische Optimierungen und qualitative Bewertungen möglich. Die bisherigen Erkenntnisse aus laufenden Untersuchungen ergeben daher noch keine belastbare Datenbasis für eine neue ökobilanzielle Bewertung von einem Zweikultur- und Mischkulturanbau.

2.2.4 Anlagenspezifische Variationen

Aufgrund unterschiedlicher Nutzungsmöglichkeiten des Biogases und der unterschiedlichen technischen Ausstattung der Anlagen ergibt sich eine Vielzahl an Variationen der Biogasproduktion und -nutzung. In den folgenden Unterkapiteln wird vorgestellt, welche Variationen gegenüber dem Basisszenario in dieser Studie näher betrachtet werden.

Emissions-Optimierungspotenzial

Um die hohen Methan- und vor allem Ammoniakemissionen zu senken, sind Optimierungen möglich. Es werden zwei Bereiche der Biogasproduktion näher untersucht, in denen die bedeutendsten Spielräume für Optimierungen bestehen: das Gärrestlager und die Ausbringung des Gärrestes.

a) Lagerung der Gülle und des Gärrests

Bevor Gülle in der Biogasanlage eingesetzt werden kann, wird sie in einem Pufferlager, dem so genannten Vorlager, aufbewahrt. Der Gärrest, der nach Erzeugung des Biogases aus Gülle oder Anbaubiomasse im Fermenter anfällt, muss vor der Ausbringung auf das Feld wegen eingeschränkter Ausbringungsperioden ebenfalls gelagert werden. Dies geschieht in so genannten Gärrestlagern. Die Lagerung im Vorlager sowie im Gärrestlager erfolgt häufig in Behältern ohne Abdeckung oder ohne gasdichte Abdeckung. Dadurch kommt es v. a. zu signifikanten Ammoniak- und Methanemissionen. In Ermangelung belastbarer Messdaten wird zugrunde gelegt, dass im Vorlager 10 % der Emissionen entstehen, die üblicherweise bei der Lagerung der Gülle zur Direktausbringung anfallen. Im Gärrestlager dagegen liegen die Methanemissionen bei einer Bandbreite von 2,5 % bis 15 % des produzierten Biogas-Methans (FNR 2005). Im Basisszenario wurde von einem offenen Gärrestlager mit 2,5 % Methanemissionen ausgegangen, als Variante wurden für eine Abschätzung hoher Emissionen 15 % angesetzt. Durch eine gasdichte Abdeckung mit Restgasnutzung können Methanemissionen vermieden werden. In Anlehnung an (Emission Inventory Guidebook) wird davon ausgegangen, dass dadurch die Ammoniak- und Lachgasemissionen auf 10 % gesenkt werden. Methan wird komplett der Nutzung zugeführt. Daher wird in Variation vom Basisszenario, der von offenen Gärrestlagern ausgeht, aufgezeigt, welche ökologischen Folgewirkungen sich aus einer gasdichten Abdeckung des Vorlagers und des Gärrestlagers für Rindergülle und Maissilage ergeben.

b) Ausbringung des Gärrestes

Nicht nur bei der Lagerung, sondern auch bei der Ausbringung des Gärrestes entstehen Klimagas- und Luftschadstoff-Emissionen, insbesondere durch Lachgas und Ammoniak. Hier kommt es vor allem auf den Zeitpunkt und die Art der Ausbringung und der Einarbeitung an. Die Einarbeitung sollte möglichst schnell erfolgen, um hohe lokale Ammoniakemissionen zu vermeiden. Die Düngeverordnung schreibt bei Ausbringung auf unbewachsenem Acker eine unverzügliche Einarbeitung vor (DüV 2007), in der Praxis erfolgt diese typischerweise nach der Ausbringung mit Breitverteiler innerhalb eines Tages (UBA/BMVEL 2002). Dies kann aber bereits zu Schäden an der Vegetation führen. Eine Einarbeitung innerhalb einer Stunde könnte die Emissionen um 80 % senken (UBA/BMVEL 2002). Bei Ausbringung auf bewachsenem Acker, bei der eine Einarbeitung aufgrund des Pflanzenbewuchses nicht möglich ist, sind aus ökologischer Sicht emissionsmindernde Techniken zu begrüßen, wie z. B. die Ausbringung mit Schleppschlauch. Allerdings ist die Ausbringung durch Schleppschlauch wesentlich teurer als durch Breitverteiler und daher oft für Einzelbetriebe ökonomisch unrentabel.

Andere Ausbringtechniken wie der Schleppschuh oder Injektionsverfahren sind wenig empfehlenswert. Das Injektionsverfahren kann nur auf unbewachsenem Acker eingesetzt werden und hat in etwa die gleiche Minderung an Ammoniakemissionen wie nach Ausbringung mit Breitverteiler und Einarbeitung nach 1 h. Gleichzeitig erhöhen sich dadurch allerdings die Lachgasemissionen. Das Schleppschuhverfahren wird überwiegend auf Grünland eingesetzt, ist aber wenig verbreitet und noch teurer als der Schleppschlauch, bei gleichem Minderungserfolg. Im Basisszenario werden eine Ausbringung mit einem Breitverteiler und eine Einarbeitung nach 24 Stunden als typischer Wert angesetzt. In weiteren Variationen werden eine Einarbeitung nach sechs Stunden sowie nach einer Stunde und die Ausbringung mit Schleppschlauch ohne Einarbeitung untersucht. Die Auswirkungen durch das Injektionsverfahren und die Ausbringung mit Schleppschuh werden nicht quantifiziert. Gegebenenfalls können dem Gärrest für die Ausbringung auch Nitrifikationshemmer zugefügt werden, um Stickstoffverluste zu minimieren. Dies ist in der Praxis bisher nur mit Mineraldüngern erprobt, dabei werden Lachgasemissionen vermindert (Leick 2003).

Anlagengröße

Ob die Anlagengröße Einfluss auf die ökologische Vorteilhaftigkeit hat, soll durch einen Vergleich verschiedener Anlagengrößen gezeigt werden. So werden dem für das Basisszenario gewählten 500 kW_{el}-BHKW Anlagengrößen von 100 kW_{el}, 1 und 2 MW_{el} gegenübergestellt. Größere Anlagen können in der Regel effizienter betrieben werden, benötigen aber höhere Substratmengen, die aus größerer Entfernung antransportiert werden müssen. Dies hat allerdings einen geringen Einfluss auf die Bilanzergebnisse und ist aus Konsistenzgründen hier nicht berücksichtigt (Transportentfernungen: Gülle 5 km, Anbaubiomasse 20 km, Gärrest 20 km). Zudem wird bei größeren Anlagen (ab 1,5 MW_{el}) von einer besseren Ausstattung der Bauteile ausgegangen, wodurch es z. B. zu geringeren diffusen Methanemissionen kommt (Öko-Institut et al. 2004). Für die 2 MW_{el}-Anlage wurden diffuse Methanemissionen aus der Biogasanlage von 0,45 % bezogen auf die produzierte Methanmenge angenommen, bei Anlagen < 1,5 MW_{el} wie im Basisszenario 1 %. Zudem wird angenommen, dass BHKWs großer Anlagen (2 MW_{el}) mit einem Oxidationskatalysator ausgestattet sind und somit kaum noch Restmethanemissionen aufweisen (dagegen die kleineren Anlagen wie im Basisszenario Gasmotor-BHKW ohne Abgasreinigung 0,5 % Methanschlupf). Darüber hinaus

wird auch ein Hochtemperatur-Brennstoffzellen-BHKW betrachtet. Bei allen Anlagen wird von einer 20%igen Wärmenutzung ausgegangen.

Deckung des Energieeigenbedarfs der Biogasanlage

Der Energieeigenbedarf der Biogasanlage muss gedeckt werden. In der ökobilanziellen Betrachtung erfolgt dies im Basisszenario über die im BHKW erzeugte Energie.. In Tab. 2-7 ist dargestellt, wie hoch der Energieeigenbedarf bei Biogasanlagen mit nachwachsenden Rohstoffen, Gülle oder Bioabfall als Substrat liegt. Diese auf die erzeugte Energie bezogenen prozentualen Werte gelten unabhängig von der Anlagengröße.

Tab. 2-7 Energieeigenbedarf nach Substratart

	NawaRo-Anlage	Gülleanlage	Bioabfallanlage
Stromeigenbedarf *	10 %	10 %	20 % *(Literatur: 20-40 %)*
Wärmeeigenbedarf *	20 %	30 %	25 % *(Literatur: 20-30 %)*

* bezogen auf erzeugten Strom/erzeugte Abwärme aus dem BHKW

2.2.5 Nutzung des Biogases und Gutschriften

Das Biogas kann auf verschiedene Art und Weise genutzt werden. Jede Nutzungsvariante hat andere ökologische Auswirkungen. Im Folgenden werden mehrere Nutzungsmöglichkeiten des Biogases präsentiert.

a) Wärmenutzung aus Biogas-BHKW

In der Nähe einer Biogasanlage kann die Wärme oft nicht komplett genutzt werden. Dazu kommt, dass im Sommer mehr Wärme zur Verfügung steht, da der Fermenter weniger beheizt werden muss. Unter Wärme wird immer die Überschusswärme verstanden, d. h. jegliche Wärmenergie, die für den Fermentationsprozess nötig ist, wurde bereits abgezogen. Im Basisszenario wurde zugrunde gelegt, dass die Wärme lediglich zu 20 % genutzt wird. Es kann allerdings auch der Fall sein, dass die Wärme überhaupt nicht benötigt wird. Im günstigsten Fall können mit der Wärme große Verbraucher beliefert werden, beispielsweise kann ein Schwimmbad beheizt werden, so dass ein Großteil der Wärme, z. B. 80 %, genutzt wird. Diese Varianten einer 0%igen und 80%igen Wärmenutzung werden ebenfalls betrachtet. In einer weiteren Variante werden die ökologischen Auswirkungen untersucht, wenn aus der Überschusswärme in ORC-Anlagen Strom erzeugt wird.

b) Fossile Äquivalente zu Standard-BHKW

Entscheidend ist in einer Ökobilanz mit Gutschriftenverfahren auch, welcher Äquivalenzprozess bzw. welches Vergleichssystem gewählt wird. Je umweltschädlicher im Äquivalenzprozess produziert wird, desto besser schneidet der betrachtete Bioenergieträger ab. Im Basisszenario wird durch die Strom- und Wärmeproduktion aus Biogas die Strom- und Wärmeerzeugung nach Marginalbetrachtung ersetzt. Strom wird danach zu 70 % aus Steinkohle und zu 30 % aus Erdgas erzeugt, Wärme zu 57 % aus Erdgas und 43 % aus Heizöl (s. Kap. 2.3.2). In einer Variante soll untersucht werden, wie es sich auf die Bilanzergebnisse auswirkt, wenn stattdessen der durchschnittliche deutsche Strommix als Äquivalenzprozess

gewählt wird und für die Wärme die durchschnittliche Wärmeerzeugung für Hausheizungen gegenübergestellt wird.

c) Sensitivitätsanalyse: Gasmotor vs. Zündstrahlmotor

Seit 2004 werden in Biogasanlagen häufiger Gasmotoren als Zündstrahlmotoren eingesetzt. Ökologisch hat das Folgen, da die Gasmotoren einen nur halb so großen Methanschlupf aufweisen wie die Zündstrahlmotoren (s. Materialband D, PG Biogas 2008). Die ökologischen Auswirkungen werden durch einen Vergleich beider Varianten aufgezeigt. Dabei wird beim Zündstrahlmotor zusätzlich zwischen einem Betrieb mit Dieselkraftstoff oder Biodiesel für die Anfahr-, Zünd- und Stützfeuerung unterschieden.

2.2.6 Biogasaufbereitung auf Erdgasqualität

Im Basisszenario wird Biogas produziert und in einem BHKW zur Strom- und Wärmeproduktion eingesetzt, mit dem vorrangigen Ziel der Stromproduktion, da eine Einspeisung dieses Stroms in das Stromnetz durch das EEG vergütet wird (EEG 2006). Es gibt aber auch die Möglichkeit, das Biogas auf Erdgasqualität (Biomethan) aufzubereiten und ins Erdgasnetz einzuspeisen. Eine Aufbereitung des Biogases zu Biomethan erfordert eine Behandlung des Gases, die das Kohlendioxid und andere unerwünschte Begleitstoffe entfernt. Um dies zu erreichen, gibt es verschiedene Verfahren der Aufbereitung, die sich hinsichtlich ihrer Aufwendungen unterscheiden: Druckwechseladsorption, Druckwasserwäsche oder Aminwäsche (s. Materialband D, PG Biogas 2008). Alle Verfahren erfordern einen zusätzlichen Energieinput, der aus verschiedenen Quellen stammen kann.

Die einzelnen Reinigungsverfahren werden daher für die Anlagengröße im Basisszenario (500 kW_{el}) hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen bewertet, wobei ebenfalls wie im Basisszenario ein offenes Gärrestlager angesetzt wird, da dies teilweise auch bei in Betrieb befindlichen Anlagen gegeben ist. In einer weiteren Variante wird zudem der Stand der Technik mit gasdichter Abdeckung von Vorlager und Gärrestlager inklusive Restgasnutzung sowie optimierter Aufbereitung abgebildet.

Der Energieeigenbedarf der Biogasanlage muss in diesem Fall auf andere Art gedeckt werden als im Basisszenario (s. Kap. 2.2.4), da das Biogas vollständig der Aufbereitung zugeführt wird. Diese Energie sowie die Energie für die Aufbereitungsverfahren kann auf unterschiedliche Art bereitgestellt werden: Im EEG (2008) wird für die gesamte Prozesswärme eine regenerative Bereitstellung gefordert. Um den Unterschied zu einer fossilen Bereitstellung zu zeigen, wird in einer Variante der Energiebedarf aus dem deutschen Strommix und einem Erdgas-Heizwerk, in einer anderen Variante aus dem deutschen Strommix und einem Holz-Heizwerk gedeckt (regenerative Energie). Da der Installationsort eines Biomethan-BHKWs unabhängig von anfallenden Biogassubstraten ist und daher eine vollständige Nutzung der anfallenden Wärme oft einfacher ist als bei Biogas-BHKWs, wird für die Nutzung des Biomethan als Basis ein BHKW von 500 kW_{el} Leistung mit 100%iger Wärmenutzung und Oxidationskatalysator (geringe Methan- und Kohlenwasserstoffrestemissionen) eingesetzt. Die 100%ige Wärmenutzung ist dabei als maximal erreichbarer Wert einzustufen, da sie in der Realität nicht immer stattfindet.

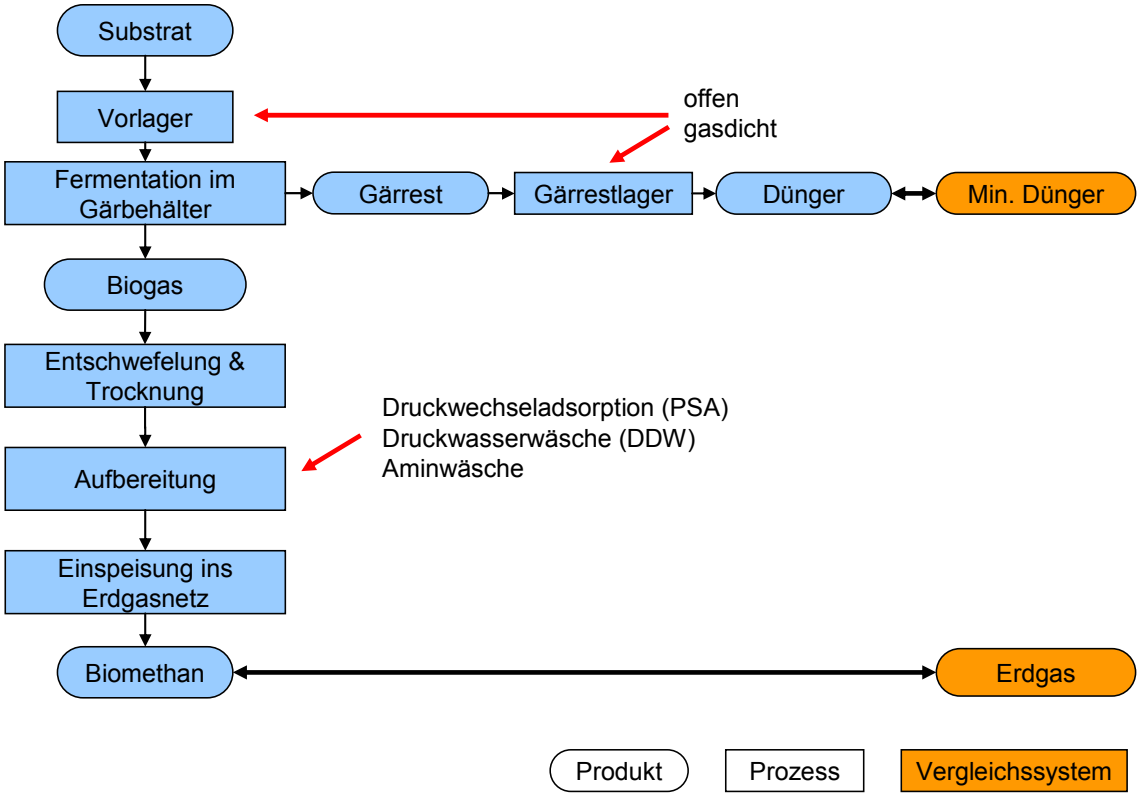


Abb. 2-5 Schematischer Lebenswegvergleich der Biogaserzeugung und Aufbereitung auf Erdgasqualität und Erdgassubstitution als Vergleichssystem

„Best practice"-Fall

Zusätzlich wird noch ein „Best-Practice"-Fall betrachtet. Diesem liegen Werte zugrunde, die von Experten als „machbares Potenzial" angegeben wurden (siehe Tab. 2-8). Die einzelnen Optimierungsaspekte beziehen sich dabei auf die Biogasproduktion.

„Best practice" beinhaltet über gasdichte abgedeckte Gärrestlager mit Restgasnutzung und geringe Methanemissionen der Aufbereitung (Stand der Technik) hinaus folgende Optimierungen:

1. Verluste durch Silierung 5 % statt 10 %
2. Gasertrag Silomais 200 m³/t Frischsubstanz statt 185 m³/t
3. Düngegutschrift für Stickstoff im Gärrest (aus Silomais) doppelt so hoch, wegen höherem Ammoniumgehalt und Pflanzenverfügbarkeit des Ammonium von 100 %.
4. Lachgasemissionen abweichend von IPCC nach Untersuchungen in Deutschland (Wulf 2002) 0,5 % statt 1 % des ausgebrachten Stickstoffs; zusätzlich Minimierung der Lachgasemissionen bei Ausbringung um 50 % durch Einsatz von Nitrifikationshemmern in Anlehnung an (Leick 2003)
5. Methanemissionen Biogasproduktion 0,5 % statt 1 % und BHKW mit Oxidationskatalysator
6. Bei Aufbereitung auf Erdgasqualität Einsatz regenerativer Prozesswärme

Tab. 2-8 Werte zu Basis- und „Best-Practice“-Fall (Substrat: Maissilage)

	Verluste durch Silierung	Gasertrag	Düngegutschrift Stickstoff im Gärrest	N_2O-Verluste bei Ausbringung	Methanemissionen
Standard	10 %	185 m³	10 % NH_4-N	1 %	1 % aus Anlage, BHKW mit Oxikat
Best Practice[1]	5 %	200 m³	20 % NH_4-N,	0,25 %	0,5 % aus Anlage, BHKW mit Oxidationskatalysator

[1] Quelle: IFEU 2008

Nutzungsarten des eingespeisten Biomethans

Das erzeugte Biomethan kann auf unterschiedliche Weise genutzt werden. Folgende Varianten der Nutzung werden in dieser Studie hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen untersucht:

Zum einen wird der direkte Ersatz von Erdgas durch Biomethan sowie der Ersatz von Marginalstrom und -wärme in BHKWs mit den Anlagengrößen 100 kW_{el}, 500 kW_{el} und 1 MW_{el} mit jeweils 100%iger Wärmenutzung betrachtet. Die 100%ige Wärmenutzung entspricht einer Maximalabschätzung, in der Praxis sind eher niedrigere Wärmenutzungsgrade gegeben. Neben dem Einsatz in BHKWs wird zudem ein Einsatz in einem Gas-und-Dampf- (GuD)-Kombikraftwerk betrachtet.

Zum anderen wird der Einsatz von Biomethan als Kraftstoff anstelle von Benzin untersucht. Das Biomethan kann wie Erdgas in bi- oder monovalenten Fahrzeugen eingesetzt werden. Erstere können sowohl mit Benzin als auch mit Erdgas bzw. Biomethan betankt werden, was dazu führt, dass der Motor an keinen der beiden Kraftstoffe optimal angepasst werden kann. Auch fällt ein höheres Fahrzeuggewicht an infolge der zwei erforderlichen Tanks. Die monovalenten Fahrzeuge dagegen sind auf reinen Erdgasbetrieb ausgelegt und haben lediglich einen kleinen Nottank für Benzin. Monovalente CNG-Fahrzeuge können Benzin energieäquivalent ersetzen, während bei bivalenten Fahrzeugen durch die schlechte Motoranpassung Wirkungsgradverluste von 10-20 % gegeben sind (ÖVK 2007).

2.3 Methodische Festlegungen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten methodischen Festlegungen detailliert beschrieben.

2.3.1 Betrachtete Umweltwirkungen

Zunächst werden die in dieser Studie bilanzierten Umweltwirkungen näher erläutert, deren zugehörige Indikatoren, Sachbilanzgrößen und Äquivalenzfaktoren in Tab. 2-9 dargestellt sind.

- **Energieeinsparung**: Energieverbrauch bzw. -einsparung ist ein Indikator der Ressourcenbeanspruchung. In dieser Studie dargestellt sind die nicht-erneuerbaren Primärenergieträger Erdöl, Erdgas und Kohle sowie Uranerz. Im Folgenden wird diese Umweltwirkung der besseren Begrifflichkeit wegen mit „Energieeinsparung“ bezeichnet und in dieser Studie in MJ Primärenergie angegeben.
- **Treibhauseffekt**: Bezeichnet die Erwärmung der Atmosphäre in Folge der vom Menschen verursachten Freisetzung von klimawirksamen Gasen. In Ökobilanzen wird nur der anthropogene Treibhauseffekt betrachtet. Es werden Kohlendioxid (CO_2) aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern sowie Methan und Lachgas berücksichtigt. Alle Gase werden nach vorgegebenen Faktoren in CO_2-Äquivalente umgerechnet und in dieser Studie als kg CO_2-Äquivalente ausgewiesen.
- **Nährstoffeintrag**: Einbringung von einem Übermaß an Nährstoffen in Böden (terrestrische Eutrophierung) über die Luftschadstoffe Stickoxide und Ammoniak. Diese Luftschadstoffe werden mit Äquivalenzfaktoren in PO_4-Äquivalente umgerechnet und in dieser Studie in g PO_4-Äquivalente angegeben.
- **Versauerung**: Verschiebung des Säuregleichgewichts in Böden und Gewässern durch den Eintrag der Säure bildenden Luftschadstoffe Schwefeldioxid, Stickoxide, Ammoniak und Chlorwasserstoff in Böden und Gewässer (Stichwort „saurer Regen“). Auch diese Luftschadstoffe werden mit Äquivalenzfaktoren umgerechnet und in dieser Studie als g SO_2-Äquivalente ausgewiesen.
- **Ozonabbau**: Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre durch bestimmte Gase wie FCKW, die ein bestimmtes Ozonabbaupotenzial aufweisen und üblicherweise in FCKW-Äquivalenten angegeben werden (Stichwort „Ozonloch“). Auch Lachgas wirkt sich auf Veränderungen in der Ozonschicht aus, es existiert aber noch kein Äquivalenzfaktor zur Konvertierung in FCKW-Äquivalente, da unklar ist, in welchem Maße eine Wirkung besteht. Zwar hat Lachgas (N_2O) durch Einbindung in molekulare Mechanismen auf das stratosphärische Ozon einen Einfluss, es besteht aber bisher kein wissenschaftlicher Konsens, inwieweit es den Ozonabbau fördert oder verlangsamt. Da FCKW bei der Biogasproduktion und -nutzung nicht von Bedeutung sind, Lachgas dagegen in signifikanten Mengen emittiert wird, wird in dieser Studie als ozonrelevantes Gas nur direkt Lachgas (N_2O) (in g N_2O) betrachtet.
- **Fotosmog**: Bildung von so genannten Fotooxidantien wie z. B. Ozon unter dem Einfluss von Sonnenstrahlung in bodennahen Luftschichten (Stichwort „Ozonalarm“) durch Zusammenwirken mehrerer Faktoren, zu denen Sonneneinstrahlung, Stickoxide und ungesättigte Kohlenwasserstoffe gehören. Die Äquivalenzfaktoren zur Bewertung des Fotosmogs wurden in den letzten Jahren signifikant verändert. So wurde noch 2004 auch der Summenparameter NMVOC mit in die Bewertung einbezogen, während seit 2007 nur noch die Einzelsubstanzen betrachtet werden, da die Bewer-

tung des Summenparameters ohne hinreichendes Wissen über seine genaue Zusammensetzung unklar ist. Für die Einzelsubstanzen sind allerdings oft keine Daten vorhanden. Um die Umweltwirkung Fotosmog dennoch abbilden zu können, wird daher in dieser Studie auf die Werte von 2004 zurückgegriffen. Diese beinhalten zwar auch Äquivalenzfaktoren für NO und NO_2 (mit gegensätzlichem Vorzeichen), aber auch hier liegen in der Regel nur Daten zum Summenwert NO_X vor, der aufgrund der unterschiedlichen Vorzeichen nicht sinnvoll aufgelöst werden kann. Deswegen wird zur Bewertung der Stickoxide auf eine andere Methode zurückgegriffen und dem POCP noch das stickstoffkorrigierte Ozonbildungspotenzial NcPOCP gegenüber gestellt.

- **Humantoxizität:** Humantoxische Wirkung von Feinstaub (PM10) in der Luft, der durch direkte Emission oder über die Vorläufersubstanzen Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Ammoniak und Schwefeldioxid entstehen kann.

Tab. 2-9 Indikatoren, Sachbilanzgrößen und Äquivalenzfaktoren zu den untersuchten Umweltwirkungen

Umweltwirkung	Indikator	Sachbilanzgröße	Formel	Äquivalenzfaktor
Energieeinsparung[1]	Kumulierter Primärenergieaufwand aus erschöpflichen Quellen	Erdöl	—	—
		Erdgas		
		Steinkohle		
		Braunkohle		
		Uranerz		
Treibhauseffekt	CO_2-Äquivalent (Kohlendioxid-Äquivalent)	Kohlendioxid fossil	CO_2	1
		Lachgas (Distickstoffoxid)	N_2O	298
		Methan biogen	CH_4	25
		Methan fossil	CH_4	27,75
Nährstoffeintrag	PO_4-Äquivalent (Phosphat-Äquivalent)	Stickoxide	NO_X	0,13
		Ammoniak	NH_3	0,346
Versauerung	SO_2-Äquivalent (Schwefeldioxid-Äquivalent)	Schwefeldioxid	SO_2	1
		Stickoxide	NO_X	0,7
		Ammoniak	NH_3	1,88
		Chlorwasserstoff	HCl	0,88
Ozonabbau[2]	—	Lachgas (Distickstoffoxid)	N_2O	—
Fotosmog - POCP	C_2H_4-Äquivalent (Ethen-Äquivalent)	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe	NMHC	1
		Methan	CH_4	0,006
Humantoxizität	PM10-Äquivalent	PM10	PM10	1
		Schwefeldioxid	SO_2	0,54
		Stickoxide	NO_X	0,88
		Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe	NMHC	0,012
		Ammoniak	NH_3	0,64

Quellen: CML 2004, IPCC 2007, Klöpffer & Renner 1995, Leeuw 2002, IFEU auf der Basis von IPCC 2007

[1] Energieeinsparung bzw. -verbrauch sind Unterkategorien der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung. Beschrieben werden damit hier die nicht erneuerbaren Primärenergieträger Erdöl, Erdgas, Kohle und Uranerz.

[2] Ozonabbau wird üblicherweise in FCKW-Äquivalenten ausgedrückt. Für N_2O gibt es noch keine Bewertung seines Ozonabbaupotenzials, da unklar ist, in welchem Ausmaß es an den physikalisch-chemischen Prozessen in der Ozonschicht beteiligt ist. Da bei der Biogasproduktion nur N_2O als ozonrelevantes Gas anfällt, wird dieses hier bilanziert.

Den einzelnen Umweltwirkungen wurde im Ergebnisteil dieses Berichts unterschiedliches Gewicht gegeben. Eine ausgesprochen hohe Bedeutung wird in der Fachwelt und der Politik der Einsparung von Energie und Treibhausgasen zugeschrieben; der Nährstoffeintrag wird direkt von den bei der Biogasproduktion und Gärrestausbringung besonders stark auftretenden Ammoniakemissionen beeinflusst. Daher werden diese drei Umweltwirkungen in allen Einzeluntersuchungen dargestellt. Die Versauerung wird dort abgebildet, wo sie bedeutende Unterschiede gegenüber dem Nährstoffeintrag aufweist. Zum Ozonabbau, dem Fotosmog und der Humantoxizität finden sich bei der Beschreibung der Ergebnisse des Basisszenarios in Kap. 3.1 nähere Erläuterungen.

2.3.2 Energie aus Biogas: Wahl der Vergleichssysteme

Die Ökobilanznorm verlangt als Grundprinzip, dass in einem Prozess entstehende Nutzen durch Systemraumerweiterung ausgeglichen werden. Wird z. B. Strom erzeugt, dann muss das System um die Stromerzeugung aus einem anderen Prozess erweitert werden. Die Anrechnung erfolgt üblicherweise als Gutschrift, da dieser andere Prozess ersetzt wird. Dieser so genannte Äquivalenzprozess bildet entweder die ansonsten übliche Erzeugung von Strom ab (Durchschnittsbetrachtung) oder aber eine ganz bestimmte Erzeugungsart wie z. B. die Stromerzeugung ausschließlich aus fossilen Brennstoffen (Kohle, Erdgas), wenn eine hohe Wahrscheinlichkeit gegeben ist, dass genau diese ersetzt werden (Marginalbetrachtung). Für die Marginalbetrachtung wird hinterfragt, wie die Energieversorgungsunternehmen auf eine alternative Strombereitstellung aus Biogas reagieren würden. Mögliche Reaktionen sind je nach Umfang der bereitgestellten Strommenge, dass bestimmte Kraftwerke dafür weniger Strom produzieren (Teillastbetrieb) oder – langfristig und bei größeren Strommengen – bestimmte Kraftwerke abgeschaltet, stillgelegt oder nicht neu gebaut werden.

Wird in einem Prozess mehr als ein Nutzen erzeugt, wie z. B. neben Strom auch Wärme oder Düngemittel, dann müssen auch diese Nutzen durch Systemraumerweiterung ausgeglichen werden. Und auch hier kommen dafür als Äquivalenzprozesse entweder die sonst übliche durchschnittliche Erzeugung oder eine ganz bestimmte Erzeugung dieser Produkte in Frage.

Vorgehen in dieser Studie

In dieser Studie wurde die Gutschrift für die erzeugte Energie in erster Linie nach der Marginalbetrachtung verrechnet, da dies dem üblichen Vorgehen entspricht, wie in Deutschland die Treibhausgaseinsparungen durch Erneuerbare Energien ermittelt werden. Beschrieben ist diese Methode zur Anrechnung der eingesparten Treibhausgasemissionen in der BMU Broschüre „Erneuerbare Energien in Zahlen“ (BMU 2007a), die regelmäßig aktualisiert wird. Die beschriebene Vorgehensweise basiert auf einer Studie des Fraunhofer Instituts System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI 2005), in der untersucht wurde, in welchem Ausmaß verschiedene Erneuerbare Energien bei dem zurzeit vorhandenen Kraftwerkspark bzw. bei der üblichen Wärmeerzeugung konventionelle Energieträger ersetzen. Für die Stromerzeugung aus Biogas wird eine Brennstoffsubstitution von 70 % Steinkohle und 30 % Erdgas angegeben. Für die Wärmeerzeugung wird für alle Erneuerbaren Energien der ersetzte Wärmebereitstellungsmix mit 56,9 % Erdgas, 40,5 % Heizöl und 2,6 % Kohle angegeben. An dieser Stelle wird ohne relevante Auswirkungen auf die Ergebnisse die Vereinfachung getroffen, den Kohleanteil dem Heizölanteil zuzuschlagen.

Neben der Marginalbetrachtung wurde auch die Durchschnittsbetrachtung herangezogen und für den erzeugten Strom aus Biogas die in Deutschland übliche mittlere Stromerzeugung als Äquivalenzprozess (Gutschrift) angerechnet und für die erzeugte Wärme die mittlere in Deutschland übliche Wärmeerzeugung. Dabei unterscheidet sich die durchschnittliche Wärmeerzeugung nur wenig von der obigen Gutschrift nach Marginalbetrachtung, während die durchschnittliche Stromerzeugung sich davon abhebt, da sie nur zu rd. 62 % auf fossilen Brennstoffen basiert, daneben aber zu etwa 12 % aus Erneuerbaren Energien und ansonsten aus Kernkraft.

2.3.3 Bewertung der Nebenprodukte

Nicht immer ist eine Systemraumerweiterung für alle erzeugten Nutzen praktisch möglich. In diesen Fällen lässt die Ökobilanznorm auch die Methode der Allokation zur Anrechnung der Nutzen zu. Dies ist insbesondere dann möglich, wenn unterschiedliche Nutzen aus einem Prozess entstehen und für diese mehrere unterschiedliche Gutschriften in Frage kommen. Das Gesamtsystem kann in diesen Fällen sehr unüberschaubar werden, zudem können verschiedene Gutschriftsmöglichkeiten zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen. Aus Gründen der Transparenz und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse kann daher in solchen Fällen die Allokation anstatt der Systemraumerweiterung durch Gutschrift sinnvoll sein.

Dies ist z. B. der Fall bei den Treibhausgasbilanzen, die im Rahmen der Ermittlung von Default-Werten für die Biomassenachhaltigkeitsverordnung (BioNachV-Entwurf 2007) ermittelt wurden. Die BioNachV befasst sich im Speziellen mit der Erzeugung von Biokraftstoffen. Die dabei untersuchten Systeme sind von sehr vielen Nutzen gekennzeichnet für die auch mehrere Gutschriften in Frage kommen. Da die resultierenden Werte in einer Rechtsverordnung zur Anwendung kommen, ist hier aber ganz besonders wichtig, dass die Ergebnisse transparent, nachvollziehbar und damit rechtssicher sind. Deswegen wurde im Rahmen der BioNachV anstelle der Methode der Systemraumerweiterung durch Gutschrift die Methode der Allokation nach Energiegehalt angewendet.

Vorgehen in dieser Studie

Die in dieser Studie untersuchten Systeme der Biogaserzeugung und -nutzung sind dagegen weitgehend überschaubar und bis auf die zuvor beschriebenen unterschiedlichen Ansätze zur Anrechnung der erzeugten Energie auch in den Gutschriften weitgehend eindeutig. Insofern wurde in dieser Studie, entsprechend dem Grundprinzip der Ökobilanzen, die Methode der Systemraumerweiterung durch Gutschrift angewendet.

2.3.4 Berechnung der Klimagasemissionen

Das Konzept des Erderwärmungspotenzials, des „Global Warming Potential“ (GWP), wurde entwickelt, um die Fähigkeit verschiedener Gase, Energie in der Atmosphäre zurückzuhalten, zu vergleichen. Das GWP eines Treibhausgases basiert auf dieser Wärmeabsorptionsfähigkeit sowie der Verweildauer des Gases in der Atmosphäre im Vergleich zu Kohlendioxid, das als Referenz für alle anderen Treibhausgase dient (GWP = 1). Um den Beitrag von Treibhausgasen wie Methan und Lachgas zur Erderwärmung in Relation zum Kohlendioxid zu bestimmen, wird nach Konvention meist ein Zeitraum von 100 Jahren gewählt, innerhalb dessen die Gase ihr Treibhauspotenzial entfalten. Diese so genannten CO_2-Äquivalenzwerte werden durch das Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) vorgegeben. Das

IPCC ist ein internationales Fachgremium, das sowohl die Methode als auch die entsprechenden Kennzahlen für jede klimawirksame Substanz errechnet und fortschreibt. Die vom IPCC fortgeschriebenen Berichte sind grundsätzlich in Ökobilanzen als wissenschaftliche Grundlage zur Instrumentalisierung des Treibhauseffektes in ihrer jeweils neuesten Fassung heranzuziehen. Die aktuellen Äquivalenzfaktoren entsprechen dem Wissenstand der Forschung nach IPCC 2007.

Auch hiervon ist allerdings eine abweichende Bewertungsmöglichkeit gegeben. So wurde in der Klimarahmenkonvention nach dem Kyoto-Protokoll vereinbart, dass Treibhausgase auf Basis des damaligen Wissenstandes bewertet werden sollen (IPCC 1995), wodurch auch die Pflichten zur Berichterstattung und zur Überprüfung von Emissionsinventaren gemäß der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen auf Basis dieser Faktoren zu erfolgen haben (UNFCCC 2002). In den Fällen, in denen die Ergebnisse aus Treibhausgasbilanzen sich am Kyoto-Protokoll bemessen sollen, ist es insofern begründet, zur Berechnung der CO_2-Äquivalenzwerte die Faktoren nach IPCC 1995 anstelle der Faktoren nach dem aktuellen Wissensstand von IPCC 2007 heranzuziehen. Dies ist z. B. bei der Ermittlung der Default-Werte im Rahmen der BioNachV der Fall.

In **Tab. 2-10** ist das Treibhauspotenzial (GWP) nach IPCC 2007 und IPCC 1995 aufgeführt. Über die Vorgaben nach IPCC hinaus ist dabei für Methan berücksichtigt, dass dies sowohl fossilen als auch regenerativen Ursprungs sein kann. Methan hat eine Halbwertszeit von ca. 15 Jahren und reagiert in der Atmosphäre mit Sauerstoff zu Kohlendioxid und Wasser. Da sich das Treibhauspotenzial auf einen Zeithorizont von 100 Jahren bezieht, ist für Methan zu berücksichtigen, dass es im verbleibenden Zeitraum ggf. in Form von Kohlendioxid ein weiteres klimawirksames Potenzial aufweist. Dies ist genau dann der Fall, wenn Methan fossilen Ursprungs ist und damit auch das anschließend entstehende Kohlendioxid. Dagegen ist regeneratives Kohlendioxid klimaneutral, d. h. sein Treibhauspotenzial ist Null, da es ursprünglich von Pflanzen aus der Atmosphäre entzogen wurde.

Tab. 2-10 Treibhauspotenzial (GWP) klimarelevanter Stoffe

Treibhausgas	**CO_2-Äquivalente (GWP)** in kg CO_2-Äquiv./kg Gas	
	IPCC 2007	**IPCC 1995**
Kohlendioxid (CO_2), fossil	1	1
Methan (CH_4), fossil	27,75	21
Methan (CH_4), regenerativ	25	18,25
Distickstoffmonoxid (N_2O)	298	310

Vorgehen in dieser Studie

In dieser Studie wurden die CO_2-Äquivalenzwerte entsprechend dem Wissenstand der Forschung nach (IPCC 2007) verwendet.

2.3.5 Landnutzungsänderung

Wenn Biomasse zur Energieproduktion angebaut wird, werden landwirtschaftliche Nutzflächen belegt. Im Basisszenario wird als Vergleichssystem in Deutschland Brache angesetzt, da zugrunde gelegt wird, dass weder wertvolle Naturflächen neu erschlossen noch andere

Nutzungen auf der Fläche durch die Energieproduktion verdrängt werden. Dabei wird angesetzt, dass der Kohlenstoffgehalt beider Flächen gleich ist.

Wenn Flächen wie Dauergrünland oder Naturwälder aufgrund von Flächenknappheit für den Anbau von Bioenergieträgern in Ackerland umgewandelt werden, spricht man von direkten Landnutzungsänderungen. In Deutschland war dies bis jetzt eher unüblich, da aufgrund der rückläufigen Entwicklung der Landwirtschaft in den 1990er Jahren viele Anbauflächen ungenutzt blieben. Erst in letzter Zeit stellt sich eine Flächenknappheit ein, ausgelöst durch eine steigende Nahrungsmittelnachfrage infolge des weltweiten Bevölkerungswachstums und zunehmenden Wohlstand sowie durch den Boom von nachwachsenden Rohstoffen als Bioenergieträger, durch den wieder mehr Flächen in Nutzung genommen werden. So wurden beispielsweise für den Anbau von Mais bereits Grünlandflächen umgebrochen, was aus Natur- und Umweltschutzsicht nachteilig ist.

Zudem ergeben sich indirekte Verlagerungseffekte durch die Erzeugung nachwachsender Rohstoffe. Darunter fällt die Verdrängung z. B. eines Nahrungsmittelanbaus von angestammten Standorten durch Bioenergieträger, die zur Folge hat, dass diese Nahrungsmittel auf anderen Flächen erzeugt werden müssen. Je nachdem, auf welche Flächen der Nahrungsmittelanbau verdrängt wird, führt dies zu mehr oder weniger ungünstigen ökologischen Auswirkungen. Diese indirekten Verlagerungseffekte sind sehr schwer zu erfassen, da wenig gesicherte Zahlen vorliegen, was warum wohin verlagert wird. Zudem können sich solche Verdrängungseffekte zu einer endlosen Kette an Flächenverdrängungen reihen, die nur durch eine globale Flächenbilanzierung erfasst werden könnten. Da bislang keine Systematik vorliegt, wie diese indirekten Verdrängungseffekte abgebildet werden können, werden sie hier nicht weiter berücksichtigt.

3 Ergebnisse zu den betrachteten Biogaspfaden

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Umweltauswirkungen der betrachteten Biogaspfade präsentiert. Da insbesondere für die Emissionsfaktoren aus dem Lager und von der Ausbringung bislang nur wenig gesicherte Erkenntnisse vorliegen und auch Methanverluste der Anlagen nur auf Experteneinschätzungen beruhen, wird dem Rechnung getragen, indem in den Grafiken die Unsicherheiten in den Emissionen in Form von Bandbreiten-Balken abgebildet werden.

3.1 Ergebnisse im Basisszenario

Im Folgenden werden die grundlegenden Ergebnisse der Ökobilanz für die Produktion und Nutzung von Biogas präsentiert, die sich aus dem Basisszenario ergeben (Details zum Basisszenario siehe Kap. 2.2.2). Abb. 3-1 zeigt die Ergebnisse für die ausgewählten Umweltwirkungen Energieeinsparung, Treibhauseffekt, Nährstoffeintrag und Versauerung jeweils für Maissilage und Rindergülle.

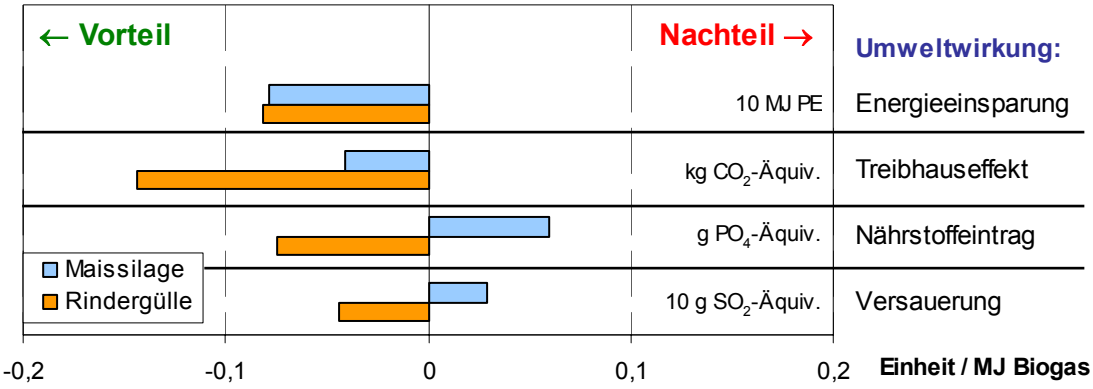


Abb. 3-1 Ergebnisübersicht: Umweltauswirkungen der Biogasproduktion und -nutzung im Basisszenario

3.1.1 Biogas – ja oder nein?

Eine zentrale Frage der Studie ist, unter welchen Bedingungen die Biogasproduktion ökologisch vorteilhaft ist. Abb. 3-1 zeigt die Ergebnisse aus dem Basisszenario, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Ergebnisse

- Die Strom- und Wärmeproduktion durch Biogas aus Mais oder Rindergülle trägt zur Schonung fossiler Ressourcen und zur Minderung des Treibhauseffektes bei.
- Ob Nährstoffeintrag und Versauerung durch die Biogasproduktion positiv oder negativ beeinflusst werden, hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie z. B. der Substratwahl.

Fazit

Sollen fossile Ressourcen geschont und der Treibhauseffekt gemindert werden, so ist eine Biogasproduktion und -nutzung im BHKW anstelle der Verwendung von Strom oder Wärme aus fossilen Energieträgern zu empfehlen. Sollen Nährstoffeintrag und Versauerung reduziert werden, so kann die Biogasproduktion und -nutzung unter gewissen Bedingungen zu diesem Ziel beitragen, unter anderen Bedingungen dagegen kann es zu einer Verstärkung dieser Emissionen kommen. Förderinstrumente sollten daher so eingesetzt werden, dass besonders die Biogaspfade, die in allen genannten Umweltwirkungen ökologische Vorteile aufweisen, gefördert werden.

3.1.2 Biogas aus Maissilage versus Biogas aus Rindergülle

Im Basisszenario, das in Kap. 2.2.2 beschrieben wird, werden entweder Maissilage oder Rindergülle zur Produktion von Strom und Wärme in einer Biogasanlage mit 500 kW_{el} und 20%iger Wärmenutzung verwendet. In Abb. 3-1 ist dieser Unterschied zwischen den ökologischen Auswirkungen der zwei Substratarten deutlich sichtbar.

Ergebnisse

- Die Strom- und Wärmeproduktion durch Biogas aus Mais oder Rindergülle trägt zur Schonung fossiler Ressourcen und zur Minderung des Treibhauseffektes bei. Rindergülle kann dabei jedoch deutlich mehr zur Treibhausgasminderung beitragen als Maissilage. Dies liegt vor allem daran, dass Biogas aus Gülle nicht nur fossile Ressourcen schont, sondern darüber hinaus auch die Emissionen mindert, die bei der Verwertung von unvergorener Gülle ohnehin anfallen, während die Maissilage erst produziert werden muss und der Maisanbau zu zusätzlichen Emissionen führt.
- Bezüglich Nährstoffeintrag und Versauerung ergeben sich unterschiedliche Ergebnisse für Biogas aus Maissilage und Rindergülle: Während der Einsatz von vergorener Rindergülle mit den gegebenen Daten im Vergleich zur sonst üblichen Handhabung tendenziell zu einer Reduzierung von Nährstoffeintrag und Versauerung führt, so bringt ein Einsatz von Maissilage erhöhten Nährstoffeintrag und eine Zunahme der Versauerung mit sich. Zur Erläuterung der Unsicherheit siehe nächstes Kapitel 3.1.3.

Fazit

- Rindergülle als Substrat für die Biogasproduktion ist zu empfehlen, da die Biogasproduktion und -nutzung aus Rindergülle gegenüber der direkten Feldausbringung unvergorener Gülle Energie und Treibhausgase einspart und Nährstoffeintrag und Versauerung mit den gegebenen Daten tendenziell ebenfalls reduziert werden.
- Maissilage als Substrat kann dagegen zwar zu Ressourcenschonung und Klimaschutz beitragen, allerdings (gerade beim Klimaschutz) in geringerem Maße als Rindergülle. Zudem führt ihre Verwendung zu verstärkter Versauerung und Nährstoffeintrag sowie zu Flächenverbrauch.
- Rindergülle ist daher in den meisten Fällen eindeutig als Substrat gegenüber Maissilage vorzuziehen.

3.1.3 Detaillierte Ergebnisse und weitere Umweltwirkungen

Abb. 3-2 zeigt die detaillierten Ergebnisse für Biogas aus Maissilage und Rindergülle im Basisszenario. Rechts des Nullpunkts sind alle Aufwendungen aufgeführt, die sich durch die Biogasproduktion und -nutzung ergeben, links vom Nullpunkt alle Gutschriften, die während des Prozesses entstehen.

Lesebeispiel für die Balken zu „Biogas aus Rindergülle“ für Treibhauseffekt:

Die Balkensegmente an zweiter Stelle der Grafik bilden detailliert Aufwendungen und Gutschriften der Biogasproduktion aus Rindergülle ab. Verrechnet man diese miteinander, so erhält man den Saldo (4. Balken, hellblau). Negative Werte bedeuten Treibhausgaseinsparungen im Vergleich zu fossiler Strom- und Wärmeproduktion. Durch die Biogasproduktion aus Rindergülle können demnach 0,14 kg CO_2-Äquivalente pro MJ Biogas eingespart werden. Aus der Unsicherheitsanalyse der Lager- und Feld-Emissionen von vergorener und unvergorener Rindergülle mit einer Variation um den Faktor 1,1 nach oben bzw. unten ergibt sich eine Bandbreite von Einsparungen in Höhe von günstigstenfalls bis zu 0,16 kg CO_2-Äquivalenten pro MJ Biogas bis hinunter zu im ungünstigsten Fall 0,13 kg CO_2-Äquivalenten pro MJ Biogas.

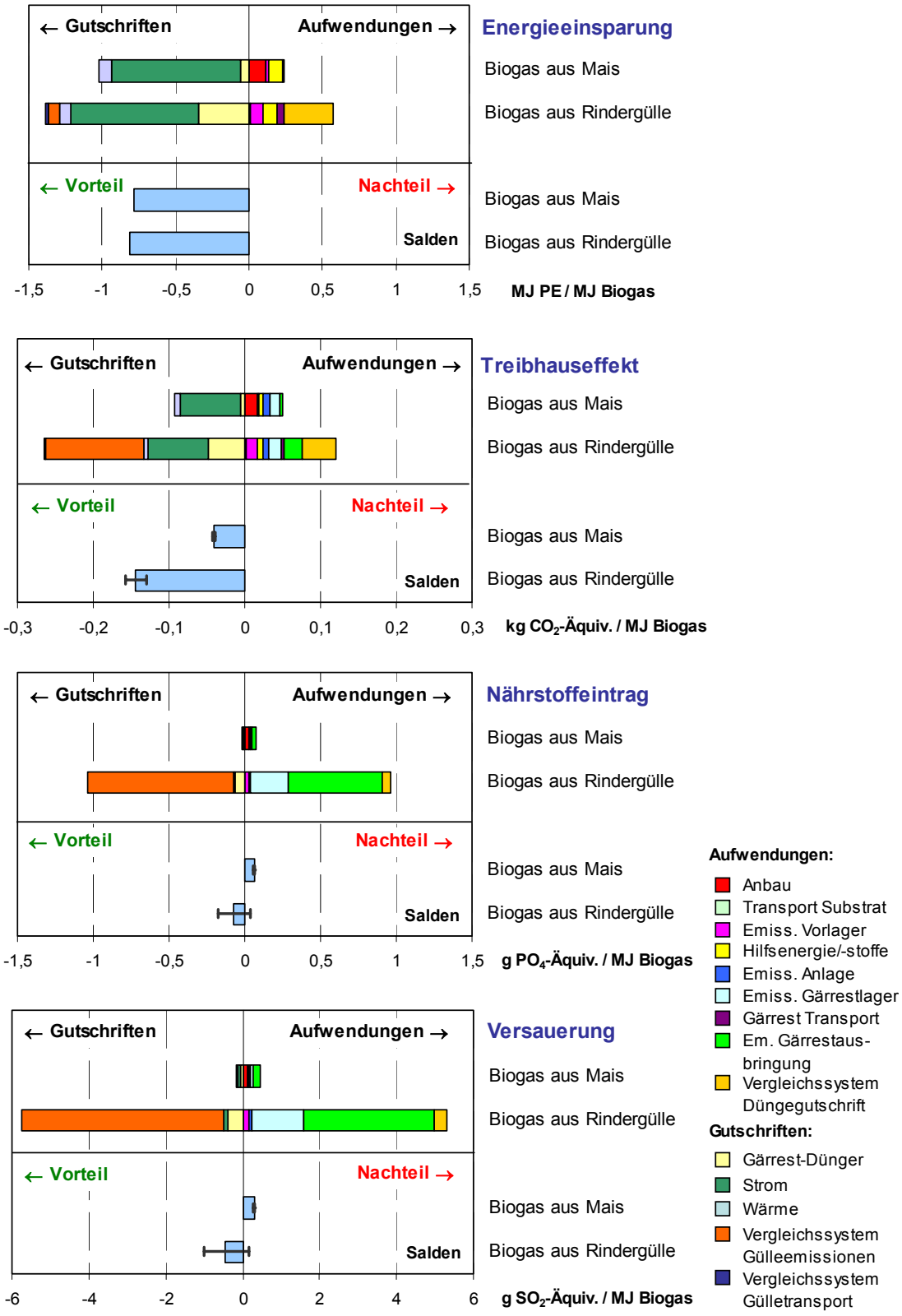


Abb. 3-2 Umweltauswirkungen der Biogasproduktion und -nutzung im Basisszenario; MJ PE = MJ Primärenergie

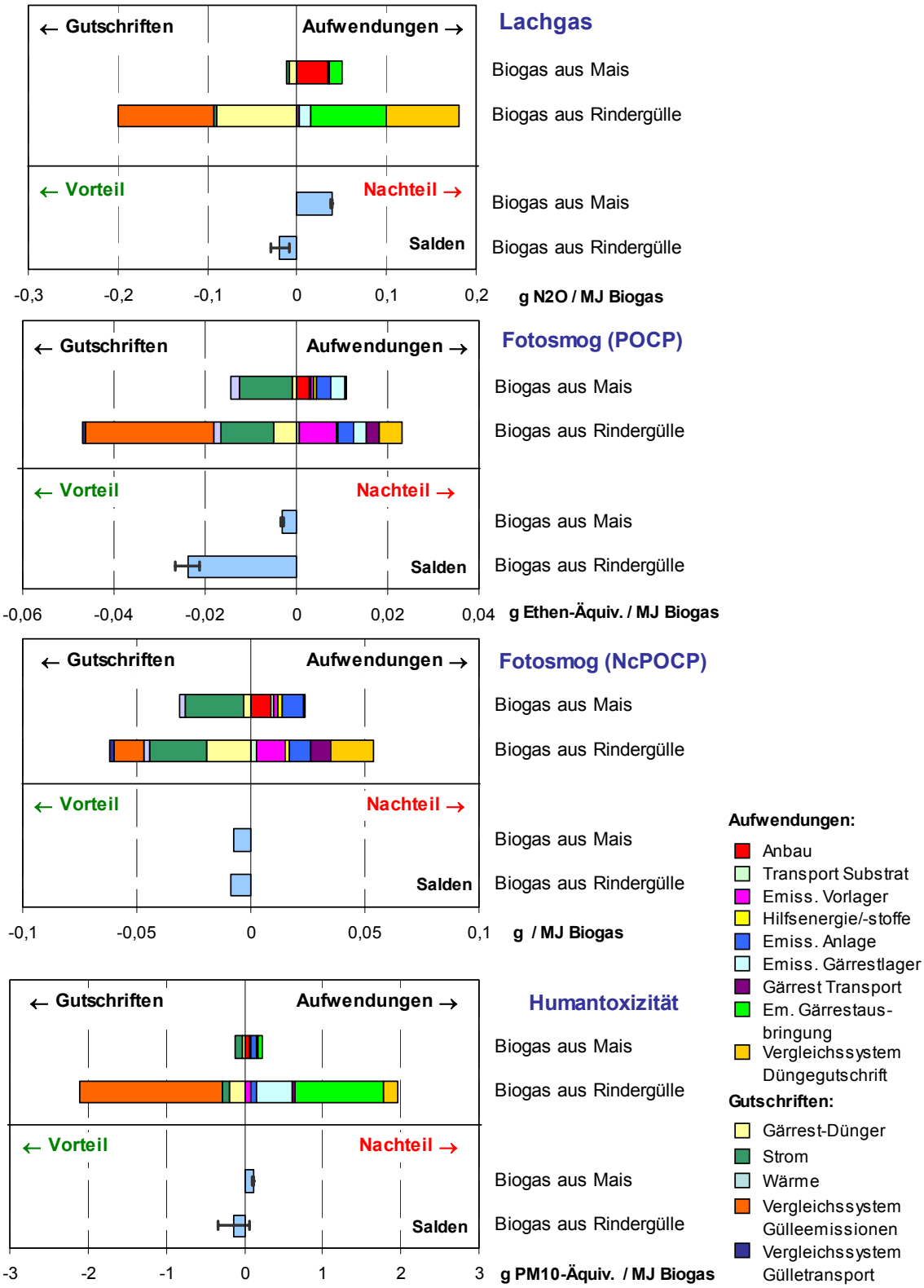


Abb. 3-2 Umweltauswirkungen der Biogasproduktion und -nutzung im Basisszenario; MJ PE = MJ Primärenergie (Forts.)

Ergebnisse im Detail

- Die größten Aufwendungsanteile bei der **Gülle** entstehen bei Treibhauseffekt, Nährstoffeintrag und Versauerung durch die Lagerung (Vorlager und Gärrestlager) und die Ausbringung auf dem Feld. Die Düngemittelgutschrift, welche die vergorene Gülle erhält, wird in etwa durch die fehlende Düngemittelgutschrift der nicht ausgebrachten unvergorenen Gülle ausgeglichen. Die Gülle verdankt ihr etwas besseres Abschneiden unter anderem den durch die Vergärung verringerten Emissionen aus dem Lager und vom Feld.
- Bei **Mais** spielen ebenfalls die Emissionen aus dem Gärrestlager, aber zusätzlich noch die Aufwendungen für den Anbau eine wichtige Rolle. Zudem ergeben sich insbesondere bei Nährstoffeintrag und Versauerung nur geringe Gutschriften, dies im Wesentlichen für eingesparte Düngemittel.
- Die dargestellten **Bandbreiten** deuten darauf hin, dass die Ergebnisse vor allem von Nährstoffeintrag und Versauerung für Gülle mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Dies liegt vor allem daran, dass nur wenige Studien zu den Emissionsfaktoren der Lagerung und Ausbringung von vergorener und unvergorener Gülle und Festmist vorliegen und die einzelnen Messwerte stark schwanken. Da bei einer Nutzung von Gülle als Biogassubstrat sowohl die Aufwendungen als auch die Gutschriften hoch sind, wirken sich selbst geringe Veränderungen bei den Emissionsfaktoren bereits deutlich auf die Ergebnisse aus. Daher kann für Gülle in den Umweltwirkungen Nährstoffeintrag und Versauerung keine verlässliche Aussage getroffen werden. Die abgebildeten Bandbreiten-Balken ergeben sich aus jeweils um den Faktor 1,1 erhöhten bzw. erniedrigten Ammoniak-, Lachgas- und Methan-Emissionen beim Vorlager, Gärrestlager, der Ausbringung des Gärrestes sowie aus den um denselben Faktor erniedrigten bzw. erhöhten Emissionen aus dem Güllelager und der Direktausbringung von Gülle. Die tatsächliche Höhe der Emissionen kann größer oder kleiner sein als der farbige Balken, liegt aber mit einiger Wahrscheinlichkeit im Bereich der dargestellten Bandbreiten. Unter dieser Voraussetzung ist die Verwendung von Rindergülle eindeutig vorteilhafter als die Nutzung von Maissilage.

Ergebnisse zu weiteren Umweltwirkungen

- Die Biogasproduktion aus Anbaubiomasse führt zu einer gesteigerten Lachgasfreisetzung. Biogas aus Rindergülle dagegen kann zur Reduzierung der Lachgasemissionen beitragen, allerdings ist auch hier aufgrund der unsicheren Datenlage der Emissionsfaktoren die Aussagekraft eingeschränkt. Da sich dieses Ergebnis durch alle betrachteten Biogaspfade in dieser Studie zieht, sich also die Lachgasemissionen durch Biogas aus Anbaubiomasse erhöhen, durch Biogas aus Gülle tendenziell eher vermieden werden, wird dieser Parameter im Folgenden nicht weiter mitgeführt.
- Die Berechnung der Umweltwirkung Fotosmog beruht in dieser Studie noch auf Faktoren aus dem Jahre 2004, da für die Substanzen, die seit 2007 einzeln bewertet werden, keine Daten zur Verfügung stehen (siehe auch Kap. 2.3.1). Des Weiteren liegen Werte für NO_X nur in Summe (als NO_2) und nicht differenziert nach NO und NO_2 vor. Um die Wirkung des Stickstoffs in Form von Stickoxiden dennoch mit abzubilden, wurde alternativ der NO_X-korrigierte Fotosmog berechnet (NcPOCP). In Abb. 3-2 sind beide Wirkungskategorien abgebildet. Zwar schneiden im Basisszenario sowohl Mais als auch Rindergülle in beiden Kategorien leicht positiv ab, allerdings können auch

gegenläufige Muster auftreten, wenn andere Szenarien betrachtet werden (z. B. bei Einsatz eines Zündstrahlmotors). Da die Äquivalenzfaktoren zur Bewertung des Fotosmogs mit vielfachen Unsicherheiten behaftet sind, wird im Weiteren auf die Darstellung dieser Umweltkategorie verzichtet.

- Die Biogasproduktion aus Anbaubiomasse hat ungünstige Auswirkungen auf die Humantoxizität, hier die Feinstaubbelastung. Biogas aus Rindergülle dagegen kann zur Vermeidung von Feinstaub beitragen. Dieses Muster zieht sich durch alle Ergebnisse, tendenziell wird die Feinstaubbelastung durch Biogas aus Anbaubiomasse ungünstig, durch Biogas aus Gülle eher günstig beeinflusst, daher wird dieser Parameter im Weiteren nicht mehr mitgeführt.

Fazit

Der Einsatz von Rindergülle ist dem Einsatz von Maissilage aus ökologischer Sicht vorzuziehen. Unter dem Vorbehalt besser abgesicherter Erkenntnisse hinsichtlich der Lager- und Feldemissionen werden die durch die Biogaserzeugung und -nutzung verursachten Emissionen bei Rindergülle durch die vermiedenen Emissionen bei der Gülle-Direktausbringung aufgewogen. Damit ist die Vergärung von Gülle zu empfehlen. Aufgrund des Nutzens für die Einsparung fossiler Energieträger und Treibhausgase sollte das Güllepotenzial daher möglichst umfassend erschlossen werden.

3.2 Verschiedene Substrate

In diesem Kapitel werden zum einen die ökologischen Auswirkungen verschiedener Substrate zur Biogasproduktion miteinander verglichen, zum anderen die ökologischen Auswirkungen verschiedener Möglichkeiten der Gülleerschließung präsentiert sowie die Folgen des Grünlandumbruchs für Maisanbau qualitativ erläutert. Berechnungsgrundlage für die Ergebnisse ist wiederum das Basisszenario (s. Kap. 2.2.2).

Verschiedene Substrate im Vergleich

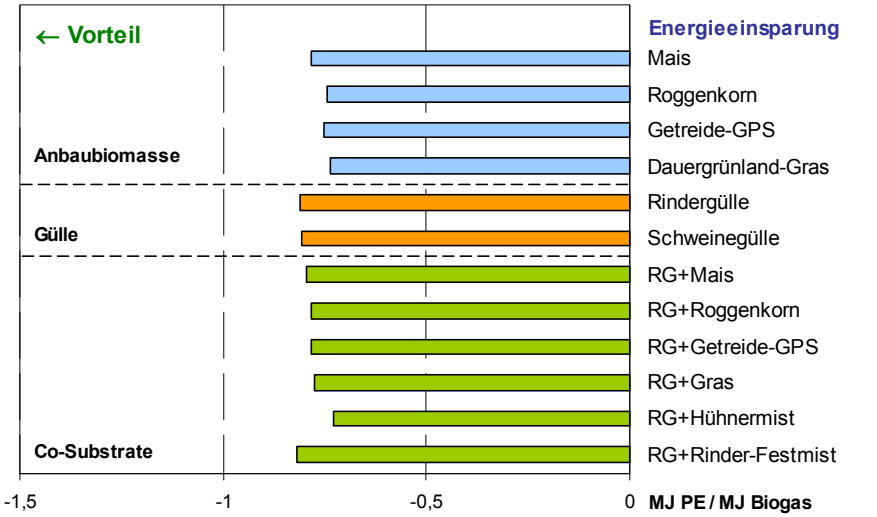
Zur Vergärung von Anbaubiomasse bieten sich außer Maissilage noch weitere Substrate an, wie Grassilage, Getreide-Ganzpflanzensilage (GPS) und Roggenkorn. Um die Umweltwirkungen für den reinen Anteil an nachwachsenden Rohstoffen darzustellen, sind die Ergebnisse für 100 % Anbaubiomasse abgebildet. Üblicherweise findet aber eine Co-Fermentation, in der Regel mit Gülle, statt. In Co-Fermentation wird hier eine Reihe von Substratmischungen aus Rindergülle und einem Energiepflanzensubstrat betrachtet, die energetisch pro Substrat jeweils 50 % des Biogases liefern. Des Weiteren wird eine Mischung aus 10 % Rindergülle und 90 % Festmist (siehe auch Kap. 2.2.3, insbesondere Tab. 2-5) untersucht. In Abb. 3-3 sind die Ergebnisse der wichtigsten Umweltwirkungskategorien dargestellt.

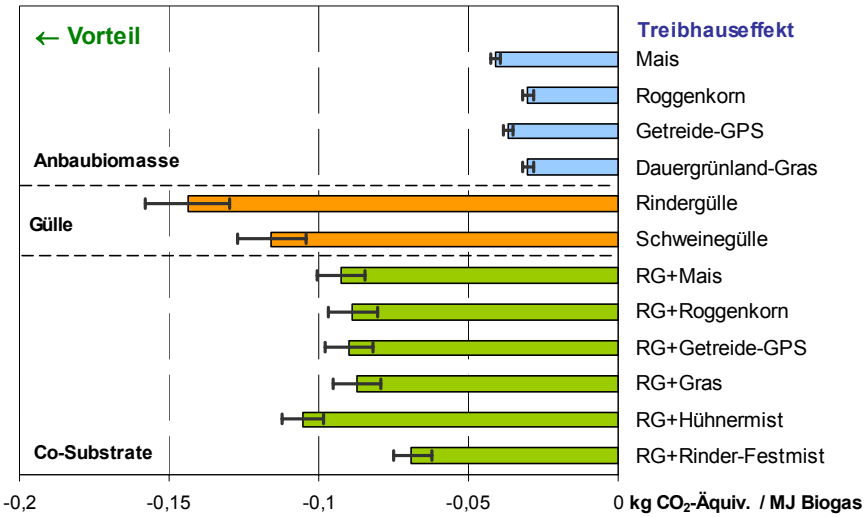
Ergebnisse

- Der reine Rindergülle-Einsatz spart im Vergleich mit vielen anderen Substraten am meisten Klimagase. Wesentlich vorteilhafter als der Einsatz reiner Anbaubiomasse ist pro erzeugtem MJ Biogas noch der Einsatz von Schweinegülle und eine Co-Fermentation von Anbaubiomasse oder Festmist mit Rindergülle. Die Ergebnisunterschiede zwischen den verschiedenen Energiepflanzen ergeben sich im Wesentlichen durch deren unterschiedliche flächenbezogene Energieerträge.
- Die Kategorie Versauerung wurde nicht abgebildet, da die Ergebnisse analog zu den Ergebnissen des Nährstoffeintrags verlaufen. Der Einsatz von reiner Anbaubiomasse erhöht das Versauerungspotenzial und den Nährstoffeintrag, und zwar umso mehr, je höher die NH_4-Menge im Gärrest bezogen auf die Substratmenge ist. Durch den Anbau, die Lagerung des Gärrests sowie dessen Ausbringung entstehen hier zusätzliche Ammoniakemissionen. Für die voraussichtlich in 2008 eingesetzten Energiepflanzen lassen sich die zusätzlichen Ammoniakemissionen in Deutschland auf etwa 12.000 Tonnen abschätzen (ausgehend von dem spezifischen Ergebnis für Maissilage und einer geschätzten Anbaufläche von 550.000 ha). Dagegen ist die Einsparung an Düngemitteln durch die Gärrestausbringung gering. Für Gülle- und Mischsubstrate sind die Ergebnisse von Nährstoffeintrag und Versauerung, wie schon in Kap. 3.1.3 dargestellt, mit großen Unsicherheiten behaftet (siehe dargestellte Bandbreiten). Daher kann für Gülle und Mischsubstrate in den Umweltwirkungen Nährstoffeintrag und Versauerung keine verlässliche Aussage getroffen werden.

Fazit

Das Rindergülle-Potenzial sollte aus ökologischer Sicht vorrangig erschlossen werden. Sollte eine Monovergärung aus wirtschaftlichen Gründen (hohe Transportkosten, da weite Entfernungen) nicht tragbar sein, ist eine Co-Fermentation mit Anbaubiomasse zu empfehlen. Die Monovergärung von reiner Anbaubiomasse trägt dagegen nur in geringerem Umfang zur Reduzierung des Treibhauseffektes bei. Wie die Co-Fermentation von Rindergülle und Festmist wirkt sie sich nachteilig auf die Versauerung und den Nährstoffeintrag aus.





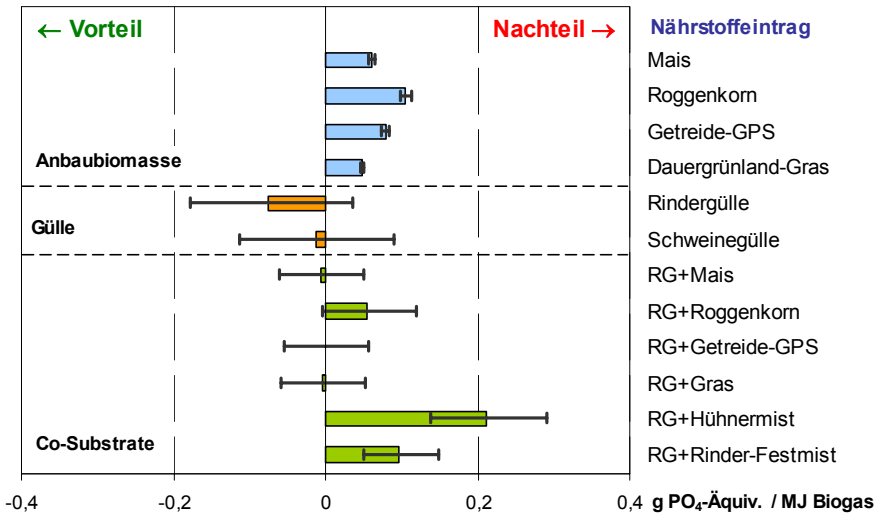


Abb. 3-3 Biogas nach dem Basisszenario mit unterschiedlichen Substraten; RG = Rindergülle; MJ PE = MJ Primärenergie

Gülleerschließung

In Kap. 2.2.3 (Tab. 2-6) werden die vier Szenarien beschrieben, die im Zuge einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zur Gülleerschließung ausgewählt wurden. Dabei wurde – wie im Basisszenario – von einer 20%igen Wärmenutzung ausgegangen. Auch die sonstigen Randbedingungen wie Methanemissionen aus der Biogasanlage oder offenem Gärrestlager entsprechen denen der 500-kW_{el}-Anlage im Basisszenario. Die Wirkungsgrade der kleineren BHKW-Aggregate sind in Tab. 2-1 aufgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchung der ökologischen Auswirkungen dieser Szenarien dargestellt.

Ergebnisse

- Mit einer Gemeinschaftsanlage von 100 kW_{el}, die mit 100 % Rindergülle gefahren wird sowie mit Einzelanlagen können bei einer Biogasproduktion und -nutzung aus Rindergülle fossile Ressourcen eingespart werden.
- Ebenso lässt sich eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen durch Biogas aus diesen Anlagen gegenüber fossilem Strom und Wärme erreichen. Dagegen hat der Transport keinen nennenswerten Einfluss auf die Bilanzergebnisse.
- Eine starke Auswirkung hat die Substratzusammensetzung: Bei einer Zumischung von 25 % Grassilage werden gegenüber einer 100%igen Güllenutzung nur noch etwa halb so viel Treibhausgase eingespart.
- Auf den Nährstoffeintrag und die Versauerung hat der Transport oder die Anlagengröße keinen Einfluss, nur die Substratzusammensetzung schlägt wieder deutlich durch, wie auch in Kap. 3.2 beschrieben.

Fazit

Aus ökologischer Sicht ist eine Gülleerschließung durch Gemeinschaftsanlagen uneingeschränkt empfehlenswert. Ein Transport von 5 km hat so gut wie keine Auswirkungen auf die Bilanzergebnisse. Dagegen ist ein Einsatz von 100 % Rindergülle erstrebenswert. Diese Erkenntnisse sollten bei Fördermaßnahmen neben den ökonomischen oder logistischen Erwägungen berücksichtigt werden.

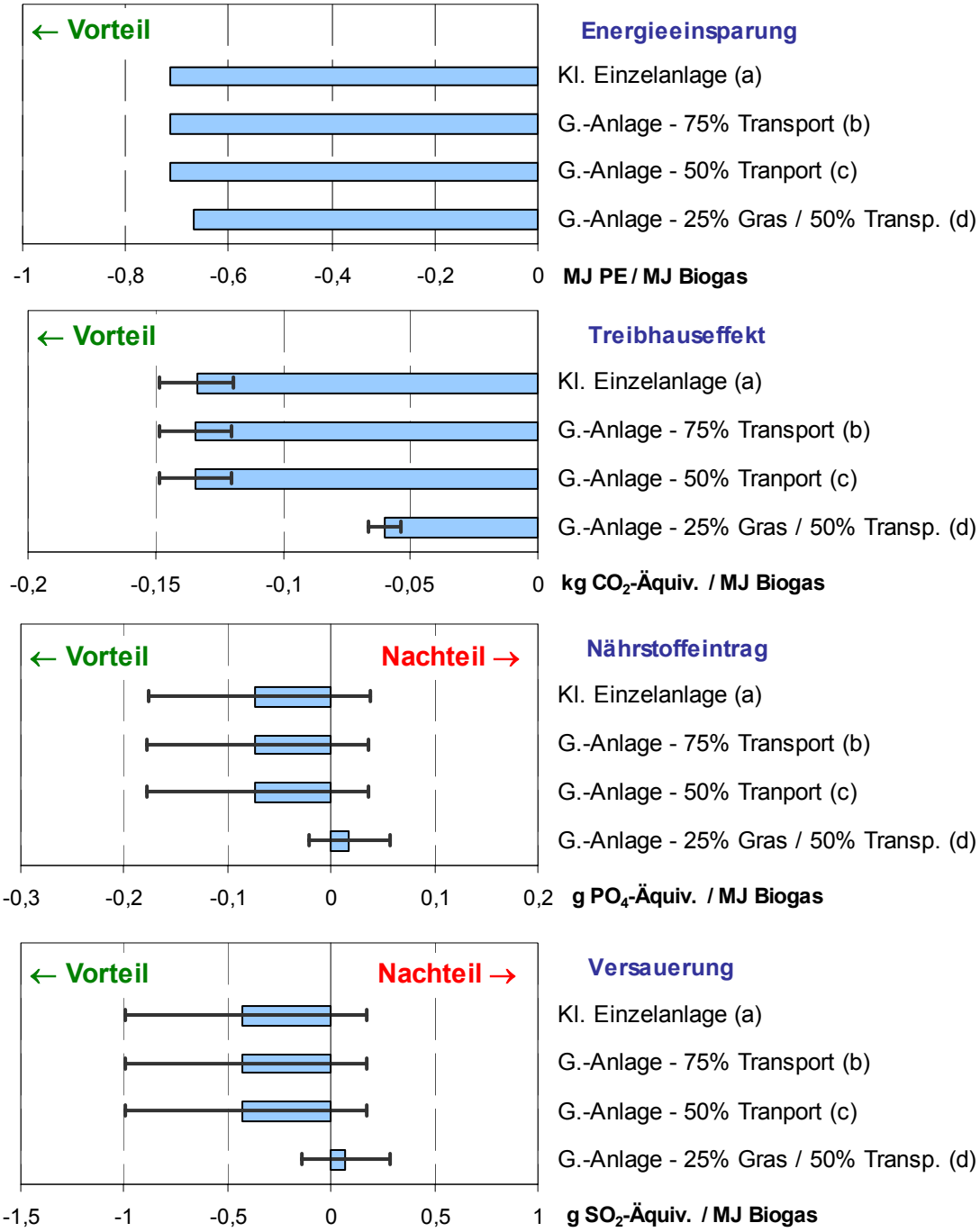


Abb. 3-4 Vergleich einer Kleinstanlage (30 kW_{el}) und mehrerer Gemeinschaftsanlagen (je 100 kW_{el}) mit Unterschieden in Substrat und Transportentfernung; MJ PE = MJ Primärenergie

Bioabfall als Substrat

Bioabfall aus Haushalten wird bereits seit den 1990er Jahren auch in Vergärungsanlagen genutzt, allerdings bisher nur zu einem geringen Anteil. In Abb. 3-5 sind die Umweltwirkungen der durchschnittlichen Kompostierung in Deutschland (Status Quo) gegenüber einer optimierten Vergärung dargestellt (s. Kap. 2.2.3). Die Ergebnisse der Versauerung sind darin nicht enthalten, da sie aufgrund der Dominanz von Ammoniakemissionen qualitativ den Ergebnissen des Nährstoffeintrags entsprechen.

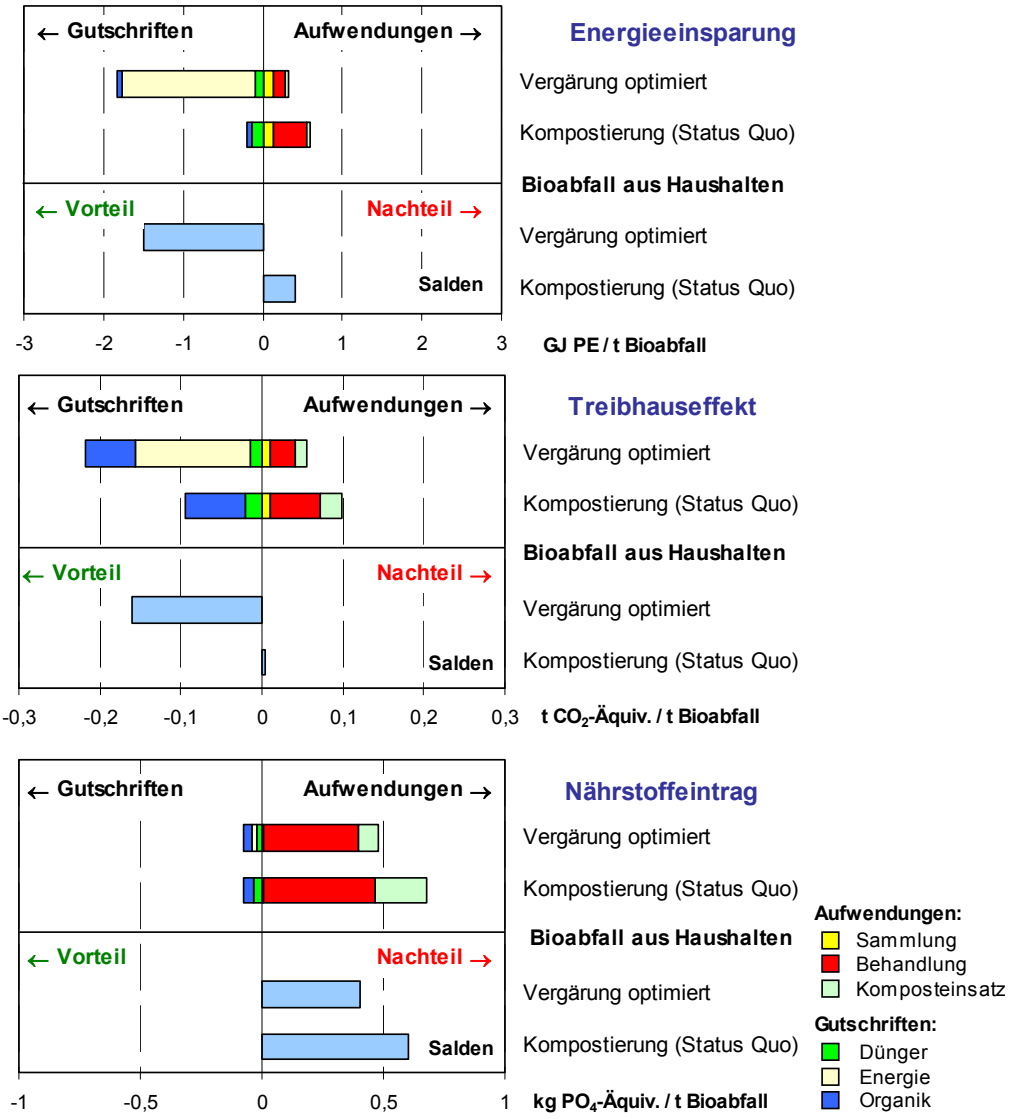


Abb. 3-5 Ergebnisse zum Status Quo der Kompostierung im Vergleich zu einer optimierten Vergärung von Bioabfall aus Haushalten; GJ PE = GJ Primärenergie

Ergebnisse

- Insgesamt ergibt eine optimierte Vergärung gegenüber dem Status Quo der Kompostierung aus ökologischer Sicht eine Verbesserung. Dies ist alleine schon dadurch bedingt, dass zugrunde gelegt wird, dass für die Vergärung und Nachkompostierung geschlossene Anlagen zum Einsatz kommen, in denen eine Abluftbehandlung (saurer

Wäscher und Biofilter) erfolgt. Dies wirkt sich insbesondere positiv hinsichtlich der Ammoniakemissionen aus. Zudem ist eine 100%ige Erzeugung von Fertigkompost angesetzt, während im Status Quo zu 34 % auch Frischkompost erzeugt wird, dessen Anwendung durch weitere biologische Abbauprozesse mit höheren Emissionen verbunden ist.

- Hinsichtlich Klimaschutz und der Schonung fossiler Ressourcen ergibt sich durch die kombinierte energetische und stoffliche Nutzung gegenüber dem Status Quo der Kompostierung eine deutliche Entlastung, die neben den zuvor erwähnten Emissionsminderungen vor allem aus der energetischen Nutzung und Substitution von fossil erzeugter Energie resultiert (Marginalbetrachtung s. Kap. 2.3.2).
- Die Ergebnisse in der Kategorie Nährstoffeintrag werden zu über 90 % durch Ammoniakemissionen bestimmt. Dies gilt analog für die hier nicht dargestellte Versauerung. Durch die zusätzliche Vergärung ergibt sich gegenüber dem Status Quo der Kompostierung ebenfalls eine Emissionsminderung. Netto bleiben jedoch Belastungen bestehen, da die ersetzten Vergleichssysteme keine entsprechend relevanten Ammoniakemissionen aufweisen.

Fazit

Durch die kombinierte energetische und stoffliche Nutzung von Bioabfall aus Haushalten werden aus ökologischer Sicht gegenüber dem Status Quo der Kompostierung durchweg Vorteile erzielt. Von den in Deutschland getrennt erfassten Bioabfällen ist etwa die Hälfte für eine Vergärung geeignet (rd. 4 Mio. Tonnen). Würden diese vor einer Kompostierung zunächst vollständig vergoren werden, könnten dadurch in Deutschland im optimierten Fall jährlich etwa 600.000 t CO_2-Äquivalente eingespart werden. Eine entsprechende Nachrüstung von bestehenden Kompostierungsanlagen ist aus ökologischer Sicht uneingeschränkt zu befürworten, hierzu bedarf es allerdings weiterer finanzieller Anreize.

Grünlandumbruch für Maisanbau

Der Biogas-Boom hatte unter anderem zur Folge, dass vermehrt Mais für die Biogaserzeugung angebaut wurde. Angeregt wurde diese Entwicklung durch die Einführung des NawaRo-Bonus mit der EEG-Novelle 2004 (EEG 2004). In einigen belegten Fällen wurde dafür auch Dauergrünland zu Ackerflächen umgebrochen. Dies ist aus Natur- und Umweltschutzsicht problematisch. Zum einen werden ökologisch wertvolle Flächen in ackerbauliche Nutzung genommen, was zu einer Reduzierung von Tier- und Pflanzenbiotopen und damit einer Minderung der Artenvielfalt führt. Zum anderen setzt eine Umwandlung in Ackerland Bodenkohlenstoff frei, der nach dem Umbruch in einigen Jahren bis Jahrzehnten zu Kohlendioxid umgesetzt wird (IPCC 2007). Auch der Stickstoffhaushalt des Bodens wird verändert, Ackerland kann eine gegenüber Grünland erhöhte Nitratauswaschung aufweisen. Dagegen wird berichtet, dass Lachgasemissionen aus intensiver Grünlandbewirtschaftung stärker sind als aus Ackerflächen (Goossens et al. 2001). Dies wird jedoch von anderen Quellen nicht bestätigt.

Aus Natur- und Umweltschutzsicht sollte daher ein Grünlandumbruch ausgeschlossen werden. Empfehlungen dazu finden sich im Materialband I (PG Biogas 2008). Für die Analyse der Lachgasemissionen aus verschiedenen Bodentypen unter unterschiedlichen Nutzungsarten besteht noch Forschungsbedarf.

3.3 Anlagenspezifische Variationen

Je nach Anlagentyp, Anlagengröße, Produktionsziel und Nutzung des Biogases ergibt sich eine Reihe an unterschiedlichen Ergebnissen, die in den folgenden Unterkapiteln präsentiert werden.

3.3.1 Emissions-Optimierungspotenzial

Die Biogasanlage im Basisszenario kann noch weiter optimiert werden, wie in Kap. 2.2.4 beschrieben.

a) Gärrestlager

Die Auswirkungen der Emissionen aus einem offenen Gärrestlager von Biogas aus Rindergülle bzw. Maissilage auf den Treibhauseffekt und den Nährstoffeintrag sind in Abb. 3-6 dargestellt. Im Basisszenario ist ein offenes Gärrestlager mit 2,5 % Methanemissionen angesetzt (siehe Kap. 2.2.2). In Variation dazu wird ein Gärrestlager mit 15 % Methanemissionen abgebildet. Dem wird eine Variante mit geschlossenem Vorlager (für Rindergülle), gasdichtem Gärrestlager und anschließender Restgasnutzung gegenübergestellt.

Ergebnisse

- Wird das Gärrestlager nicht abgedeckt, so wirkt sich das aufgrund der Methanemissionen ungünstig auf den Treibhauseffekt aus. Da bei einem Einsatz von Mais ohnehin nur geringe Vorteile bestehen, kann die Nutzung von Biogas aus Maissilage unter diesen Umständen bei hohen Methanemissionen von 15 % netto sogar zu einer Erhöhung des Treibhauseffektes führen.
- Auf den Nährstoffeintrag und die Versauerung dagegen wirkt sich die Höhe der Methanemissionen nicht aus, hier spielt dafür die Abdeckung des Gärrestlagers zur Vermeidung von Ammoniakemissionen eine große Rolle. Vor allem bei Rindergülle führt eine gasdichte Abdeckung zu einer signifikanten Verbesserung der Bilanz. Bei hohen Methanemissionen macht sich der erhöhte Güllebedarf bemerkbar, der nötig ist, um die gleiche Menge an Biogas zu produzieren wie im Falle niedrigerer Methanemissionen. Dies hat zur Folge, dass auch die gutgeschriebenen Emissionen aus unvergorener Gülle größer werden und die Bilanz leicht zu verbessern scheinen. Hier sei allerdings wieder auf die fehlende Richtungssicherheit dieses Ergebnisses hingewiesen. Eine gasdichte Abdeckung ist dagegen in jedem Fall sinnvoll.

Fazit

Es ist unbedingt eine Regelung zu treffen, die eine gasdichte Abdeckung des Gärrestlagers vorschreibt, da sich das aus ökologischer Sicht in jeder Hinsicht positiv auswirkt, unabhängig vom Substrat.

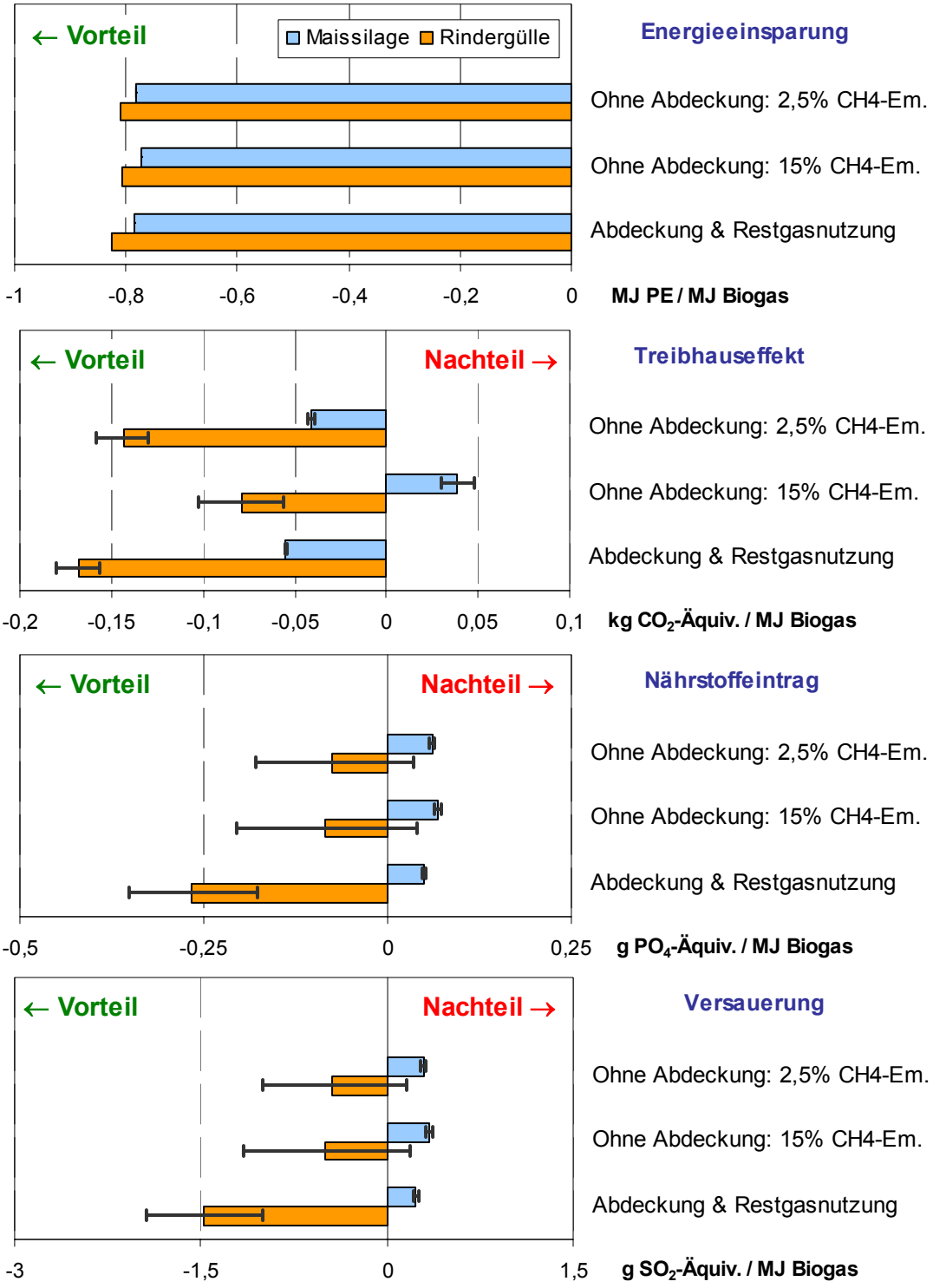


Abb. 3-6 Vergleich Biogasproduktion mit offenem Gärrestlager gegenüber gasdichter Abdeckung mit Restgasnutzung; MJ PE = MJ Primärenergie

b) Ausbringung des Gärrestes

Wie in Kap. 2.2.4 beschrieben, werden hier die Ergebnisse unterschiedlicher Gärrest-Ausbringungstechniken sowie unterschiedliche Einarbeitungszeiten betrachtet. Im Basisszenario erfolgt die Ausbringung des Gärrestes mit einem Breitverteiler und einer Einarbeitung nach 24 Stunden. In Variation dazu wird eine Einarbeitungszeit nach sechs Stunden sowie nach einer Stunde dargestellt. Auch eine Ausbringung mit Schleppschlauch ohne Einarbeitung (für bestandene Äcker) wird betrachtet. In Abb. 3-7 sind die Ergebnisse dieser Variationen abgebildet.

Ergebnisse

- Eine Ausbringung mit Schleppschlauch weist die gleiche Minderung von Ammoniakemissionen auf wie eine Ausbringung mit einem Breitverteiler und eine Einarbeitung nach sechs Stunden. Dies führt zu gleichen Ergebnissen bei Nährstoffeintrag und Versauerung. Die höchste Minderung wird erreicht, wenn die Ausbringung auf unbewachsenen Boden erfolgen kann und der Gärrest innerhalb einer Stunde eingearbeitet wird. Die gezielte Art der Ausbringung trägt bei Rindergülle zu einer deutlichen Reduzierung des Nährstoffeintrags und der Versauerung bei.
- Auf den Treibhauseffekt und die Energieeinsparung haben eine sofortige Einarbeitung oder ein Wechsel der Ausbringungstechnik dagegen nur geringe Auswirkungen. Größere Vorteile ergeben sich aus einer höheren Düngewirkung des verbleibenden Stickstoffs im Boden.

Fazit

Bei der Ausbringung wird die größte Minderung von Ammoniakemissionen erreicht, wenn der Gärrest innerhalb einer Stunde eingearbeitet wird – in der Düngeverordnung ist unverzügliche Einarbeitung zwar vorgeschrieben, in der Praxis kann dies aber bis zu einem Tag später bedeuten. Bereits nach sechs Stunden liegen die Ammoniakemissionen um den Faktor 3,5 höher, nach einem Tag um den Faktor 5. Daher ist zu fordern, dass die Regelung der Düngeverordnung schärfer ausgelegt und überwacht wird. Auf bewachsenen Böden sollte die Ausbringung mit Schleppschlauch erfolgen. Ferner könnte die Zumischung von Nitrifikationshemmern zum ausgebrachten Gärrest Stickstoffverluste weiter minimieren. Untersuchungen liegen hierzu bislang nicht vor, die Machbarkeit und Wirksamkeit wäre in Forschungsvorhaben zu prüfen (siehe Kap. 2.2.4).

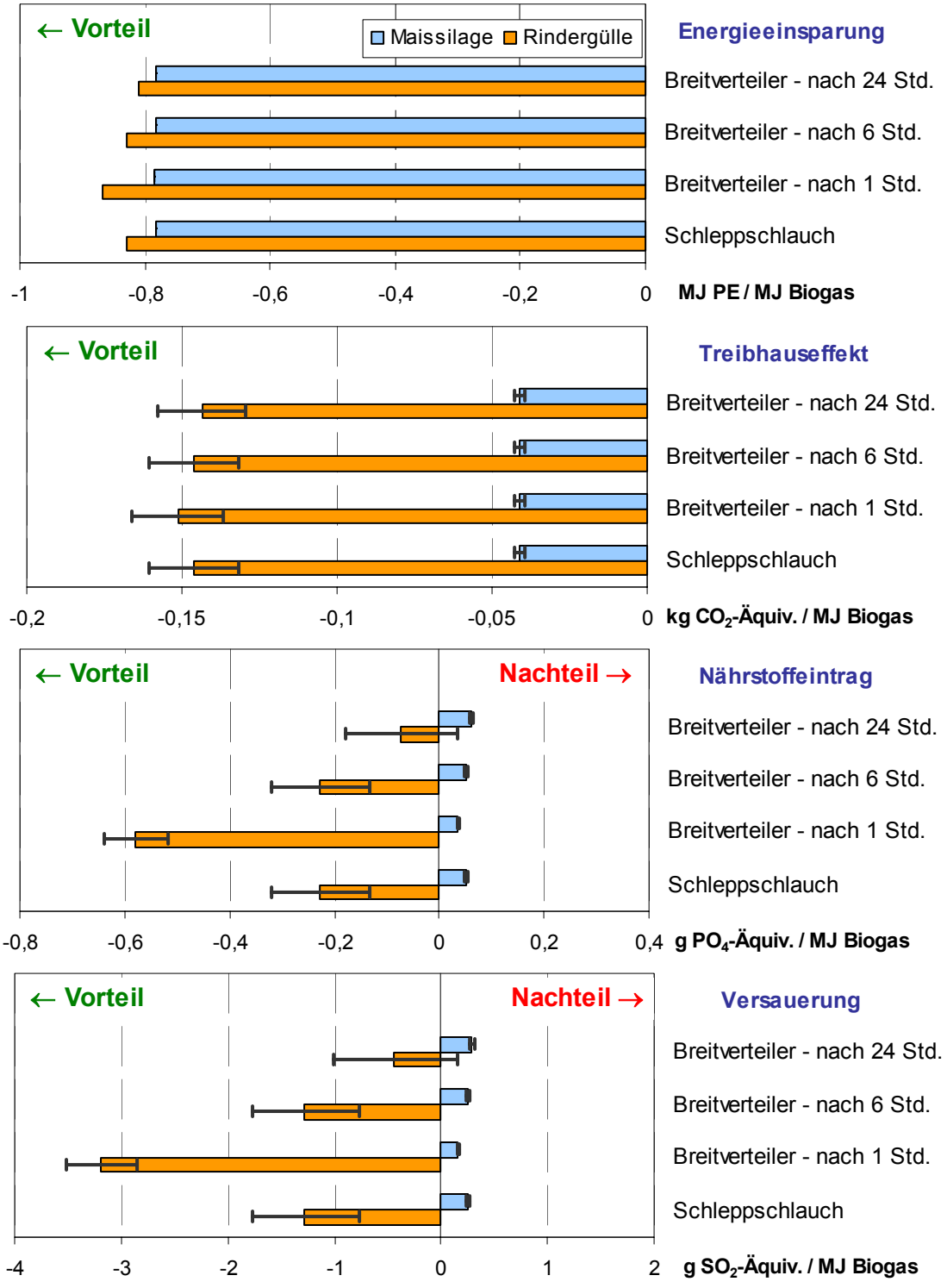


Abb. 3-7 Variationen der Art der Gärrestausbringung und der Einarbeitungszeit; MJ PE = MJ Primärenergie

3.3.2 Anlagengröße und -art

In diesem Kapitel werden die ökologischen Auswirkungen für die Produktion von Biogas und dessen Nutzung in Gasmotor-BHKWs verschiedener Größe präsentiert (Abb. 3-8). Die weiteren Randbedingungen wie offenes Gärrestlager und anteilige Wärmenutzung entsprechen dem Basisszenario. Zudem werden die BHKWs mit einem Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen-BHKW (MCFC-BHKW, BHKWs mit Hochtemperatur-Brennstoffzellen) verglichen. Die Kenndaten zu den BHKWs sind in Tab. 2-1 aufgeführt. Die Ergebnisse der Versauerung folgen dem gleichen Muster wie die Ergebnisse des Nährstoffeintrags und werden daher nicht grafisch dargestellt.

Ergebnisse

- Die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen folgen dem gleichen Muster. Je größer die Anlage, desto höher der elektrische Wirkungsgrad und desto mehr fossile Energieträger und Treibhausgase werden eingespart. Dies macht sich bei der Energieeinsparung etwas stärker bemerkbar als beim Treibhauseffekt. Bei der 2-MW_{el}-Anlage wirken sich hinsichtlich des Treibhauseffekts zudem die geringeren diffusen Methanemissionen aus der Biogasanlage günstig aus sowie der Umstand, dass BHKWs dieser Größe üblicherweise mit Oxidationskatalysator ausgestattet sind, so dass nur geringe Restmethanemissionen anfallen.
- Das Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen-BHKW weist eine bessere Energie- und Treibhausgasbilanz auf als alle Gasmotor-BHKWs. Dies ist in erster Linie auf den hohen elektrischen Wirkungsgrad dieser Anlage zurückzuführen und dem Umstand, dass im Basisszenario nur von einer 20%igen Wärmenutzung ausgegangen wird. Zudem weist auch das Brennstoffzellen-BHKW verfahrensbedingt nur sehr geringe Methanemissionen auf (hier nicht speziell berücksichtigt).
- Die Anlagengröße eines Gasmotor-BHKWs hat nur geringen Einfluss auf den Nährstoffeintrag und die Versauerung. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die BHKW nicht nach Anlagengröße hinsichtlich ihrer Emissionen (hier relevant NO_X und SO_2) differenziert werden konnten, da hierzu keine Messdaten vorliegen. Das Brennstoffzellen-BHKW schneidet in diesen beiden Kategorien etwas günstiger ab als ein Gasmotor-BHKW, zum einen bedingt durch die höhere Substitution fossiler Energieträger und zum anderen fallen aus der Brennstoffzelle nur geringe NO_X-Emissionen an und keine SO_2-Emissionen.

Fazit

Größere Anlagen können effizienter arbeiten und haben daher einen Vorteil gegenüber kleineren Anlagen. Kleinere Anlagen haben dagegen dafür teils weniger Schwierigkeiten, die produzierte Wärme auch zu nutzen (siehe Kap. 2.2.5 und 3.3.3). Dabei sind hinsichtlich des Treibhauseffektes auch kleine güllebetriebene Biogasanlagen um ein Mehrfaches vorteilhafter als große Anlagen, die mit Anbaubiomasse gefahren werden. Setzt man an oberste Stelle eine Reduzierung der Treibhausgase, so sollte die Gülleerschließung auch in kleinen Anlagen Vorrang vor Biogasproduktion aus Anbaubiomasse haben. Selbst die Unsicherheit der Emissionsfaktoren wirkt sich in dieser Hinsicht nur unwesentlich aus. Hochtemperatur-Brennstoffzellen-BHKWs, die aktuell noch selten eingesetzt werden, sind aufgrund ihres hohen elektrischen Wirkungsgrades zu fördern.

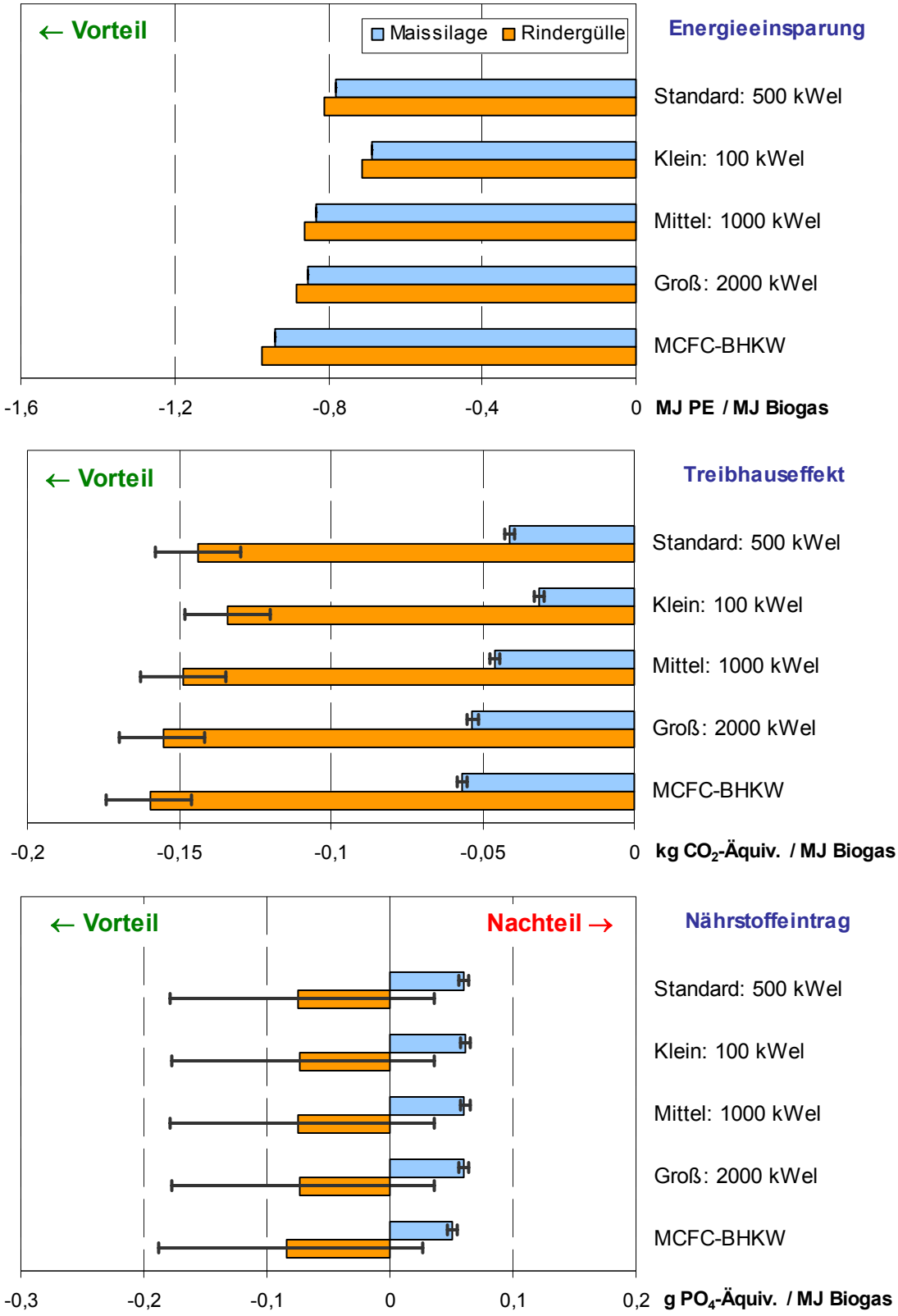


Abb. 3-8 Vergleich verschiedener Anlagengrößen von Gasmotor-BHKWs und einem MCFC-BHKW; MJ PE = MJ Primärenergie

3.3.3 Nutzung des Biogases und Gutschriften für Vergleichsysteme

In diesem Kapitel werden verschiedene Nutzungsmöglichkeiten des Biogases sowie die dabei ersetzten konventionellen Energieträger ökologisch bewertet.

a) Wärmenutzung aus dem Biogas-BHKW

Biogasanlagen liegen typischerweise nicht in Gebieten mit bedeutenden Wärmeverbrauchern. Um den niedrigen Wärmebedarf abzubilden, wird hier im Basisszenario mit einer Nutzung der überschüssigen Wärme aus dem BHKW von 20 % gerechnet. In einigen Fällen kann die Wärme nicht außerhalb der Biogasanlage verwendet werden, dies ist mit dem Fall „0 % Wärmenutzung“ abgebildet. In einzelnen Fällen, tendenziell eher aus kleinen als aus großen Anlagen, kann die Wärme nahezu vollständig eingesetzt werden. Hierfür wird eine 80%ige Wärmenutzung untersucht. In Fällen, wo kein Wärmeverbraucher vor Ort ist, kann die Wärme auch in einem ORC-Prozess zu Strom umgewandelt werden (siehe Abb. 3-9).

Ergebnisse

- Je mehr Wärme genutzt wird, desto mehr fossile Energie und Treibhausgase können eingespart werden. In kleinerem Umfang wirkt sich dies auch günstig auf die Bilanz der Versauerungsgase aus. Auf den Nährstoffeintrag hat der Wärmenutzungsgrad keine sichtbaren Auswirkungen.
- Kann Wärme nicht extern genutzt werden, so ist auch eine Umwandlung zu Strom per ORC-Prozess aus Umweltschutzsicht sinnvoll. Der Nutzen ist jedoch geringer als der eines hohen Wärmenutzungsgrads.

Fazit

Schon bei der Planung einer Biogasanlage sollte ein Konzept für eine sinnvolle Wärmenutzung entwickelt werden, da sich dies aus ökologischer Sicht äußerst positiv auswirkt. Dort, wo die Wärme nicht extern genutzt werden kann, sind auch ORC-Anlagen förderwürdig, allerdings ohne Anerkennung als KWK-Wärme.

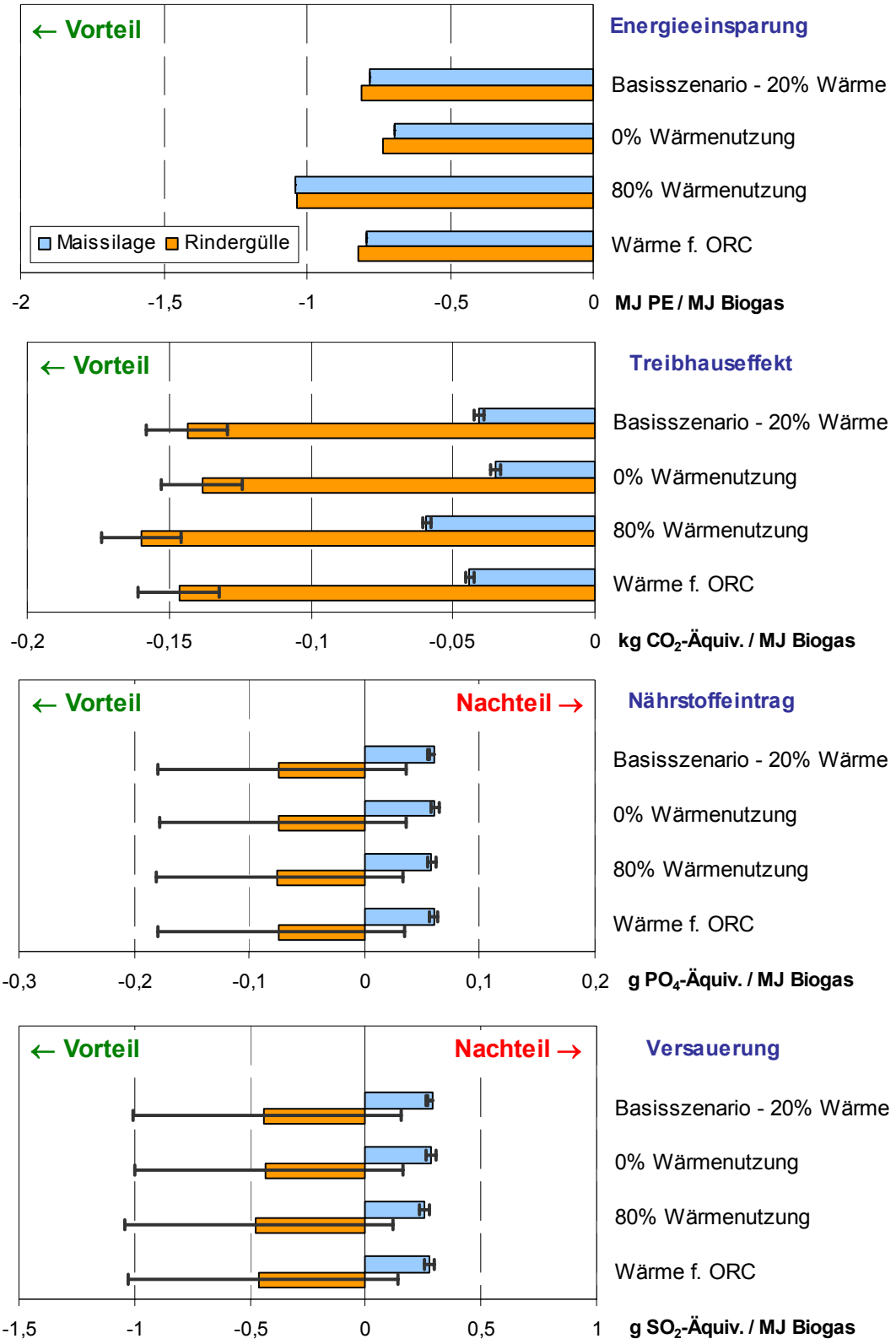


Abb. 3-9 Wärmenutzungsmöglichkeiten für Biogas-BHKW; MJ PE = MJ Primärenergie

b) Unterschiedliche Ökobilanz-Methoden

Anhand des BHKWs mit 500 kW_{el} Leistung im Basisszenario wird hier aufgezeigt (Abb. 3-10), wie sich eine Variation der ersetzten Energievergleichssysteme auf die Ergebnisse auswirkt. Wie in Kap. 2.3.2 beschrieben, wird im Basisszenario von einer Gutschrift für Strom und Wärme nach der Marginalbetrachtung ausgegangen. In diesem Abschnitt werden die Unterschiede zu einer Bilanzierung untersucht, in der jeweils die durchschnittliche Strom- bzw. Wärmebereitstellung in Deutschland ersetzt wird.

Ergebnisse

- Die Wahl des Vergleichssystems wirkt sich bei der Wärmegutschrift kaum aus, da die Unterschiede zwischen der Marginal- und der Durchschnittsbetrachtung sehr klein sind. Die Unterschiede sind fast ausschließlich durch die Variation der Stromgutschrift bedingt.
- Nach Marginalbetrachtung wird ein hoher Anteil an Steinkohle ersetzt, deren Nutzung hohe CO_2-Emissionen mit sich bringt. Daher liegen die Vorteile beim Treibhauseffekt bei der Marginalbetrachtung höher. Dagegen ist die Bereitstellung von Strom nach der Durchschnittsbetrachtung energieintensiver, da Braunkohle und Kernenergie einen höheren Primärenergiefaktor haben als Steinkohle. Das bedeutet, dass zur Erzeugung der gleichen Menge Strom von diesen Brennstoffen energetisch mehr eingesetzt werden muss, wodurch die Durchschnittsbetrachtung zu höheren Energieeinsparungen führt.
- Bezüglich Nährstoffeintrag und Versauerung sind die Wirkungseffekte der unterschiedlichen Vergleichssysteme ähnlich wie beim Treibhauseffekt.

Fazit

Unterschiedliche methodische Vorgehensweisen bei der Wahl des Vergleichssystems für die Energie führen zu sichtbaren Ergebnisunterschieden in einer Ökobilanz. Daher muss in jeder Ökobilanz klar herausgestellt werden, welches System ersetzt wurde, um die Ergebnisse verschiedener Ökobilanzen zueinander in Bezug setzen und somit eine Vergleichbarkeit gewährleisten zu können.

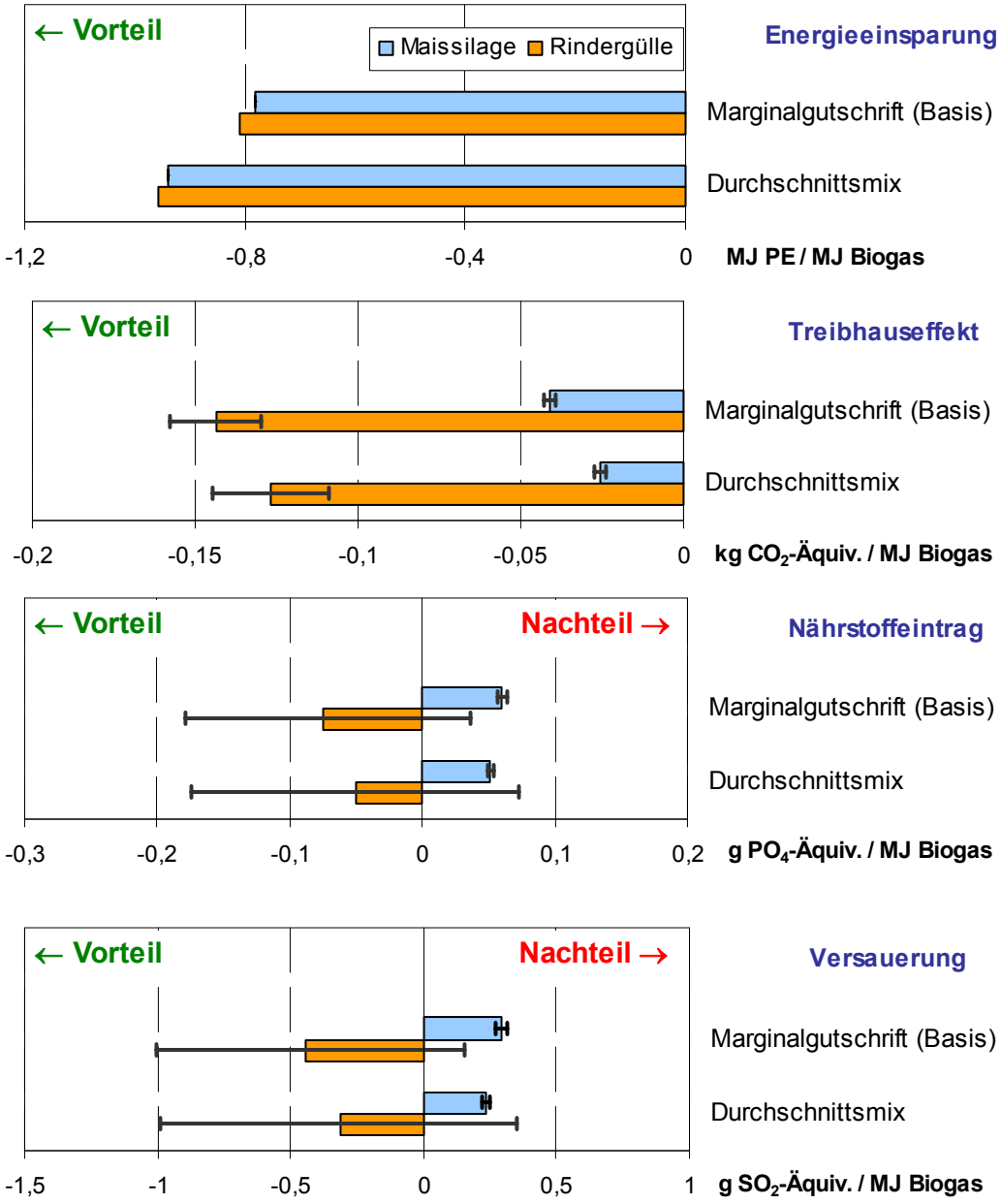


Abb. 3-10 Variation des fossilen Äquivalents für Biogas-BHKW, Basis = Basisszenario; MJ PE = MJ Primärenergie

c) Sensitivitätsanalyse: Gasmotor vs. Zündstrahlmotor

Gasmotoren werden seit 2004 vermehrt eingesetzt, wie bereits in Kap. 2.2.5 beschrieben. Die Ergebnisse des Vergleichs zwischen einem Biogas-BHKW mit Gasmotor (Basisszenario) und einem mit Zündstrahlmotor, für dessen Betrieb zusätzlich zum Biogas ein Anteil von etwa 10 % Diesel oder Biodiesel nötig ist, sind in Abb. 3-11 dargestellt.

Ergebnisse

- Der Gasmotor spart mehr Energie und Treibhausgase ein als der Zündstrahlmotor. Zum einen liegt das bei der Energieeinsparung an den höheren Aufwendungen beim Zündstrahlmotor durch den Kraftstoffbedarf, der teilweise aus den weniger ressourceneffizienten Quellen Diesel bzw. Biodiesel gedeckt wird, zum anderen beim Treibhauseffekt auch an dem nur halb so hohen Methanschlupf des Gasmotors gegenüber dem Zündstrahlmotor, so dass weniger klimawirksame Emissionen entstehen. Auch auf die Versauerung und den Nährstoffeintrag wirkt sich der Einsatz eines Gasmotors anstelle eines Zündstrahlmotors wegen der niedrigeren NO_X-Emissionen günstiger aus.
- Wird der Zündstrahlmotor mit Biodiesel anstelle von fossilem Diesel betrieben, so spart das gegenüber dem Vergleichssystem fossiler Strom- und Wärmeproduktion mehr Energie und Treibhausgase. Hinsichtlich Versauerung und Nährstoffeintrag bewirkt ein Einsatz von Biodiesel eine Verschlechterung der Bilanzergebnisse, da die Produktion und Nutzung von Biodiesel mehr Ammoniakemissionen verursacht als fossiler Diesel.

Fazit

Aus ökologischer Sicht ist ein Einsatz von Gasmotoren gegenüber Zündstrahlmotoren begrüßenswert, da mehr fossile Energie und Treibhausgase eingespart und auch Versauerung und Nährstoffeintrag günstig beeinflusst werden. Ein Einsatz von Biodiesel in Zündstrahlmotoren weist sowohl ökologische Vorteile als auch Nachteile auf, so dass eine Entscheidung für oder gegen einen Biodieseleinsatz nur in subjektiver Abwägung der Umweltwirkungen getroffen werden kann.

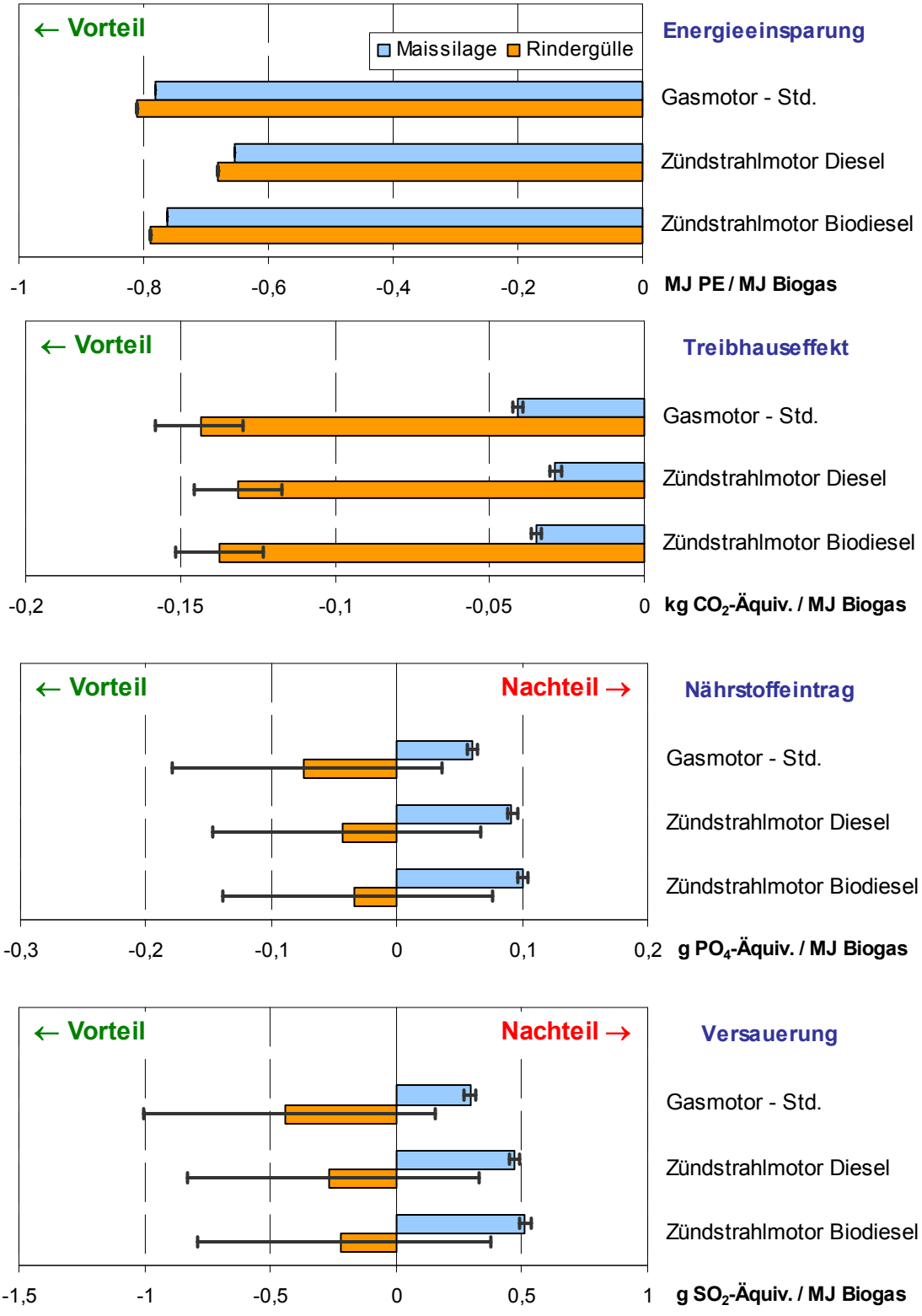


Abb. 3-11 Einsatz verschiedener Motoren in Biogas-Anlagen; MJ PE = MJ Primärenergie

3.3.4 Biogasaufbereitung zu Biomethan

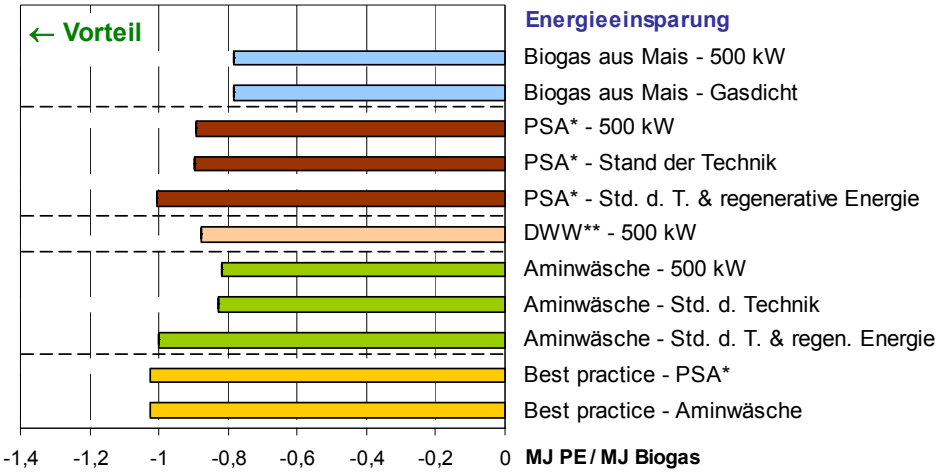
Wie in Kap. 2.2.6 ausgeführt, kann Biogas direkt in einem BHKW eingesetzt (Basisszenario) oder zu Biomethan aufbereitet werden. Letzteres hat den Vorteil, dass damit eine Einspeisung ins Erdgasnetz möglich ist, wodurch größere Freiräume zur Suche nach Abnehmern für eine vollständige Nutzung bestehen und das Gas so effizienter genutzt werden kann. In Abb. 3-12 wird gezeigt, welche ökologischen Auswirkungen die Aufbereitung zu Biomethan in verschiedenen Variationen, die in Kap. 2.2.6 näher erläutert sind, im Vergleich zum Einsatz von Biogas im BHKW hat. Als Substrat wird Maissilage zugrunde gelegt.

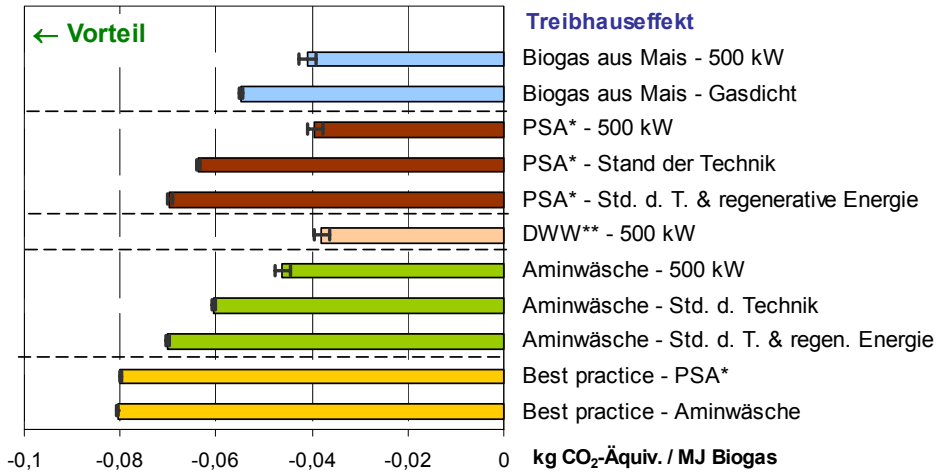
Ergebnisse

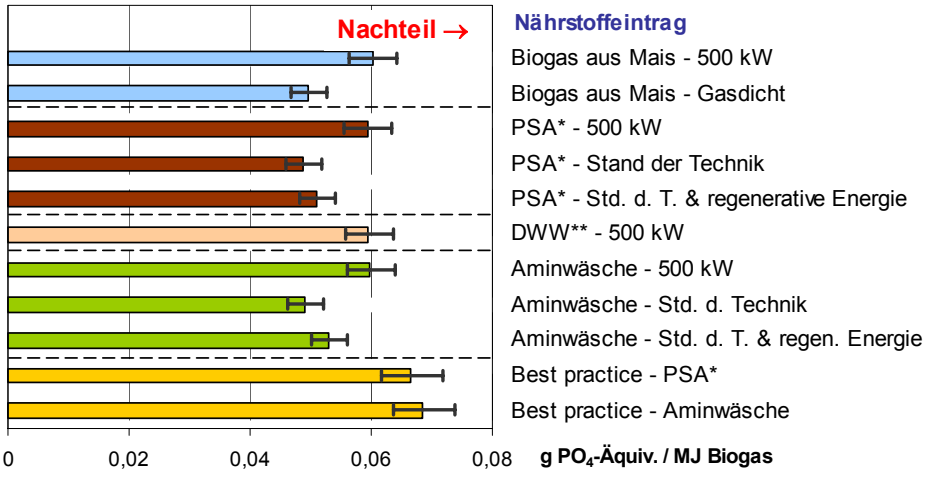
- Trotz des zusätzlichen Energieaufwandes zeigt die Aufbereitung von Biogas zu Biomethan Vorteile in der Energiebilanz, wenn man davon ausgeht, dass dieses Biomethan in wärmegeführten BHKWs mit 100%iger Wärmenutzung eingesetzt werden kann, während an der Biogasanlage nur ein kleiner Teil der überschüssigen Wärme eines BHKWs (hier wird mit 20 % gerechnet) genutzt wird (siehe dazu Kap. 2.2.5).
- Die Treibhausgasbilanz fällt dagegen bei den Aufbereitungsverfahren der Druckwechselabsorption und der Druckwasserwäsche schlechter aus, wenn der Methanschlupf aus der Aufbereitungsanlage nicht aufgefangen und nachverbrannt wird. Auch der kaum vorhandene Methanschlupf aus mit Biomethan betriebenen BHKWs mit Oxidationskatalysator (gegenüber den Biogas-BHKWs ohne Oxikat) kann das nicht wettmachen. Eine gasdichte Abdeckung des Gärrestlagers und eine Nachverbrennung von Gasen bei der Aufbereitung spart dagegen bei allen Aufbereitungsverfahren deutlich mehr Treibhausgase ein („Stand der Technik“ siehe Kap. 2.2.6).
- Innerhalb der Aufbereitungsverfahren spart die Aminwäsche in der Basisvariante aufgrund geringeren Methanschlupfs gegenüber den anderen Verfahren am meisten Treibhausgase ein.
- Wird die Prozesswärme für die Aufbereitung durch ein Holzheizkraftwerk bereitgestellt, so verbessert das die Treibhausgasbilanz noch weiter.
- Werden die Randbedingungen optimal gestaltet („Best-Practice“-Fall), schlägt sich das vor allem in der Treibhausgasbilanz vorteilhaft nieder.

Fazit

Eine Aufbereitung von Biogas zu Biomethan bringt dann Vorteile, wenn die Nutzung in BHKWs geschieht, deren Abwärme zu 100 % verwendet werden kann. Zudem sollte die Aufbereitung entsprechend den Vorgaben des EEG (2008) erfolgen und die vorangehende Biogaserzeugung, sollte dem Stand der Technik entsprechen (v. a. gasdichte Gärrestlager mit Restgasnutzung).







*** PSA = Druckwechseladsorption**
****DWW = Druckwasserwäsche**

Abb. 3-12 Direktnutzung von Biogas (blaue Balken) sowie Aufbereitung zu Biomethan mit unterschiedlichen Verfahren, Energieinputs und Randbedingungen; MJ PE = MJ Primärenergie; Std. d. T. = Stand der Technik

Nutzungsarten des eingespeisten Biomethans

Wird Biogas zu Biomethan aufbereitet und ins Gasnetz eingespeist, so wird zunächst Erdgas ersetzt. Wird die Einspeisung des Biomethans über Verträge an dessen Nutzung gekoppelt, so kann es beispielsweise auch zu Kraftstoff komprimiert werden und Benzin ersetzen oder in BHKWs oder hocheffizienten Kraftwerken eingesetzt werden und dadurch Strom und ggf. Wärme gemäß Marginalbetrachtung ersetzen. In diesem Abschnitt werden sowohl die reine Erdgas-Substitution als auch andere Anwendungsfälle wie die Biomethan-Nutzung als Kraftstoff, in BHKWs verschiedener Größen sowie in Gas-und-Dampf-Kombikraftwerken (GuD-KW) untersucht. Abb. 3-13 zeigt den Vergleich verschiedener Nutzungsmöglichkeiten ausgehend vom Basisszenario (s. Kap. 2.2.2).

Ergebnisse

- Wird Biogas nicht nach dem Stand der Technik erzeugt (offenes Gärrestlager) und die Aufbereitung auf Erdgasqualität nicht optimiert, so werden keine Treibhaugase eingespart, wenn dadurch **Erdgas** ersetzt wird. Dies liegt daran, dass die Nutzung von Erdgas gegenüber anderen fossilen Energieträgern nur geringe Treibhausgase verursacht.
- Wird Biomethan in **BHKWs** eingesetzt und die Wärme zu 100 % genutzt oder wird es in hocheffizienten Gas-und-Dampf-Kombikraftwerken verwendet, so ergeben sich Vorteile hinsichtlich der Schonung fossiler Ressourcen und des Treibhauseffekts, wobei in der Regel gilt: je höher der elektrische Wirkungsgrad des BHKWs bzw. Kraftwerks, desto höher die Einsparung. Allerdings fallen diese Ergebnisse nicht wesentlich günstiger aus als im Basisszenario, in dem das Biogas direkt in einem BHKW vor Ort eingesetzt wird und nur 20 % der Wärme genutzt werden.
- Die Nutzung von Biomethan als **Kraftstoff** und der damit verbundene Ersatz von Benzin spart fossile Energie und Treibhausgase ein. Zwei Szenarien sind hier dargestellt: Wird Biomethan in monovalenten Fahrzeugen eingesetzt (s. Kap. 2.2.6), so ergeben sich mehr Vorteile als bei einer bivalenten Nutzung. Bei ersterer wird zugrunde gelegt, dass der Verbrauch von Biomethan bzw. Erdgas gegenüber einem Benzinfahrzeug energetisch gleich ist. Dies ist bei bivalenten Fahrzeugen, nicht der Fall. Hinsichtlich des Klimaschutzes und der Energieeinsparung ist allerdings der Einsatz von Biogas (Basisszenario) oder Biomethan im BHKW dem Einsatz von Biomethan als Kraftstoff deutlich zu bevorzugen. Bei der Versauerung und dem Nährstoffeintrag dagegen hat die Nutzung als Kraftstoff geringere Nachteile.

Fazit

Eine Aufbereitung des Biogases ist aus ökologischer Sicht nur unter bestimmten Randbedingungen empfehlenswert. Grundsätzlich sollte die Biogaserzeugung nach dem Stand der Technik erfolgen (v. a. gasdichte Gärrestlager mit Restgasnutzung). Des Weiteren sollte die Aufbereitung den im EEG (2008) spezifizierten Anforderungen genügen. Zudem sollte der Einsatz des Biomethans aus Sicht des Klimaschutzes und aus Sicht der Schonung fossiler Ressourcen vorwiegend in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen mit vollständiger Wärmenutzung erfolgen. Dagegen stellt sich hinsichtlich Versauerung und Nährstoffeintrag die Nutzung als Kraftstoff etwas günstiger dar.

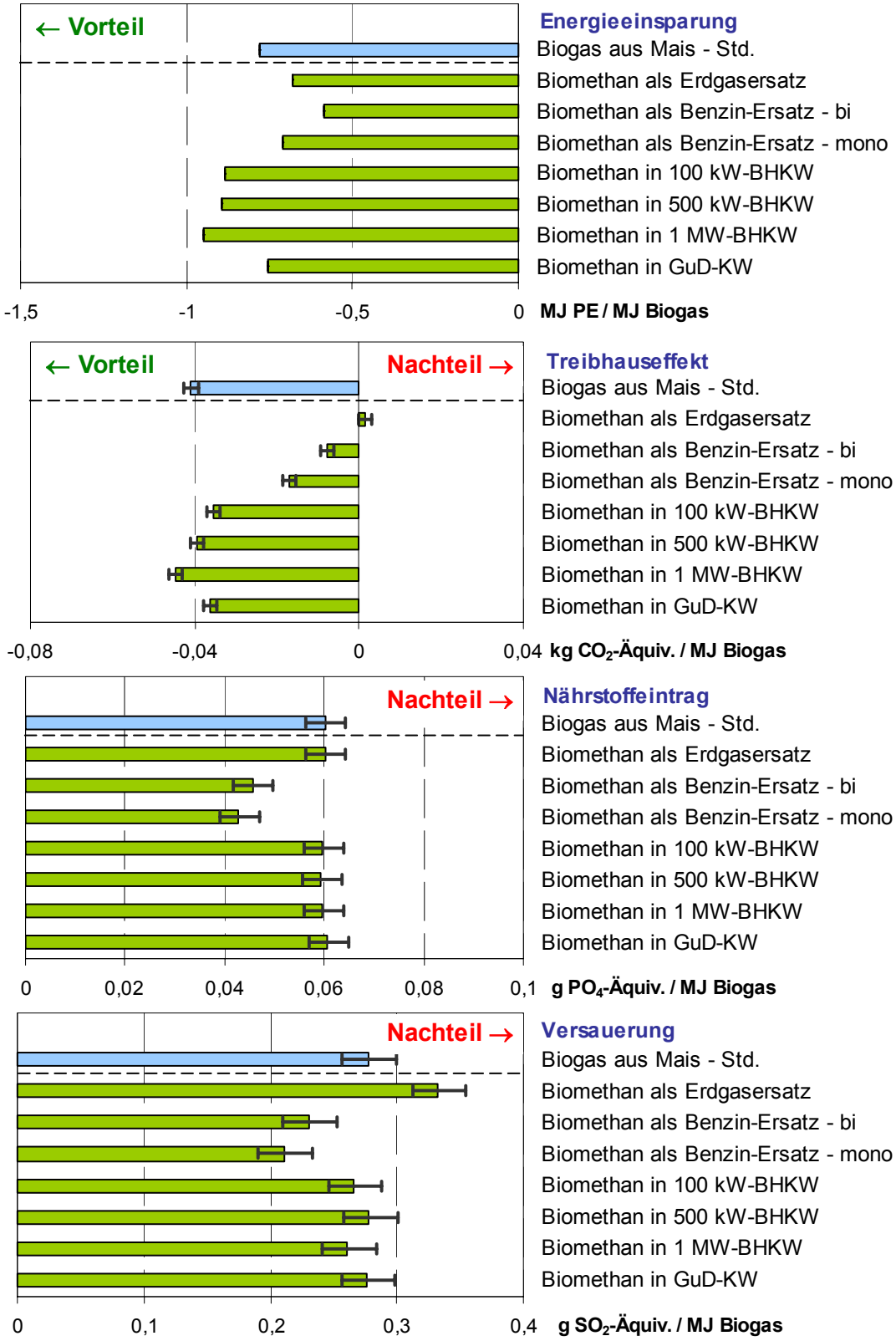


Abb. 3-13 Nutzung von Biomethan auf unterschiedliche Weise und gegenüber Biogas im Basisszenario; MJ PE = MJ Primärenergie, bi = bivalente Motoren, mono = monovalente Motoren

4 Ergebnisse, Schlussfolgerungen & Handlungsempfehlungen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und daraus Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen abgeleitet sowie Forschungsbedarf ausgewiesen.

4.1 Ergebnisübersicht

- Die Biogasproduktion aus Rindergülle und Mais trägt dazu bei, fossile Ressourcen zu schonen und den Treibhauseffekt zu mindern. Bei Mais gilt dies unter der Voraussetzung, dass es nicht zu hohen Methanemissionen aus dem Gärrestlager kommt. Der Einsatz von Rindergülle als Substrat schneidet hinsichtlich des Klimaschutzes wesentlich vorteilhafter ab als der Einsatz von Maissilage, v. a. da dadurch klimawirksame Emissionen aus der sonstigen Handhabung der Gülle vermieden werden.
- Die heutige Biogasproduktion aus Maissilage und anderer Anbaubiomasse bedingt eine erhöhte Lachgasfreisetzung, was sich nachteilig auf die Ozonschicht auswirken kann. Zudem steigen aufgrund der hohen Ammoniakemissionen der Nährstoffeintrag und das Versauerungspotenzial, während die Produktion aus Gülle Möglichkeiten zur Minderung von Ammoniakemissionen, und damit zur Minderung dieser Umweltwirkungen bietet. Allerdings hat diese Beurteilung von Gülle als Substrat bislang nur eingeschränkte Aussagekraft, da nur wenige belastbare Daten zu den Emissionen aus dem Vorlager, Gärrestlager und der Feldausbringung vorliegen.
- Um die Ammoniakemissionen aus der Biogasproduktion zu senken, kann eine Reihe von Maßnahmen getroffen werden, dazu zählen beispielsweise die gasdichte Abdeckung des Vorlagers und Gärrestlagers sowie die Optimierung der Ausbringung und Einarbeitung des Gärrestes. Alle diese Maßnahmen führen zu deutlich besseren Ergebnissen, besonders in den Umweltwirkungskategorien Nährstoffeintrag und Versauerung.
- Außerdem bewirken gasdicht abgedeckte Gärrestlager mit Restgasnutzung eine deutlich verbesserte Treibhausgasbilanz. Auch die Senkung der Methanemissionen aus undichten Anlagenteilen trägt zu einer weiteren Verbesserung in dieser Hinsicht bei. Durch die Nachverbrennung von Restgasen und den Einsatz regenerativer Prozesswärme bei der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan oder durch die Verwendung von Oxidationskatalysatoren für die Abgase der Blockheizkraftwerke erhöht sich der Beitrag zum Klimaschutz durch die Biogasproduktion nochmals merklich.

4.2 Schlussfolgerungen & Handlungsempfehlungen

Zusammengefasst ergeben sich folgende Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen:

- Das vorhandene Güllepotenzial sollte möglichst umfassend für Biogasanlagen erschlossen werden, um den Treibhauseffekt zu reduzieren und fossile Energieträger zu schonen. Daher sind Anreize zu schaffen, die insbesondere kleine mit Gülle betriebene Biogasanlagen fördern. Sollte trotz signifikanter Förderung eine Monovergärung wirtschaftlich nicht tragbar sein, so ist eine Co-Fermentation mit einem geringen Anteil Anbaubiomasse zu empfehlen und, soweit sich die Wirtschaftlichkeit nicht aus den Randbedingungen ergibt, finanziell zu unterstützen.

- Die Nachteile, die sich durch Ammoniakemissionen ergeben können (Versauerung, Nährstoffeintrag, PM10-Risiko), werden als so gravierend betrachtet, dass trotz der Vorteile beim Treibhauseffekt und der Ressourcenschonung eine Vergärung von Anbaubiomasse zu vermeiden ist. Falls dennoch eine Vergärung erfolgen sollte, müssen umfassende Minderungsmaßnahmen gewährleistet sein (Lager, Ausbringung) oder die Vergärung der Erschließung des Güllepotenzials dienen.
- Effizientere, aber bislang wenig in der Praxis eingesetzte Technologien wie z. B. Hochtemperatur-Brennstoffzellen-BHKWs sollten weiterhin gefördert werden.
- Eine Effizienzsteigerung durch eine größere Anlage wirkt sich allgemein weniger stark aus als ein höherer Anteil an Gülle im Substrat. Zur Gülleerschließung ist daher eine verstärkte Vergärung von Substrat mit überwiegendem Gülleanteil in Kleinst- oder Gemeinschaftsanlagen ökologisch sinnvoller.
- Im Rahmen der Biogaseinspeisestrategie (BMU 2007b) ist der Einsatz von Gülle als Co-Substrat in den i. d. R. größeren Anlagen unbedingt zu befürworten, da der Gülleeinsatz zur Biogasproduktion hohe Treibhausgasemissionen aus der sonstigen Handhabung der Gülle vermeidet und Gülle zudem kostengünstig ist und prozessstabilisierend wirkt. Insofern ist auch die Aufhebung des Trockenfermentationsbonus wichtig, da dieser die Nutzung von Gülle hemmt.
- Ein möglichst hoher Nutzungsgrad der Wärme aus Biogas-BHKWs ist wünschenswert. Dort, wo keine externe Wärmenutzungsmöglichkeit besteht, sind auch ORC-Anlagen, die aus dieser Wärme Strom erzeugen, aus ökologischer Sicht sinnvoll. Allerdings sollten diese aufgrund des geringen Wirkungsgrades der Verstromung nicht den KWK-Bonus erhalten.
- Die Aufbereitung des Biogases zu Biomethan ist ökologisch nur dann sinnvoll, wenn die Gesamteffizienz des Verbrauchers über der einer möglichen Direktnutzung des Biogases liegt. Daher sollte Biomethan in KWK-Nutzung mit vollständiger Wärmenutzung eingesetzt werden. Ferner sollte die Aufbereitung nach den Vorgaben des EEG (2008) erfolgen.
- Biogas wird v. a. im Großmaßstab zu Biomethan aufbereitet, was den Einsatz von Energiepflanzen als Biogassubstrat erfordert. In Anbetracht der aktuellen Diskussion um Flächennutzungskonkurrenzen sowie vor dem Hintergrund möglicher Zielkonflikte mit Naturschutzzielen wird empfohlen, gerade bei diesen großen professionell betreibbaren Anlagen auf die Umsetzung von Minderungsmaßnahmen zu achten („best practice“) und einen nachhaltigen Energiepflanzenanbau zu gewährleisten.
- Gasmotoren sind Zündstrahlmotoren vorzuziehen, da der Methanausstoß niedriger liegt.
- Eine Verpflichtung, die Gärrestlager sowie die Lager für unvergorene Gülle (auch ohne Biogaserzeugung) gasdicht abzudecken, sollte gesetzlich festgelegt werden. Eine Minderung von Methanemissionen aus offenen Lagern ist zwar auch über ausreichend lange Verweilzeiten des Substrates im Fermenter zu erreichen, allerdings ließe sich die Umsetzung dieser Maßnahme kurzfristig nicht sinnvoll sicherstellen, da es behördlicherseits keine Kapazitäten zur Überwachung gibt.
- Die Auslegung der Düngemittelverordnung hinsichtlich der unverzüglichen Einarbeitung von Gülle oder Gärresten auf unbewachsenen Flächen sollte verschärft werden:

Die Einarbeitung des Gärrestes sollte innerhalb einer Stunde nach dem Ausbringen erfolgen, um unnötig hohe Ammoniakemissionen zu vermeiden. Mechanismen zur Kontrolle der Einhaltung dieser Vorschrift sollten entwickelt werden.

- Bei der Ausbringung des Gärrestes auf bewachsenen Acker sollten emissionsmindernde Techniken wie z. B. der Schleppschlauch zur Reduzierung von Ammoniakemissionen zum Einsatz kommen.
- Von einem Umbruch von Dauergrünland für den Anbau von Mais ist sowohl aus Umwelt- als auch Naturschutzsicht abzuraten. Energiepflanzen, die auf solchen Flächen angebaut werden, sollten von der EEG-Förderung ausgeschlossen werden.
- Die Verwertung von Bioabfällen sollte möglichst in kombinierter energetischer und stofflicher Nutzung erfolgen. Hierzu bedarf es weiterer finanzieller Anreize für eine Nachrüstung bestehender Kompostierungsanlagen um eine vorgeschaltete Vergärungsstufe.

4.3 Forschungsbedarf

Zu einigen Punkten bedarf es noch vertiefter Untersuchungen, insbesondere zu Ammoniak und Lachgas:

- Es besteht erheblicher Forschungsbedarf zur Höhe der Ammoniakemissionen aus Gülle- und Gärrestlagern sowie aus der Feldausbringung von Gärresten und von unvergorener Gülle. Mit weniger Datenunsicherheiten behaftete Werte für vergorene und unvergorene Gülle sind wichtig, um das ökologische Potenzial der Güllevergärung eindeutiger bewerten zu können.
- Des Weiteren sollte geprüft werden, ob den Gärresten Nitrifikationshemmstoffe zugegeben werden können und inwiefern dadurch ähnlich wie bei synthetischem Stickstoffdünger eine Minderung der Lachgasemissionen bei der Feldausbringung erreicht wird.
- Zudem besteht Forschungsbedarf bei der Analyse der Lachgasemissionen von Grünland und Ackerland. Hier ist unklar, ob bei intensiver Bewirtschaftung die Lachgasemissionen von Grünland höher liegen als die von Ackerflächen. Wäre dies genauer bekannt, könnten die Auswirkungen eines Grünlandumbruchs künftig quantitativ belegt und somit auch in Ökobilanzen berücksichtigt werden.

5 Literaturverzeichnis

BioNachV-Entwurf 2007: Deutsche Bundesregierung: Entwurf einer Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Erzeugung von zu Biokraftstoffen verwendeter Biomasse (Biomasse-Nachhaltigkeitsverordnung – BioNachV), 24.10. 2007

BMU 2007a: BMU Reihe Umweltpolitik: Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung. Stand November 2007, Internet-Update

BMU 2007b: Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Stand: 24. 8. 2007. Online erhältlich unter: http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/39875.php

CML 2004: Institute of Environmental Sciences (CML): CML's impact assessment methods and characterisation factors. Department of Industrial Ecology, Leiden, 2004

DüV 2007: Düngeverordnung 2007: Bekanntmachung der Neufassung der Düngeverordnung. BGBl Teil I, Nr 7, 5. März 2007

EEG 2004: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz), BGBl Teil I, Nr. 40, S. 1918 ff., 31. 07. 2004

EEG 2006: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz), BGBl Teil I, S. 2550, November 2006

EEG 2008: Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (16. Ausschuss) zu dem Gesetzesentwurf der Bundesregierung (Drucksachen 16/8148, 16/8393): Entwurf eines Gesetzes zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften. Deutscher Bundestag 16. Wahlperiode, Gesetzentwurf der Bundesregierung, Drucksache 16/9477 v. 5.06.2008 (Der konsolidierte Gesetzestext lag zum Redaktionsschluss noch nicht vor.)

Emission Inventory Guidebook 2006, Group 10 agriculture: manure management regarding nitrogen com-pounds. Activities 100901-100915. Table 5F Exemplary NH3-N losses from storage: NH3-EF für Deutschland

EVA laufend: Entwicklung und Vergleich von optimalen Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands – BMVEL-FNR-Vorhaben, 2005-2008/09

FAL 2007: Landbauforschung Völkenrode - Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL). Sonderheft 304. Dämmgen, Ulrich (Hrsg.): Berechnung der Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft - Nationaler Emissionsbericht (NIR) 2007 für 2005. Einführung, Methoden und Daten (GAS-EM)

FNR 2005: Ergebnisse des Biogas-Messprogramms. Erstellt durch die Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), herausgegeben von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Gülzow, 2005

Fraunhofer ISI 2005: Gutachten zur CO_2-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe 2005

Goossens et al. 2001: Goossens A., De Visscher A., Boeckx B., Van Cleemput O.:Two-year field study on the emission of N_2O from coarse and middle-textured Belgian soils with different land use, Nutrient Cycling in Agrosystems, 60, 23-24, Netherlands, 2001

IE 2006: Ökologische Analyse einer Biogasnutzung aus nachwachsenden Rohstoffen. Im Auftrag der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe, FKZ 22014303, August 2006

IFEU 2007: Klimagasbilanzen zur Biomassenachhaltigkeitsverordnung (BioNachV) – Erläuterungen zur Berechnung der Default-Werte Anlage 2, Entwurf, Im Auftrag des Umweltbundesamt (UBA), November 2007

IFEU 2008: Experteneinschätzung zum erreichbaren Potenzial aufgrund verschiedener Quellen

IPPC 2007: 2007 IPCC Fourth Assessment Report, Chapter 2, Changes in Atmospheric Constituents and Radiative Forcing, 129-234, 2007

ISO 14040 & 14044: DIN EN ISO 14040 & 14044. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 2006

Klöpffer & Renner 1995: Klöpffer W. & Renner I: Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorien In: Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen – Wirkungsbilanz und Bewertung. UBA, Berlin 1995

Leeuw 2002: Leeuw, F. D.: A set of emission indicators for long-range transboundary air pollution. Bilthoven

Leick 2003: Leick, B. C. E.: Emission von Ammoniak (NH3) und Lachgas (N2O) von landwirtschaftlich genutzten Böden in Ab-hängigkeit von produktionstechnischen Maßnahmen. Dissertation an der Fakultät Agrarwissenschaften der Univer-sität Hohenheim, 2003.

Möller et al. 2006: Möller, K., Leihold, G., Michel, J., Schnell, S., Stinner, W., Weiske, A.: Auswirkungen der Fermentation biogener Rückstände in Biogasanlagen auf Flächenproduktivität und Umweltverträglichkeit im Ökologischen Landbau – Pflanzenbauliche, ökonomische und ökologische Gesamtbewertung im Rahmen typischer Fruchtfolgen viehhaltender und viehloser ökologisch wirtschaftender Betriebe. Verbundprojekt im Auftrag der DBU, 2006

ÖVK 2007: Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK): Ökologisch Bewertung alternativer Kraftstoffe und Aktualisierung der Studie 2006: Sind erdgasbetriebene Fahrzeuge umweltfreundlicher als benzin- bzw. dieselbetriebene Fahrzeuge. Oktober 2007.

Öko-Institut et al. 2004: Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. In Kooperation mit Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT), Institut für Energetik und Umwelt (IE) Leipzig, Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) Heidelberg, Institut für Zukunftsenergiesysteme Saarbrücken (IZES), Institut für Geoökologie/Abt. Umweltsystemanalyse der TU Braunschweig, Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues der TU München. Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Dezember 2004

PG Biogas 2008: Optimierung für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. IFEU, Heidelberg (Koordinator) und IE, Leipzig, Öko-Institut, Darmstadt, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung, TU Berlin, S. Klinski, Berlin, sowie im Unterauftrag Peters Umweltplanung, Berlin. Forschungsprojekt des Bun-

desministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Endbericht mit Materialband (Bd. A – Bd. Q), Heidelberg 2008. www.ifeu.de; www.erneuerbare-energien.de

UBA/BMVEL 2002: BMVEL/UBA-Ammoniak-Emissionsinventar der deutschen Landwirtschaft und Minderungsszenarien bis zum Jahr 2010. UBA-Texte 05/02, FKZ 299 42 245/02. Berlin, Februar 2002.

UNFCCC 2002: United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) FCCC/SBSTA/2002/1: Guidelines for the Preparation of National Communications By Parties included in Annex 3 to the Convention, Part I: UNFCCC Reporting Guidelines on annual Inventories, Tables of the Common Reporting Format. http://unfccc.int/resource/webdocs/-sbsta/2002/01.pdf; (FCCC/CP/2002/8, S.15)

Wulf 2002: Wulf, S.: Untersuchung der Emissionen von NH3, N2O und CH4 nach Ausbringung von Kofermentationsrückständen in der Landwirtschaft. Dissertation (Dr.rer.nat.) an der Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften der Universität Bayreuth. Februar 2002

6 Forschungspartner und Adressen

Projektleitung

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Kontakt: Dr. Guido Reinhardt
guido.reinhardt@ifeu.de
www.ifeu.de

Projektpartner

IE - Institut für Energetik und Umwelt gemeinnützige GmbH Leipzig
Kontakt: Dr. Frank Scholwin
frank.scholwin@ie-leipzig.de
www.ie-leipzig.de

Prof. Dr. Stefan Klinski
Fachhochschule für Wirtschaft Berlin
stefan.klinski@t-online.de
www.fhw-berlin.de

Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V., Büro Darmstadt
Kontakt: Dr. Bettina Brohmann
b.brohmann@oeko.de
www.oeko.de

Technische Universität Berlin, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung
Kontakt: Prof. Dr. Johann Köppel
koeppel@ile.tu-berlin.de
www.tu-berlin.de

Im Unterauftrag

Peters Umweltplanung, Berlin
Kontakt: Dr. Wolfgang Peters
peters@peters-umweltplanung.de
www.peters-umweltplanung.de

Fachliche Begleitung

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Referat KI III 2
Kontakt: Dr. Bernhard Dreher
bernhard.dreher@bmu.bund.de
www.bmu.bund.de

Administrative Begleitung

Projektträger Jülich (PtJ) EEN
Kontakt: Gernot van Gyseghem
ptj-een@fz-juelich.de
www.fz-juelich.de/ptj