Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

GÄRWERT - GÄRprodukte ökologisch optimiert und WERTorientiert aufbereiten und vermarkten

Zuwendungsempfänger:

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.

Technische Universität Berlin

Universität Hohenheim

Förderkennzeichen: **22402312, 22401913, 22402113, 22402213**

Laufzeit: **01.10.2013** bis **31.03.2017**

Datum: **14.04.2018**

Inhaltsübersicht:

1) **Gemeinsamer Teil**
2) **TV 1: Angebots- und Nachfrageforschung, Kostenkalkulationen (22402312)**
3) **TV 2: Großtechnische Messdatenerfassung und -evaluation unterschiedlicher Gärrestaufbereitungsverfahren (22401913)**
4) **TV 3: Charakterisierung der Aufbereitungsprodukte und Düngeversuche (22402113)**
5) **TV 4: Energie- und Treibhausgasbilanzen (22402213)**

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

Gemeinsamer Teil

zum Vorhaben

Thema:

GÄRWERT - GÄRprodukte ökologisch optimiert und WERTorientiert aufbereiten und vermarkten

Zuwendungsempfänger:

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.

Technische Universität Berlin

Universität Hohenheim

Förderkennzeichen:

22402312, 22401913, 22402113, 22402213

Laufzeit:

01.10.2013 bis **31.03.2017**

Monat der Erstellung:

06/2017

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Zuwendungsgeber:

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
Hofplatz 1
18276 Gülzow-Prüzen

Zuwendungsempfänger und ausführende Stellen:

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU)
Institute for International Research on Sustainable Management and Renewable Energy
Neckarsteige 6-10
72622 Nürtingen

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)
Bartningstraße 49
64289 Darmstadt

Technische Universität Berlin (TU Berlin)
Fachgebiet Verfahrenstechnik
Ackerstraße 76
13355 Berlin

Universität Hohenheim
Institut für Kulturpflanzenwissenschaften
Fachgebiet Düngung und Bodenstoffhaushalt
Fruwirthstr. 20
70593 Stuttgart

Projektleitung:

Prof. Dr. Carsten Herbes (HfWU)

Mitwirkende:

Prof. Dr. Carola Pekrun (HfWU)
Johannes Dahlin (HfWU)
Dr. Sebastian Wulf (KTBL)
Ursula Roth (KTBL)
Prof. Dr. Matthias Kraume (TU Berlin)
Maximilian Fechter (TU Berlin)
PD. Dr. Kurt Möller (Universität Hohenheim)
Ioana Petrova (Universität Hohenheim)

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 8

2 Beschreibung der Methoden 11

2.1 Datengrundlage: Modellbiogasanlagen 11

2.2 Management und Flexibilität (TU Berlin) 13

2.3 Ökonomische Betrachtung (HfWU) 14

2.3.1 Methoden zur Ermittlung der ökonomischen Kennzahlen 14

2.3.2 Auswertung 15

2.3.3 Ergänzende Betrachtung der Energiekennzahl 17

2.4 Treibhausgasemissionen und Energieaufwand (KTBL) 19

3 Verfahrensvergleich 23

3.1 Vorgehensweise 23

3.2 Management und Flexibilität (TU Berlin) 23

3.2.1 Übersicht 23

3.2.2 Rohgärrest (ohne Aufbereitung) 24

3.2.3 Separation (mit Pressschnecke) 24

3.2.4 Bandtrockner (mit Pressschnecke und Abluftreinigung) 24

3.2.5 Solares Verfahren (mit Pressschnecke, ohne Abluftreinigung) 25

3.2.6 Stripverfahren (mit Pressschnecke) 25

3.2.7 Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke) 25

3.2.8 Membranverfahren (mit Pressschnecke und Dekanter) 26

3.3 Landwirtschaftliche Nutzbarkeit / Düngungsversuche (Universität Hohenheim / HfWU) 27

3.3.1 Zusammensetzung und Eignung für verschiedene Verwendungszwecke 27

3.3.2 Kurz- und langfristige Düngewirkung 30

3.4 Entfrachtungspotenzial (KTBL) 33

3.4.1 Ausgangssituation 33

3.4.2 Rohgärrest (ohne Aufbereitung) 34

3.4.3 Separation (mit Pressschnecke) 34

3.4.4 Bandtrockner (mit Pressschnecke und Abluftreinigung) 34

3.4.5 Solares Verfahren (mit Pressschnecke, ohne Abluftreinigung) 34

3.4.6 Stripverfahren (mit Pressschnecke) 35

3.4.7 Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke) 35

3.4.8 Membranverfahren (mit Pressschnecke und Dekanter) 35

3.4.9 Entfrachtungsziel für alle Nährstoffe 36

3.4.10 Entfrachtungspotenzial – Übersicht 36

3.5 Treibhausgasemissionen (KTBL) 37

3.5.1 Treibhausgasemissionen des Biogasstroms 37

3.5.2 Treibhausgasemissionen ohne Berücksichtigung der Wärmenutzung 37

3.5.3 Treibhausgasemissionen bei vollständiger externer Wärmenutzung 41

3.5.4 Einfluss der Anlagengröße auf die Treibhausgasemissionen 42

3.6 Ökonomische Betrachtung 43

4 Typenspezifischer Verfahrensvergleich - Entfrachtung von 50 % P (Ökonomische Betrachtung und Treibhausgasemissionen).....45
4.1 500 kW; W+; E+ 45
4.2 500 kW; W+; E+/- 47
4.3 500 kW; W+; E- 48
4.4 500 kW; W-; E+ 48
4.5 500 kW; W-; E+/- 49
4.6 500 kW; W-; E- 50
4.7 2000 kW; W+; E+ 51
4.8 2000 kW; W+; E+/- 52
4.9 2000 kW; W+; E- 53
4.10 2000 kW; W-; E+ 54
4.11 2000 kW; W-; E+/- 55
4.12 2000 kW; W-; E- 56
5 Sensitivitäten 58
5.1 Einführung 58
5.2 Phosphor- versus Stickstoffentfrachtung (Betrachtung anhand des Typs: 2000 kW; W+; E-) 58
5.2.1 Betrachtung der Treibhausgasemissionen 58
5.2.2 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit 59
5.3 Wirtschaftsdüngeranteil im Substratmix und Wärmeverfügbarkeit (KTBL) ...60
5.4 Wärmevergütung (Betrachtung anhand des Typs: 500 kW; W-; E-) 61
5.5 Wärmeverbrauch (Betrachtung anhand des Typs: 500 kW; W-; E-) 62
5.6 Sommerbetrieb: Reduktion von 8000h auf 4000h (Betrachtung anhand des Typs: 500 kW; W+; E-) 63
5.7 Transportentfernung (Betrachtung anhand des Typs: 500 kW; W-; E-) 63
5.8 Eigenkapitalzinssatz (Betrachtung anhand des Typs: 500 kW; W+; E-) 64
6 Aufbereitungskosten (anhand der Typen: 500 kW bzw. 2 MW; W+; E-).65
7 Nutzbarkeit im Pflanzenbau an bestimmten Nutzerkategorien dargestellt (u.a. Humuswirkung, Zeitrahmen Ausbringbarkeit) (Universität Hohenheim)66
8 Kurzzusammenfassung 70
9 Danksagung 72
10 Literaturverzeichnis 73

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung der Excel-Eingabemaske (Foto: J. Dahlin) 16
Abbildung 2: Verhältnis der Nährstoffe zueinander in Relation zum Nährstoffentzug ausgewählter Ernteprodukte - korrigiert um Unterschiede in der langfristigen Nährstoffeffizienz.....28
Abbildung 3: Maximale N-Versorgung aus der organischen Düngung (%) als Funktion des N/P-Verhältnisses 30
Abbildung 4: Stickstoffmineraldüngeräquivalente [%] von zwei verschiedenen Vollgärresten und daraus erzeugten organischen Düngemitteln (links: Weiterbehandlung des Feststoffes („Feststoffschiene“), rechts: Behandlung des Flüssigseparates („Flüssigschiene“)) 31
Abbildung 5: Prozesswärmebedarf einer 500 kW-Biogasanlage im Jahresverlauf bei unterschiedlichem Wirtschaftsdüngeranteil am Substratinput. Es wurden die Klimadaten des Standorts Münster (NRW) zugrunde gelegt.....60
Abbildung 6: Wärmebedarf verschiedener Gärrestaufbereitungsverfahren im Vergleich zur verfügbaren Restwärme einer 500 kW-Biogasanlage im Jahresverlauf bei unterschiedlichem Wirtschaftsdüngeranteil am Substratinput. Es wurden die Klimadaten des Standorts Münster (NRW) zugrunde gelegt. 61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick der typenspezifischen Varianten 9
Tabelle 2: Überblick der angenommenen Abgabepreise für die Gärprodukte 10
Tabelle 3: Grundlage für die Berechnung der Modellbiogasanlagen.....11
Tabelle 4: Angebotseingang zu verschiedenen Aufbereitungstechnologien für die angefragten Größenklassen 12
Tabelle 5: Faktoren für die Treibhausgas- und Energiebilanzierung der Gärrestaufbereitung.....19
Tabelle 6: Übersicht der Parameter Flexibilität und Management.....23
Tabelle 7: Langfristige N-Düngewirksamkeit von organischen Düngemitteln als Summe der N-Ausnutzung im Anwendungsjahr und der Summe der N-Nachwirkung in den nachfolgenden 20 bis 30 Jahren (% des ausgebrachten bzw. eingearbeiteten Stickstoffs) 32
Tabelle 8: Entfrachtungspotenzial der betrachteten Aufbereitungsverfahren im Vergleich zum unbehandelten Gärrest. 36
Tabelle 9: Treibhausgasemissionen der Aufbereitungsverfahren im Vergleich zum unbehandelten Gärrest.....43
Tabelle 10: Übersicht der Energiekennzahlen 44
Tabelle 11: Verfahrensvergleich für den Typ 500 kW; W+; E+.....45
Tabelle 12: Verfahrensvergleich für den Typ 500 kW; W+; E+/- 47

Tabelle 13: Verfahrensvergleich für den Typ 500 kW; W+; E- 48
Tabelle 14: Verfahrensvergleich für den Typ 500 kW; W-; E+ 49
Tabelle 15: Verfahrensvergleich für den Typ 500 kW; W-; E+/- 50
Tabelle 16: Verfahrensvergleich für den Typ 500 kW; W-; E- 51
Tabelle 17: Verfahrensvergleich für den Typ 2000 kW; W+; E+....52
Tabelle 18: Verfahrensvergleich für den Typ 2000 kW; W+; E+/- 53
Tabelle 19: Verfahrensvergleich für den Typ 2000 kW; W+; E- 54
Tabelle 20: Verfahrensvergleich für den Typ 2000 kW; W-; E+ 55
Tabelle 21: Verfahrensvergleich für den Typ 2000 kW; W-; E+/- 56
Tabelle 22: Verfahrensvergleich für den Typ 2000 kW; W-; E- 57
Tabelle 23: Kapitalwertvergleich unter der Annahme einer 50 %igen P- bzw. N-Entfrachtung....60
Tabelle 24: Sensitivität bei Veränderung der Wärmekosten 62
Tabelle 25: Sensitivität bei Veränderung des Wärmeverbrauchs....63
Tabelle 26: Sensitivität bei Veränderung der Betriebsstunden....63
Tabelle 27: Sensitivität bei Veränderung der Transportdistanz....64
Tabelle 28: Sensitivität bei Veränderung des Eigenkapitalzinssatzes....65
Tabelle 29: Übersicht der Aufbereitungskosten abhängig von den Verfahren....65
Tabelle 30: Zusammenfassende Beschreibung des Hauptbestandteils und der Eignung von Flüssigmisten und Flüssigmistaufbereitungsprodukten für verschiedene Einsatzzwecke....69

Abkürzungsverzeichnis

%	**Prozent**
€	**Euro**
ASL	**Ammoniumsulfatlösung**
BHKW	**Blockheizkraftwerk**
DüV	**Düngeverordnung**
H	**Wasserstoff**
IRR	**Internal Rate of Return (Interner Zinsfuß)**
K	**Kalium**
Kg	**Kilogramm**
kW	**Kilowatt**
KWK	**Kraft-Wärme-Kopplung**
l	**Liter**
LW	**Landwirtschaft**
MDÄ	**Mineraldüngeräquivalente**
MW	**Megawatt**
N	**Stickstoff**
P	**Phosphor**
S	**Schwefel**
t	**Tonne**

1 Einleitung

Gärprodukte sind wertvolle organische Dünger und Bodenverbesserer, die bei der anaeroben Fermentation von nachwachsenden Rohstoffen und organischen Abfall- und Reststoffen anfallen. Sie werden überwiegend in der Landwirtschaft als unbehandeltes Gärprodukt eingesetzt. Aufgrund regional auftretender Nährstoffüberschüsse können Gärprodukte nicht immer im regionalen Kontext ausgebracht werden. Der nachhaltige Einsatz dieser Produkte wird maßgeblich durch die Einhaltung der Düngeverordnung (DüV) reglementiert. Die am 31. März 2017 im Bundesrat beschlossene Novelle wird den Einsatz von Gärprodukten durch weitere Restriktionen zusätzlich erschweren. Die angespannte Lage wird sich deshalb noch verschärfen und in Folge dessen zu einer stärkeren Konkurrenz um verfügbare Ausbringungsflächen sowie zu höheren Transport- und Entsorgungskosten führen. Die Betrachtung von alternativen Aufbereitungs- und Nutzungspfaden ist daher von großer Bedeutung. Zum einen, um den Nährstoffdruck in einigen Regionen aus Gründen des Umweltschutzes sowie der Wirtschaftlichkeit (z.B. Transportkosten) zu lindern und zum anderen, um Gärprodukte als wichtigen Rohstoff und Ressource effizienter zu nutzen.

Das Projekt GÄRWERT (GÄRprodukte ökologisch optimiert und WERTorientiert aufbereiten und vermarkten) hat das Ziel, die Gärproduktaufbereitung und –nutzung in einem multidimensionalen Ansatz zu betrachten. In diese Betrachtung fließen technische, ökologische, ökonomische sowie pflanzenbauliche Parameter ein. Außerdem werden Entscheidungshilfen unter Berücksichtigung von regionalen und anlagenspezifischen Gegebenheiten geschaffen und verdeutlichen differenziert die Vor- und Nachteile möglicher Aufbereitungs- und Nutzungspfade.

In dem hier vorgelegten Endbericht werden im gemeinsamen Teil die Ergebnisse aller Teilvorhaben zusammengeführt, um den Überblick für Nutzer der Ergebnisse zu erleichtern. Die detaillierten Ergebnisse der Teilvorhaben werden jeweils in deren Schlussberichten dargestellt. Der gemeinsame Teil ist wie folgt gegliedert: Zunächst werden kurz die Methoden vorgestellt, mit denen die Ergebnisse ermittelt wurden. Anschließend werden in Kapitel 3 die Verfahren hinsichtlich der Kriterien „Management und Flexibilität“, „landwirtschaftliche Nutzbarkeit“, „Entfrachtungspotenzial“ sowie „Treibhausgasemissionen“ verglichen.

Die in dieser Studie betrachteten Verfahren sind nachfolgend aufgeführt, wobei unbehandelte Gärprodukte (=Rohgärreste) immer als Referenz herangezogen wurden:

- Rohgärreste
- Separation (mit Pressschnecke)
- Bandtrockner (mit Pressschnecke und Abluftreinigung)
- Solares Verfahren (mit Pressschnecke, ohne Abluftreinigung)
- Stripverfahren (mit Pressschnecke)
- Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)
- Membranverfahren (mit Pressschnecke und Dekanter)

Bei den Emissionen sowie bei den ökonomischen Kennzahlen werden die Ergebnisse dann in Kapitel 4 differenziert nach bestimmten Biogasanlagentypen dargestellt. Neben der Differenzierung in zwei Größenklassen wurden die Wärmekosten mit zwei Ausprägungen sowie die Erlöse für Gärprodukte mit drei Ausprägungen dargestellt. Diese Annahmen sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgeführt und werden ebenfalls in Kapitel 4 näher betrachtet. Insgesamt ergeben sich so 12 Typen. Eine Anlage mit 500 kW elektrischer Leistung, die noch über ungenutzte Wärme verfügt, aber die Lager- und Ausbringungskosten für die Gärprodukte komplett übernehmen muss und keine Vergütung vom Abnehmer erhält, wird z.B. als Typ „500 kW; W+; E-" bezeichnet. Mit der Differenzierung in 12 Typen können viele mögliche Nutzer einen Typ finden, der ihrer Anlage von den Bedingungen relativ nahe kommt, ohne gleichzeitig den Bericht zu kompliziert werden zu lassen.

Tabelle 1: Überblick der typenspezifischen Varianten

Systemmerkmal	**Ausprägungen**
Größe der Biogasmodellanlage	500 kW / 2.000 kW
Wärmekosten	Ja = **-** = 2,6 Cent(durchschnittliche Wärmeerlöse deutscher Biogasanlagen 2016 (Herbes und Halbherr 2017) => Typ **W-** Nein = **+** = Keine Wärmekosten und 2,94 Cent KWK-Bonus => Typ **W+**
Erlöse für Gärprodukte	**+**: Abnehmer übernimmt Lager und Ausbringung, Vergütung für Nährstoffe N und P => Typ **E+** **+/-**: Abnehmer übernimmt Lagerkosten und Ausbringung, keine Nährstoffvergütung => Typ **E+/-** **-**: sämtliche Kosten beim Biogasanlagenbetreiber => Typ **E-** Transportkosten werden immer vom Biogasanlagenbetreiber getragen

Tabelle 2: Überblick der angenommenen Abgabepreise für die Gärprodukte

Verfahren	Produkt	Abgabepreis (Euro/t Produkt)	Faktor Erlöspotenzial[1] (%)	N-Gehalt ASL (kg/t Frischmasse)
Ohne Behandlung	Rohgärreste	3,65	0,5	
Separation (mit Pressschnecke)	PSS - fest	3,17	0,9	
	PSS - dünn	4,05	0,6	
Bandtrockner	PSS - dünn	4,05	0,6	
	Tr	10,37	1,0	
	Tr - ASL	27,73	0,8	35,52
Solares Verfahren	PSS - dünn	4,05	0,6	
	Sol – Tr	11,39	1,0	
Stripverfahren	PSS - fest	3,17	0,9	
	St - N-red dünn	1,66	0,6	
	St - ASL	48,13	0,9	61,67
Vakuumverdampfung	PSS - fest	3,17	0,9	
	VV - Konzentrat	3,76	0,6	
	VV - ASL	51,44	0,9	65,90
Membranverfahren	DZ/PSS - fest	5,64	0,9	
	M - Konzentrat	6,46	0,6	

Schlüssel: ASL – Ammoniumsulfatlösung, DZ – Dekanterzentrifuge, N-red dünn – Stickstoff-reduzierte Flüssigphase, PSS - Pressschneckenseparator, St - Stripverfahren, Tr - Trockengut, VV - Vakuumverdampfung

Die Betrachtung verschiedener Größenklassen ist deshalb notwendig, weil es Größendegressionseffekte geben kann, die bestimmte Aufbereitungsverfahren bei größeren Anlagen vorteilhafter machen als bei kleinen Anlagen. Auch hängt die Wirtschaftlichkeit extrem stark von der Frage ab, ob Wärme kostenlos zur Verfügung steht oder nicht. Abhängig von der regionalen Nährstoffverfügbarkeit können für Gärprodukte auch Erlöse erzielt werden.

Für alle Betrachtungen im Bereich Emissionen und ökonomische Vorteilhaftigkeit wurde ein gemeinsames Szenario zu Grunde gelegt, in dem 50 % des Phosphors aus der Region verbracht werden. Dieses Szenario wurde gewählt, da in vielen Regionen Deutschlands anteilig mehr Phosphor (P) als Stickstoff (N) durch Abtransport entfrachtet werden muss.

[1] Anteil der durch Abnehmer vergüteten Nährstoffe (angewandt auf die nach Kap. 2.4 ermittelte pflanzenverfügbare Menge an N und P)

2 Beschreibung der Methoden

2.1 Datengrundlage: Modellbiogasanlagen

Um über die Aufbereitungsverfahren hinweg einheitliche Anforderungen festzulegen, wurde eine Modellbiogasanlage mit 500 kW sowie mit 2 MW berechnet. Hierfür wurden der Substratbedarf aus Mais und Rindergülle sowie die daraus resultierenden Gärprodukte aus dem Substratinput berechnet. Anhand dieser Datenbasis (Volumenströme, Gärprodukteigenschaften, Energiebedarf etc.) wurden ökonomische und technische Angebote von Herstellern von Gärproduktaufbereitungsanlagen erbeten. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass eine vergleichbare Datengrundlage geschaffen wurde, auf der es möglich ist, die verschiedensten Aufbereitungskonzepte und Nutzungspfade miteinander zu vergleichen. Die Annahmen und Berechnungen zu beiden Modellbiogasanlagen sind in Tabelle 3 dargestellt. Die aufgeführten Methanerträge sind dem KTBL-Biogasrechner entnommen. Um einen Eindruck der Auswirkungen einzelner Annahmen auf das Ergebnis zu vermitteln, werden in Kapitel 5 die Annahmen variiert und so Sensitivitäten dargestellt.

Tabelle 3: Grundlage für die Berechnung der Modellbiogasanlagen

Gärprodukte		**Variante 1**	**Variante 2**
Gärprodukte gesamt (t)		**10.715 t**	**42.859 t**
TM (%) Gärprodukte gesamt		**7,89%**	**7,89%**
oTM gesamt (%)		5,59%	5,59%
Mais Gärprodukt (t)		6.214 t	24.855 t
Rindergülle Gärprodukt (t)		4.501 t	18.004 t

Biogas-Modellanlage		**Variante 1 (1 BHKW)**	**Variante 2 (4 BHKWs)**
elektrische Leistung		500 kW	2000 kW
thermische Leistung		524 kW	2096 kW
thermische Leistung für Gärpr. Aufbereitung verfügbar		393 kW	1572 kW
erzeugte th. Energie	8.000 h	4.192.000 kWh	16.768.000 kWh
th. Energie für Fermenterbeheizung (25%)	8.000 h	1.048.000 kWh	4.192.000 kWh
th. Energie für Gärpr. Aufbereitung verfügbar	8.000 h	3.144.000 kWh	12.576.000 kWh
el. Wirkungsgrad (%)	38 %		
th. Wirkungsgrad (%)	40 %		
Vorlauf Temperatur (°C)	80 °C		
Biogasverbrauch pro Stunde (52,2% CH4)		252,7 m³/h	1010,9 m³/h
Mais - Biogasertrag (Normgas) je Tonne FM	216,1 m³/t FM		
TM % (Trockenmasse)	35%		
Methangehalt (%) Mais	52,0 Vol.-%		
Rindergülle - Biogasertrag (Normgas) je Tonne FM	30,4 m³/t FM		
TM % (Trockenmasse)	10%		
Methangehalt (%) Rindergülle	55,0 Vol.-%		
Maisanteil (35% TM)	65 %	8.699 t	34.795 t
Rindergülleanteil (10% TM)	35 %	4.684 t	18.736 t
Methan je Tonne Input (65% Mais / 35% Gülle)	78,89 m³/t FM		
Methangehalt je Tonne Input (65% Mais / 35% Gülle)	52,2%		
Tonnen Substrat gesamt (p.a.)		**13.383 t**	**53.530 t**

Insgesamt wurden 97 Hersteller, die Gärproduktaufbereitungsanlagen herstellen und vertreiben, durch Internetrecherche ausfindig gemacht. Dabei handelt es sich in der Regel um Hersteller bereits marktgängiger Verfahren, aber vereinzelt auch um Anbieter, die Pilotanlagen betreiben und noch keine Anlage in die Praxis umgesetzt haben. Es wurden 23 Hersteller bezüglich eines Angebotes angefragt. Insgesamt sind 12 Angebote verschiedener Verfahren und Hersteller eingegangen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Angebotseingang zu verschiedenen Aufbereitungstechnologien für die angefragten Größenklassen

Technologie	**Angebot 500 kW**	**Angebot 2 MW**
Separation	1	-
Bandtrockner	2	1
Solares Verfahren	1	1
Stripverfahren	-	1
Vakuumverdampfung	2	2
Membranverfahren	-	1

Die technischen sowie ökonomischen Daten der eingegangenen Angebote wurden für die Bewertung der Emissionen und der ökonomischen Vorteilhaftigkeit herangezogen. Zu beachten ist jedoch, dass es sich hierbei um Herstellerangaben handelt, die abhängig von den Substrateigenschaften oder der Betriebsweise abweichen können. Darüber hinaus wurden nicht alle der angefragten Daten übermittelt, so dass auch hier bezüglich einiger Parameter (z.B. bauseitige Kosten) Annahmen getroffen werden mussten. Die Güte der Angebote wies starke Varianzen auf. So wurden beispielsweise manche Angebote nicht auf die angegebenen Gärproduktmengen angepasst oder manche erwünschten Werte nicht geliefert. Die nachfolgenden ökonomischen sowie technischen Daten wurden erbeten.

Erbetene ökonomische Daten:

- Investitionssumme (€)
- Bauseitige Kosten (€)
- Inbetriebnahme Kosten (€)
- Wartungskosten (€/a)
- Stillstandzeiten für die Wartung (Tage)
- Sonstige Kosten (€)

Erbetene technische Daten:

- Anschlussleistung aller Komponenten (kW_{el})
- Stromverbrauch der einzelnen Komponenten bei Regelbetrieb (kWh_{el}/m^3)
- Kapazität der einzelnen Komponenten (m^3/h)
- Wärmebedarf für die Aufbereitung einer Tonne Gärprodukt sowie Wärmebedarf je Kubikmeter verdampften Wassers (kWh_{th}/m^3 H_2O)
- Stoffströme der einzelnen Verfahrensschritte (t)
- Trockenmassegehalt der Gärprodukte nach den einzelnen Verfahrensschritten (%)
- Volumen- und Schüttdichten der erzeugten Gärprodukte (kg/m^3)
- Arbeitszeitaufwand (h)
- Betriebsstunden der Anlage (h/a)
- Betriebsmittel (Liter/a)
- Verschleißteile (Art und Anzahl)

2.2 Management und Flexibilität (TU Berlin)

Den für die Evaluation der Gärrestaufbereitungsverfahren benötigten Daten liegen Herstellerangebote zu Grunde. Hieraus konnten spezifische Energiebedarfe abgeleitet werden. Diese wurden an realen Anlagen in Stichproben nachgemessen sowie in einer theoretischen Betrachtung nachgerechnet und auf Plausibilität geprüft. Weiterhin wurden an den ausgewählten großtechnischen Anlagen regelmäßig Gärrestproben von allen Produkten und Zwischenprodukten gezogen und analysiert. Durch Bilanzierung der Stoffströme über die einzelnen Verfahrensschritte erfolgte die Ermittlung von Abscheidegraden. Mit deren Hilfe war es möglich, die Prozesse anhand eines einheitlichen Modellgärrests für die Leistungsklassen 500 kW und 2.000 kW zu modellieren und Energie- und Prozessmittelverbräuche zu bestimmen. Weitere Informationen, bspw. bezüglich der Betriebssicherheit und des Prozessmittelverbrauchs, wurden in Gesprächen mit Anlagenbetreibern und Herstellern gewonnen.

Unsicherheiten in der Modellierung der Gärrestaufbereitungsverfahren rühren hauptsächlich aus den Probenanalysen und der Stoffstrombilanzierung her. Da ausschließlich stichprobenartig beprobt wurde, kann nicht von einer repräsentativen Statistik ausgegangen werden. Bei der Ermittlung der Abscheidegrade aus den Probenanalysen und Stoffstrombilanzen traten dementsprechend große Standardabweichungen auf, was allerdings auch auf die Diversität der Gärreste zurückzuführen ist. Diese schwanken bereits im Rohzustand stark in ihrer Zusammensetzung bedingt durch die verschiedenen Biogassubstrate, Vorbehandlungstechnologien, Fermentationsbedingungen u.v.m., weshalb eine statistisch repräsentative Datenerhebung nur anlagenspezifisch machbar und damit nicht wirklich auf andere Anlagen übertragbar ist. Dennoch deckten sich die Ergebnisse weitestgehend mit den Aussagen der Hersteller und Anlagenbetreibern sowie der Literatur.

Die Bilanzgrenzen wurden um den jeweilig betrachteten Verfahrensschritt gezogen. Im Detail bedeutet dies eine Bestimmung des eingehenden Massenstroms und der ausgehenden Massenströme direkt vor und hinter dem Verfahrensschritt. Ebenso erfolgte die Bilanzierung der Energieströme, die der Verfahrensschritt benötigt, um den Eingangsstrom zu behandeln. Durch diese Vorgehensweise, Zerstückelung des Verfahrens in einzelne Verfahrensschritte, war es möglich, die teils unterschiedlich dimensionierten Anlagenkomponenten aufeinander abzustimmen.

Grundlegende Kriterien für die Bewertung des Kriteriums „Management und Flexibilität“ sind der Bedarf an thermischer Energie, Art, Menge und Anzahl der benötigten Betriebsmittel sowie Bedien- bzw. Wartungsaufwand und Betriebssicherheit. Der thermische Energiebedarf fließt deshalb in die Betrachtung ein, da Schwankungen im Wärmeangebot die Verfahren unterschiedlich stark stören. Die Anzahl der Betriebsmittel wiederum beeinflusst die Komplexität für die Bediener. Diese Eigenschaften werden in Form einer Punkteskala (-- bis ++) ausgedrückt und sind in Kapitel 3.6 dargestellt. Verfahren sammeln weiterhin Punkte, wenn eine geringe Empfindlichkeit gegenüber schwankenden Feststoffgehalten und Volumenströmen besteht. Generell ist festzuhalten, dass die Verfahren mit zunehmender Komplexität auch anfälliger für Störungen werden und die Anforderungen an das Personal steigen. Damit geht ebenfalls eine geringere Flexibilität einher.

Für eine genauere Beschreibung der einzelnen Verfahren wird auf den ausführlichen Abschlussbericht des Teilvorhabens 2 der TU Berlin verwiesen. Alternativ hierzu bieten auch Al Seadi et al. (2013) oder Fuchs und Drosg (2010) einen sehr guten Verfahrensüberblick.

2.3 Ökonomische Betrachtung (HfWU)

2.3.1 Methoden zur Ermittlung der ökonomischen Kennzahlen

Für den ökonomischen Vergleich verschiedener Nutzungspfade wurde eine dynamische Investitionsrechnung angewendet und das Ergebnis als Kapitalwert sowie als internen Zinsfuß (Internal Rate of Return, IRR) ausgedrückt. Allerdings lieferte der IRR für viele Typen keine sinnvollen Werte (z.B. bei negativem Kapitalwert oder extrem hohen Verzinsungen). In diesen Fällen wurde von der Darstellung des IRR abgesehen.

Die hier vorgenommenen ökonomischen Bewertungen können jedoch nur als Anhaltspunkte dienen, da sich trotz typenspezifischer Bewertung anlagenspezifische Variablen, wie die Betriebsweise, stark auf z.B. den Energieverbrauch der Anlage und damit auf die Wirtschaftlichkeit auswirken können.

Geld ist zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedlich viel wert, da in der Regel immer eine Verzinsung stattfindet. Der Kapitalwert gibt den Wert des Geldes zum Zeitpunkt null an und wird durch Abzinsung ermittelt. Dadurch können verschiedene Zahlungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten (z.B. über eine fünfzehnjährige Nutzungsdauer einer Investition) verglichen werden. Die Höhe des Kapitalwertes ist dabei abhängig von dem Zinssatz, der sich wiederum aus einem risiko-

freien Zins und einer Risikoprämie zusammensetzt. Der Zinssatz des Eigenkapitals wurde in der hier vorgelegten ökonomischen Bewertung mit 10 % angenommen (Cost of Equity, NYU Stern 2016). In Kapitel 5 wird dieser Zinssatz variiert und die Auswirkungen auf den Kapitalwert werden beispielhaft dargestellt.

Summiert man die Barwerte aller Zahlungen einer Investition, erhält man den Kapitalwert. Ist dieser positiv, so gilt die Investition bei einem gegebenen Zinssatz als vorteilhaft. Bei einem negativen Kapitalwert ist von der Investition abzusehen.

Der IRR ist der Zinssatz, bei dem der Kapitalwert einer Zahlungsreihe gleich null wird. Er gibt dabei den Zinssatz an, der maximal angenommen werden darf, wenn von der Investition nicht abgesehen werden soll. Der IRR kann grafisch ermittelt werden. Er markiert dabei den Punkt, an dem die Funktion des Kapitalwertes in Abhängigkeit des Zinssatzes (i) die Abszisse schneidet, i also gleich null ist. Daneben bietet sich das sogenannten Regula-falsi-Verfahren an, bei dem sich dem IRR mathematisch angenähert wird.

Die Gleichung hierfür lautet: $$IRR = i_1 - C_{01} * \frac{i_2 - i_1}{C_{02} - C_{01}}$$

Die Zinssätze i_1 und i_2 müssen so gewählt werden, dass sich ein positiver und ein negativer Kapitalwert (C_{01}) ergeben.

Sowohl die Kapitalwertmethode als auch die IRR-Methode sind Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung. Sie unterscheiden sich methodisch in der Wiederanlageprämisse: Bei der Kapitalwertmethode ist die Prämisse, dass die kumulierten Überschüsse umgehend in der Höhe des angenommenen Zinssatzes angelegt werden, während beim IRR alle Zahlungsüberschüsse zum IRR wieder angelegt werden. Außerdem ist der IRR unabhängig von der absoluten Höhe der Investition, der Kapitalwert nicht. Für die Beurteilung einer Investition ist die Betrachtung beider Kennzahlen sinnvoll, da ein positiver IRR nicht die Höhe des Gewinns wiederspiegelt.

2.3.2 Auswertung

Zur Ermittlung der o.g. Kennzahlen wurde ein Excel-Tool erstellt. In der Excel Eingabemaske können die relevanten Kenngrößen aus den Angeboten eingegeben werden. Diese werden abhängig von den Angeboten individuell abgeändert. Die konstanten Parameter, wie z.B. die Menge an zu behandelnden rohen Gärprodukten, verändern sich innerhalb einer Variante hingegen nicht. In Abbildung 1ist ein Screenshot der Excel-Eingabemaske dargestellt.

3	Position	Einheit	Betrag bzw. Betrag	Inflationierung [
4				
5	**Grunddaten**			
6	Anlagenleistung	to/h	5,3575	
7	Volllaststunden / Jahresbetriebsstunden	h/a	8.000	
8	Verarbeitungsmenge Rohgärrest	to/a	42.860	
9	Erzeugungsmenge Gärprodukt 1(ASL)	to/a	42.860	
10	Erzeugungsmenge Gärprodukt 2 (Bandtrockn	to/a		
11	Erzeugungsmenge Gärprodukt 3 (Konzentrat	to/a		
12	Erzeugungsmenge Gärprodukt 4 (Destillat)	to/a		
13	Auslastung erstes Betriebsjahr	%	50%	
14				
15	**KWK-Bonus-Berechnung**			
16	Stromeinspeisemenge	kWh/a	16.000.000	
17	Wärmeverbrauch pro Jahr	kWh/a	12.576.000	
18	Maximale Wärmebereitstellung pro Jahr	kWh/a	16.768.000	
19	Elektrische Leistung BHKW	kWel	2.000	
20	Thermische Leistung BHKW	kWth	2.096	
21	Stromkennzahl		0,954	
22	Elektrischer Wirkungsgrad laut Hersteller		38%	
23	Thermischer Wirkungsgrad laut Hersteller			
24	Jahresstunden	h/a	8.000	
25	KWK-Bonus pro kWh	Euro/kWh	0,03	
26	KWK-Bonus gesamt	Euro/a	128.611	
27				
28	**Erlösberechnung**			
29	Preis Gärprodukt 1	Euro/to	0,89	2,00%
30	Preis Gärprodukt 2 (Bandtrockner)	Euro/to		2,00%
31	Preis Gärprodukt 3	Euro/to		2,00%
32	Preis Gärprodukt 4	Euro/to		2,00%
33	Ausbringungskosten unbehandelter Gärrest	Euro/to	12,43	2,00%
34				
35				
36				
37	Investition	Euro	561.400,00	
38	Abschreibungsdauer	a	15	
39	Abschreibung	Euro/a	37.426,67	
40	Verbrauch Strom pro Volllaststunde	kWh/h	59,11	
41	Verbrauch Strom gesamt pro Jahr	kWh/a	472.896,00	
42	Strompreis	Euro/kWh	0,15	2,00%
43	Aufwand Strom gesamt pro Jahr	Euro/a	70.934,40	2,00%
44	Personalaufwand	Euro/a	6.000,00	2,00%
45	Aufwand Wartung/Instandhaltung	% der Investitionssumme	3,00%	2,00%
46	Verbrauch Hilfs- und Betriebsstoff 1	kg/to Output	0,00	
47	Preis Hilfs- und Betriebsstoff 1	Euro/kg	0,00	2,00%
48	Aufwand Hilfs- und Betriebsstoff 1	Euro/a	0,00	2,00%
49	Verbrauch Hilfs- und Betriebsstoff 2	kg/to Output	0	
50	Preis Hilfs- und Betriebsstoff 2	Euro/kg	0	2,00%
51	Aufwand Hilfs- und Betriebsstoff 2	Euro/a	0	2,00%
52			1	
53	Transport- und Ausbringungskosten	Euro/T	8,28	2,00%
54	Transport- und Ausbringungskosten	Euro	354984,1708	2,00%
55				
56	Fremdfinanzierungsanteil	% der investitionssumme	80%	
57	Fremdfinanzierungsssumme	Euro	449.120,00	
58	Zinssatz Fremdfinanzierung	%	3,00%	
59	Annuität		-37.621,25	

Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung der Excel-Eingabemaske (Foto: J. Dahlin)

Nach Eingabe der variablen Größen werden die Finanzindikatoren automatisch berechnet.

Die Angebotsdaten sollten jedoch mit Vorsicht betrachtet werden und stellen eine methodische Unsicherheit dar. Zum einen, weil nicht immer alle erwünschten Daten zur Verfügung standen (z.B. Wartungs- und Arbeitskosten) oder das Angebot nicht angepasst wurde und zum anderen, weil diese Angebotsdaten nicht abgesichert sind und in einem möglichen Praxisbetreib abweichen könnten. Deshalb werden in Kapitel 5 für bestimmte Annahmen zusätzlich Sensitivitäten berechnet.

Methodische Unsicherheiten ergeben sich außerdem daraus, dass einige Hersteller erst wenige Praxisanlagen umgesetzt haben.

2.3.3 Ergänzende Betrachtung der Energiekennzahl

Bei der Energiekennzahl handelt es sich um ein Instrument zum Vergleich unterschiedlicher Verfahren hinsichtlich ihrer Energieeffizienz. Es wird hier im Rahmen der ökonomischen Beurteilung zusätzlich zu den Spitzenkennzahlen Kapitalwert und IRR dargestellt, um einen Eindruck von der Energieeffizienz der Verfahren zu vermitteln, da die Energiekosten die Gesamtkosten eines Verfahrens erheblich beeinflussen können. Es wird zwischen weiterführenden Aufbereitungsverfahren und der Separation unterschieden, da bei der Separation aus physikalischen Gründen ein alternatives Referenzverfahren herangezogen werden muss. Generell drückt diese Zahl aus, ob das betrachtete Verfahren effizienter oder ineffizienter als das Referenzverfahren ist. Dabei sprechen Werte > 1 für eine höhere Effizienz, Werte < 1 für eine geringere.

2.3.3.1 Weiterführende Aufbereitungsverfahren

Die eigens für die energetische Bewertung der Verfahren entwickelte thermische Leistungskennzahl errechnet sich nach folgender Formel:

$$\varepsilon = \frac{\text{theoretischer Nutzen}}{\text{realer Aufwand}} = \frac{q_{\text{ideal}}}{q + \frac{w}{\eta}}$$

mit

q_{ideal}	:	Benötigte Wärme bei idealer Betrachtung
q	:	Vom Verfahren benötigte Wärme
w	:	Vom Verfahren benötigte elektrische Energie
η	:	Wirkungsgrad des Blockheizkraftwerks (BHKW): 35 %.

Hierbei beschreibt q_{ideal} die unter optimalen Bedingungen theoretisch vom Prozess benötigte Wärmeenergie, um das Prozessziel zu erreichen. Im Falle der aufkonzentrierenden Verfahren, somit allen außer dem Stripverfahren, wird als q_{ideal} für das extrahierte Wasser die spezifische Verdampfungsenthalpie von Wasser bei 100 °C herangezogen. Diese entspricht 627 kWh t^{-1}. Im Falle des Stripverfahrens kommt noch die benötigte Wärmemenge für das Erhitzen des Gärrests auf 90°C hinzu, da es sich bei diesem Verfahren nicht um ein aufkonzentrierendes Verfahren handelt und somit der Hauptaufwand in der Erwärmung des Gärrests auf die Prozesstemperatur liegt. Bei allen anderen Verfahren wird hierauf verzichtet, da das Aufwärmen vernachlässigbar ist. Das Referenz-

verfahren für den theoretischen Nutzen entspricht daher einer Verdampfung unter Umgebungsdruck mittels Wärmeenergie. Im Nenner steht die Summe der vom Prozess benötigten Energien in Form von Wärme q und der Arbeit bzw. elektrische Energie w. Da die elektrische Energie zuvor aus Wärme gewonnen werden muss, erfolgt eine Gewichtung der Energien. Die elektrische Energie wird durch den elektrischen Wirkungsgrad des BHKWs geteilt, der mit 35 % angenommen wurde. Die thermische Leistungskennzahl ist kein Wirkungsgrad, da sie prinzipiell Werte zwischen null und unendlich annehmen kann und ist mit der Leistungszahl einer Wärmepumpe/Kälteaggregat zu vergleichen. Werte unter eins drücken aus, dass das Verfahren weniger effizient ist als die Referenz, Werte über eins drücken eine höhere Effizienz aus. Der Nutzen bei der Betrachtung des unbehandelten Gärrests ist null und somit auch die thermische Leistungskennzahl.

2.3.3.2 Sonderfall Separation

Im Falle der Separation ergeben sich nach dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Verfahren sehr hohe Kennzahlen, da es sich hierbei um eine mechanische Vorentwässerung handelt. Die theoretische Betrachtung der mechanischen Separation für die Bestimmung eines geeigneten Referenzverfahrens gestaltet sich als schwierig, da kein energetisch logischer Nutzen definiert werden kann. Um für reine Separationsaufgaben dennoch eine sinnvolle Energiekennzahl zu erhalten, wurde die Pressschnecke als Referenzverfahren herangezogen. Dies ist durch die Einsatzhäufigkeit der Pressschnecke an landwirtschaftlichen Biogasanlagen und in Aufbereitungsverfahren begründet.

In diesem Fall entspricht der Nutzen dem Energieaufwand, den eine Pressschnecke hat, um eine Tonne Feststoff bezogen auf die Trockenmasse abzuscheiden. Der Aufwand wird durch den spezifischen Energiebedarf ($P_{s,TM}$) des betrachteten Verfahrens dargestellt. Dieser setzt sich aus der benötigten Wärmeenergie und der um den BHKW-Wirkungsgrad bereinigten elektrischen Energie zusammen. Dies wird auf die Trockenmasse des abseparierten Feststoffs bezogen.

Die Energiekennzahl (ε) für die Separation errechnet sich im Anschluss aus dem *Nutzen*: spezifischer Energiebedarf der Pressschnecke und dem *Aufwand*: spezifischer Energieaufwand des betrachteten Separationsverfahrens. Im Falle eines Pressschneckenseparators ist dies folglich 1.

$$P_{s,TM} = \frac{q + \frac{w}{\eta}}{TM_{\text{Feststoff}}}$$

$$\varepsilon = \frac{\text{spez. Energiebedarf Pressschnecke}}{\text{spez. Energiebedarf d. Verfahrens}} = \frac{P_{\text{s, TM, PSS}}}{P_{s,\ TM}}$$

mit

$TM_{\text{Feststoff}}$: Trockenmasse des Feststoffs

$P_{s,TM}$: Spezifischer Energiebedarf bezogen auf die Trockenmasse des separierten Feststoffs

$P_{s,TM,PSS}$: Spezifischer Energiebedarf der Pressschnecke

Der spezifische Energiebedarf berücksichtigt hier ebenfalls thermische Energie sowie den BHKW-Wirkungsgrad, obwohl es sich bei der Separation um einen mechanischen Trennschritt handelt. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass auch Entwässerungsverfahren existieren, die ebenfalls thermische Energie nutzen, um einen höheren Trockenmassegehalt im Produkt zu erhalten. Nicht einbezogen wird bei der Kennzahl der eventuelle Einsatz von Flockungshilfsmitteln bei anderen Verfahren, wie zum Beispiel einer Dekanterzentrifuge.

2.4 Treibhausgasemissionen und Energieaufwand (KTBL)

Für die Beurteilung der Klimawirksamkeit und des Energieverbrauchs der verschiedenen Aufbereitungsverfahren werden die Aufwendungen (kumulierter Energieaufwand[2]) und die damit verbundenen Emissionen durch die Aufbereitung und Verwertung der entstehenden Produkte berücksichtigt. Der Ersatz von Mineraldünger durch die im Gärrest und den Aufbereitungsprodukten enthaltenen Nährstoffe wird dabei in die Beurteilung einbezogen. Für die Bilanzierung der Emissionen sind zudem direkte gasförmige Emissionen relevant. Neben den direkt klimawirksamen Gasen Lachgas (N_2O) und Methan (CH_4) ist dies auch der indirekt klimawirksame Ammoniak (NH_3). Tabelle 5 führt die berücksichtigten Faktoren auf. Die Energieaufwendungen und Emissionen werden denen aus der Verwertung des unbehandelten Gärrests gegenübergestellt.

Tabelle 5: Faktoren für die Treibhausgas- und Energiebilanzierung der Gärrestaufbereitung

<table>
<tr><th></th><th>Aufbereitung</th><th colspan="3">landwirtschaftliche Verwertung der Aufbereitungsprodukte bzw. des unbehandelten Gärrests</th></tr>
<tr><th></th><th>Anlagenerrichtung und –betrieb</th><th>Lagerung</th><th>Transport</th><th>Ausbringung</th></tr>
<tr><td>Vorleistungen Materialien</td><td colspan="2">Materialbedarf für Errichtung Gebäude und Herstellung Technik</td><td colspan="2">Materialbedarf für Herstellung Transport- und Ausbringtechnik</td></tr>
<tr><td>Energiebereit-stellung</td><td>Strom-, Wärmebedarf</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">Vorleistungen Betriebsmittel-produktion</td><td rowspan="2">Schwefelsäure, Natron-lauge, Flockungsmittel etc.</td><td rowspan="2"></td><td colspan="2">Dieselverbrauch Transport und Ausbringung</td></tr>
<tr><td></td><td>eingesparter Mineraldünger</td></tr>
<tr><td>Direkte Emissionen</td><td>ggf. NH_3-Emissionen</td><td>NH_3-, N_2O- und CH_4-Emissionen bei nicht-gasdichter Lagerung</td><td></td><td>NH_3-Emissionen nach Ausbringung</td></tr>
</table>

[2] Der Kumulierte Energieaufwand ist nach der VDI-Richtlinie 4600 (VDI 2012) definiert als „die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Guts (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann."

Basis der Berechnungen sind Stoffstrommodelle für die betrachteten Aufbereitungsverfahren. In diesen modular aufgebauten Berechnungen werden die Anfallmengen und die Nährstoffzusammensetzung der in den Verfahren entstehenden Produkte und der damit verbundene Energiebedarf ermittelt. Dabei kann bis auf wenige Ausnahmen auf die von der TU Berlin im Teilvorhaben 2 abgeleiteten Abscheidegrade und Energiekennzahlen zurückgegriffen werden. Nährstoffverluste, z.B. in Form von NH_3 bei einer Trocknung ohne Abluftreinigung, werden ebenfalls berücksichtigt.

Anschließend wird für das festgelegte Entfrachtungsziel ermittelt, welche Mengen der anfallenden Produkte in den einzelnen Verfahren überregional verwertet werden müssen. Da Phosphor durch die vorgeschalteten Separationsverfahren zu einem höheren Anteil als die anderen Nährstoffe in den Festprodukten abgeschieden wird, werden bei der Zielgröße Phosphorentfrachtung zunächst die Festprodukte für den Ferntransport berücksichtigt. Kann das Entfrachtungsziel durch den Export des gesamten Festproduktanfalls nicht erreicht werden, muss auch ein Teil der anfallenden Flüssigprodukte überregional verwertet werden. Für Sensitivitätsrechnungen (Kapitel 5), die auf eine Stickstoffentfrachtung abzielen, wird bei Verfahren, in denen Ammoniumsulfatlösung (ASL) anfällt (Stripverfahren, Vakuumverdampfung, Trocknung mit Abluftreinigung), zunächst diese für die überregionale Verwertung herangezogen und erst im nächsten Schritt Fest- bzw. weitere Flüssigprodukte. Lediglich beim Membranverfahren bietet sich aufgrund ähnlicher N_{tot}- bei höheren NH_4-N-Gehalten ein Export des Konzentrats statt der Festphase an. Je nach Verfahren und Entfrachtungsziel ergeben sich so für jedes Produkt unterschiedliche Volumina und damit Energieaufwendungen und Treibhausgasemissionen für den Ferntransport.

Da eine landwirtschaftliche Verwertung der Gärreste und Aufbereitungsprodukte angenommen wird, kann je nach Verfahren unterschiedlich viel Mineraldünger eingespart und somit Energieaufwand und Treibhausgasemissionen aus dessen Herstellung vermieden werden. Bevor diese Einsparung berechnet werden kann, müssen jedoch gasförmige N-Verluste aus Lagerung (N_2O, NH_3) und Ausbringung (NH_3) von der im Gärrest bzw. den Produkten enthaltenen N-Menge abgezogen werden (Tabelle 5)Für den unbehandelten Gärrest entstehen diese nur aus dem überregional gelagerten Anteil, da auf der Anlage eine gasdichte Lagerung realisiert werden kann. Die verbleibenden N-Mengen, die schließlich mit Gärrest bzw. den Produkten in den Boden und damit an die Pflanze gelangen, sind jedoch nicht umgehend vollständig pflanzenverfügbar.

Für die Abschätzung des Mineraldüngerersatzes wird daher für Stickstoff derzeit lediglich das Jahr der Anwendung betrachtet, da die Nachlieferung aus dem organisch gebundenen Anteil in den Folgejahren nur sehr schwer abzuschätzen ist. Es wird nur der in Form von Ammonium-N vorliegende Anteil (NH_4-N) angerechnet sowie nach VDLUFA 5 % des organisch gebundenen Anteils (N_{org}). Phosphor kann bei einer langfristigen Betrachtung zu 100 % berücksichtigt werden. Für die so ermittelten pflanzenverfügbaren Nährstoffmengen werden Energieaufwendungen und anfallende Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung der äquivalenten Menge an Mineraldünger entstehen, den jeweiligen Verfahren gutgeschrieben.

Folgende Entfrachtungsszenarien wurden bei der Treibhausgasbilanzierung betrachtet:

- 50 % der Phosphorfracht im unbehandelten Gärrest
  Die Ergebnisse dieses Szenarios sind die Grundlage für die Bewertung der Verfahren im Kapitel 4.
- 50 % der Stickstofffracht im unbehandelten Gärrest
  Dieses Szenario wurde als Sensitivitätsbetrachtung gewählt. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.1 dargestellt.
- alle Nährstoffe
  Die Ergebnisse bei Annahme einer vollständigen Entfrachtung werden nicht im Detail besprochen, aber in Kapitel 5.1 kurz zusammengefasst.

Dabei wurde von einer Transportentfernung von 300 km in die Ackerbauregion ausgegangen.

Um den Einfluss des jeweiligen Aufbereitungsverfahrens auf die Treibhausgasbilanz der Biogasstromproduktion einordnen zu können, wird die Bilanz auf die gesamte Produktionskette erweitert. Einsparungen an Treibhausgasemissionen im Vergleich zum konventionellen Strommix werden als wichtiges Argument für die Biogaserzeugung angeführt. Sofern sich durch das Aufbereitungsverfahren Bruttoemissionen gegenüber dem unbehandelten Gärrest ergeben, verringert dies das Potenzial der Biogasstromproduktion zur Treibhausgasminderung gegenüber konventionellen Stromquellen. Im umgekehrten Fall würden Minderemissionen eine zusätzliche Einsparung im Vergleich zu einer Nicht-Behandlung des Gärrestes ermöglichen.

Es werden hierbei zwei Varianten mit und ohne Berücksichtigung der Emissionen aus der Wärmeerzeugung berechnet. Für die Variante mit Berücksichtigung der Wärme wird als Referenz von einer vollständigen externen Nutzung der nach Abzug der Fermenterbeheizung noch zur Verfügung stehenden BHKW-Abwärme ausgegangen. Aufbereitungsverfahren mit Wärmebedarf verdrängen daher eine externe Wärmenutzung und verringern so die Einsparung an fossilen Ressourcen. Die dadurch entstehenden Treibhausgasemissionen werden dem Verfahren als Emission angerechnet.

In der Betrachtung der Emissionen des Biogasstroms verringert die für den Aufbereitungsprozess benötigte Wärmemenge die Wärmegutschrift in entsprechendem Umfang, denn eine Gutschrift auf den Biogasstrom kann nur für eine Wärmenutzung angerechnet werden, durch die tatsächlich konventionelle Wärme ersetzt wird, wie z.B. bei einem Nahwärmenetz.

Methodische Unsicherheiten

Für einige Faktoren stehen zum jetzigen Zeitpunkt keine ausreichend detaillierten oder abgesicherten Daten zur Verfügung:

- Anlagenerrichtung:

Für die Berechnung der Emissionen konnte für einige Verfahren keine umfassende Aufstellung der verbauten Materialien oder Aggregate zur Verfügung gestellt werden. Hier musste auf Abschätzungen zurückgegriffen werden. Der Einfluss auf das Ergebnis ist jedoch im Vergleich zu Faktoren wie Energieverbrauch oder Ferntransport gering.

- Datenbasis Membranverfahren:
  Für das Membranverfahren konnte kein kompletter Datensatz an einer bestehenden Anlage erfasst werden. Zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Berichts lag zudem kein Angebot eines Herstellers vor.
- Emissionsfaktoren Lagerung und Ausbringung:
  Derzeit liegen noch keine abgesicherten Emissionsfaktoren für die verschiedenen Aufbereitungsprodukte vor. Daher werden Emissionsfaktoren des landwirtschaftlichen Emissionsinventars für feste und flüssige Wirtschaftsdünger sowie, wo vorhanden, Gärresten aus der Wirtschaftsdüngervergärung verwendet. Aufgrund der hohen Treibhausgasrelevanz insbesondere von Lachgas können Anpassungen der Emissionsfaktoren einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der Berechnungen haben.
- Mineraldüngeräquivalente:
  Derzeit stehen nur für eine Auswahl der Produkte Mineraldüngeräquivalente aus Feldversuchen zur Verfügung (Teilvorhaben 3). Um eine Gleichbehandlung aller Produkte zu gewährleisten, wurde in den Berechnungen des Teilvorhabens 4 auf die oben beschriebene Berechnung des pflanzenverfügbaren Stickstoffs auf Basis der NH_4-N und N_{org}-Gehalte zurückgegriffen. Eine Ergänzung von produktspezifischen Mineraldüngeräquivalenten, die auf einer breiteren Datenbasis beruhen, ist wünschenswert. Für eine umfassende Bewertung der Aufbereitungsprodukte im Vergleich zu Mineraldüngern oder auch zum unbehandelten Gärrest müsste zudem auch die Humuswirkung berücksichtigt werden.

3 Verfahrensvergleich

3.1 Vorgehensweise

In dem nachfolgenden Kapitel wird für die Kriterien „Management und Flexibilität“, „Landwirtschaftliche Nutzbarkeit“, „Entfrachtungspotenzial“ und „Treibhausgasemissionen“ eine typenübergreifende Beurteilung der jeweiligen Aufbereitungsverfahren vorgenommen. Für die ersten drei Kriterien waren die Unterschiede zwischen den Typen nicht vorhanden oder sehr gering, so dass eine differenzierte Betrachtung wie sie in Kapitel 4 vorgenommen wird, nicht angezeigt erschien. Für die Treibhausgasemissionen zeigen sich lediglich Unterschiede in Abhängigkeit von der Berücksichtigung der Wärmenutzung durch die Aufbereitung. Daher werden die Ergebnisse für dieses Kriterium ebenfalls hier dargestellt.

3.2 Management und Flexibilität (TU Berlin)

3.2.1 Übersicht

Tabelle 6 gibt eine Übersicht über die Bewertung der einzelnen Verfahren bezüglich Management und Flexibilität. Die Erläuterungen zu den einzelnen Verfahren finden sich in den folgenden Abschnitten.

Tabelle 6: Übersicht der Parameter Flexibilität und Management

Verfahren	Flexibilität / Management
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	+
Separation (Pressschnecke)	++
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	0
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	0
Stripverfahren (mit Pressschnecke)	+
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	+
Membranverfahren (mit Dekanterzentrifuge)	-

3.2.2 Rohgärrest (ohne Aufbereitung)

Im Falle der direkten Ausbringung oder Lagerung des unbehandelten Gärrests fällt kein zusätzlicher Aufwand hinsichtlich Betriebsmitteln, Wartung, Wärme oder Elektrizität an. Der Rohgärrest ist pumpfähig und kann in das Gärrestlager gepumpt werden. Hierbei besteht nur eine niedrige Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen im Feststoffgehalt. Allerdings können sich hier Deck- und Sinkschichten bilden, da die Feststoffe nicht abgeschieden wurden. Diese müssen vor der Ausbringung dann durch Rühren aufgelöst werden, was einen entsprechenden Stromverbrauch nach sich zieht. Schwankungen in der Gärrestmenge müssen durch ein entsprechend großes Lagervolumen abgedeckt werden.

3.2.3 Separation (mit Pressschnecke)

Probleme mit Deck- oder Sinkschichten werden durch die Pressschnecke vermieden, bei Beschickung erfolgt die Separierung automatisiert. Zur Vorbereitung bedarf es einer Befüllung mit Feststoffen, bspw. Stroh, damit der Gärrest im Sieb zurückgehalten wird. Weiterhin muss der Pressdruck der Feststoff-Rückhalteklappen eingestellt werden. Dies geschieht in der Regel jedoch durch den Hersteller bei der Erstinbetriebnahme. Der Wartungs- und Betriebsaufwand ist gering. In Bezug auf Verschleißteile ist maßgeblich das Sieb zu nennen, dessen Spaltweite sich auf Dauer durch Abrieb vergrößert. Der Pressschneckenseparator arbeitet unabhängig von BHKW-Abwärme. Gegenüber Schwankungen des Volumenstroms oder Feststoffgehalts ist der Pressschneckenseparator unempfindlich, besondere fachliche Anforderungen an das bedienende Personal bestehen nicht.

3.2.4 Bandtrockner (mit Pressschnecke und Abluftreinigung)

Da sich das betrachtete Aufkonzentrationsverfahren und das Bandtrocknungsverfahren sehr ähneln, werden diese gemeinsam behandelt. Beide sind von der bereitgestellten BHKW-Abwärme abhängig. Aufgrund der geringen Temperaturdifferenz im Kühlwasser/Luft-Wärmetauscher beeinflussen Temperaturschwankungen im Kühlwasser den Anlagenbetrieb stark und senken somit die Betriebssicherheit. Diese Temperaturschwankungen können durch kurzzeitige Abschaltung des BHKWs oder Wärmeauskopplungen in andere Prozesse hervorgerufen werden. Beide Verfahren haben einen vergleichsweise geringen Wartungs- und Bedienbedarf und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber den Feststoffkonzentrationen auf. In der Aufkonzentration wird „roher“ Gärrest behandelt, hier ist auf die Pumpbarkeit des Konzentrats zu achten, während dem Bandtrockner ausschließlich tropffreier Feststoff zugemischt werden kann. Die Verbrauchsmittel dieser Anlagen beschränken sich neben Schmierstoffen auf zugegebene Säure (hier: Schwefelsäure), wenn ein Abluftwäscher installiert ist. Das bedienende Personal sollte hinsichtlich der Handhabung der Betriebsstoffe, insbesondere konzentrierter Schwefelsäure, eingewiesen sein.

3.2.5 Solares Verfahren (mit Pressschnecke, ohne Abluftreinigung)

Eine weitere Möglichkeit der Gärresttrocknung besteht darin, diese in einer glasüberdachten Lagune mittels Sonnenergie zu trocknen. Ein Glashaus mit einer Grundfläche von 1.000 m² liefert im Jahresdurchschnitt rund 100 kW zusätzliche thermische Leistung. Das Verfahren ist verhältnismäßig einfach aufgebaut, der separierte Feststoff oder sogar der Rohgärrest werden batchweise (in einzelnen Chargen) in das Glashaus gefahren. Anschließend erfolgt die Trocknung unter Einwirken der Sonnenstrahlung und BHKW-Abwärme, je nach Verfügbarkeit. Dies geschieht solange, bis der gewünschte Trockenmassegehalt im Gärrest erreicht ist. Ventilatoren und eine Substratwendevorrichtung sorgen automatisiert für einen guten Stoffaustausch zwischen Trockengut und Trocknungsluft. Die Einfachheit des Verfahrens macht es sehr robust und störungsunanfällig. Jedoch ist die Trocknungsleistung sowohl vom Wetter als auch von der BHKW-Abwärmeverfügbarkeit abhängig, was in der Regel zu einem Wärmeüberschuss im Sommer und zu einem Mangel im Winter führt.

Besondere Anforderungen an das Personal bestehen nicht, dieses muss lediglich einen Bagger oder Radlader bedienen können, um das Glashaus zu be- und entladen. Nachteilig sind allerdings der große Platzbedarf dieses Systems bei verhältnismäßig geringer Wärmeausbeute und ein hoher Strombedarf.

3.2.6 Stripverfahren (mit Pressschnecke)

Die Strippung folgt demselben Funktionsprinzip wie die Vakuumverdampfung (Spindler et al. 2012), daher sind Flexibilität und Management ähnlich zu bewerten. Es wird BHKW-Abwärme benötigt, diese wird ebenfalls zuverlässig abgenommen, da auch hier der Wärmeeintrag direkt mit dem aufbereiteten Gärrest zusammenhängt. Da es sich um ein nicht aufkonzentrierendes Verfahren handelt, ist die Gefahr, ein nicht pumpfähiges Produkt zu erzeugen, gering. Es ist jedoch genau wie bei der Vakuumverdampfung auf den Feststoffgehalt bzw. auf die Viskosität des Eingangsgärrests zu achten, damit dieser gleichmäßig im Reaktor verteilt werden kann. Deshalb erfolgt der Einsatz von Pressschneckenseparatoren, bevor der flüssige Gärrest behandelt wird. Die Anlage ist automatisierbar und der Wartungs- und Bedienaufwand entsprechend gering. Als Verbrauchsmittel werden je nach Verfahren ausschließlich konzentrierte Schwefelsäure, andere Säuren oder Gips benötigt. Die Anforderungen an das Personal entsprechen denen der Vakuumverdampfung.

3.2.7 Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)

Die Vakuumverdampfung benötigt BHKW-Abwärme zur Eindickung des Gärrests, anders als bei der Aufkonzentration bzw. Bandtrocknung ist die Abhängigkeit von der Kühlwassertemperatur nicht so hoch, da unter Vakuum verdampft wird. Sinkt daher das Temperaturniveau im Kühlwasser,

passt sich der Prozess durch eine Druckabsenkung im Verdampfer an und die Verdampfung erfolgt bei niedrigeren Temperaturen. So können kurzzeitige Temperaturschwankungen ausgeglichen werden. Ein weiterer Vorteil der Verdampfung unter Vakuum liegt darin, dass sie die Wärmeabnahme aus dem Kühlwasser garantiert. Da Kühlwasser/Luft-Wärmetauscher von dem treibenden Temperaturgefälle und damit von der Temperatur der Umgebungsluft abhängig sind, kann die Wärmeabfuhr im Sommer Probleme bereiten. Bei der Vakuumverdampfung ist dies nicht der Fall, da die Wärmeabnahme unabhängig von der Umgebungstemperatur erfolgt und direkt durch Wasserverdampfung sichergestellt wird. Dies verbessert die Prozessstabilität der gesamten Biogasanlage.

Durch die Prozessautomatisierung ist der Bedienaufwand der Anlage gering, die Reinigung des Verdampfers erfolgt mit Wasser, das einzige kontinuierlich benötigte Prozessmittel ist konzentrierte Schwefelsäure. Vakuumverdampfer sind anfällig für Faserstoffe, weshalb ihnen stets ein Pressschneckenseparator vorgeschaltet wird. Weiterhin ist auf die Pumpbarkeit des Endprodukts zu achten. Um einen zuverlässigen Dauerbetrieb zu gewährleisten, sollte die Funktion der Anlage täglich überprüft werden. Das Personal sollte das Verfahrensprinzip verstehen und sich der Gefahren im Umgang mit konzentrierter Schwefelsäure bewusst sein.

3.2.8 Membranverfahren (mit Pressschnecke und Dekanter)

Die Membranverfahren erreichen den geringsten Punktestand hinsichtlich Management und Flexibilität, was der Komplexität des Verfahrens geschuldet ist. Ihr größter Vorteil gegenüber den anderen Komplettaufbereitungs-Verfahren besteht in der Unabhängigkeit von BHKW-Abwärme und der damit verbundenen Möglichkeit, Gärrest unabhängig von BHKW-Betriebsstunden und Wärmeverfügbarkeit zu behandeln. Allerdings werden dafür umso mehr Verbrauchs- und Reinigungsmittel benötigt. Es besteht eine große Empfindlichkeit gegenüber Feststoffen, daher werden Flockungsmittel zur Feststoffabtrennung eingesetzt. Diese sind proportional zum Feststoffgehalt des Gärrests am Eingang des Dekanters zu dosieren. Der darauffolgende Schritt, die Ultrafiltration, ist sehr empfindlich gegenüber Partikeln. Um eine gute Aufkonzentration zu erreichen, sollte der Trockenmassegehalt unter 1,5 Prozent liegen. Dies erfordert eine regelmäßige Überprüfung des Flockungsprozesses. Der Betrieb der anschließenden Umkehrosmose ist von diesen Problemen zumeist nicht betroffen, da die Ultrafiltration ein partikelfreies Filtrat zur Verfügung stellt und vor den Umkehrosmose-Membranmodulen ein Polizeifilter vorgeschaltet wird.

Für die Reinigung der Membranmodule kommen zwei verschiedene Reiniger zum Einsatz, alkalisch und sauer. Die Ultrafiltrationsmembran hat den größten Reinigungsbedarf, für einen optimalen Betrieb muss diese ca. zwei Mal wöchentlich sauer und basisch gereinigt werden. Die Umkehrosmose-Membranen erfordern eine saure Reinigung ca. einmal pro Woche. Der Wartungs- und Betriebsaufwand ist dementsprechend hoch, trotz vollständiger Automatisierung des Aufbereitungsprozesses. Hauptbetriebsstoffe des Prozesses sind Schwefelsäure, Flockungshilfsmittel und

Reiniger. Je nach Gärrest müssen ebenfalls geringe Mengen Antiscalant beigemengt werden, um das Fouling auf den Membranen gering zu halten. Die Anforderungen an das Personal sind entsprechend hoch. Dieses muss sowohl auf den Betrieb der Flockung, als auch auf das Ansetzen der Reinigungslösungen und die damit verbundenen Gefahren geschult sein. Es sollte stets eine Person zur Verfügung stehen, die in den Betrieb eingreifen kann.

3.3 Landwirtschaftliche Nutzbarkeit / Düngungsversuche (Universität Hohenheim / HfWU)

3.3.1 Zusammensetzung und Eignung für verschiedene Verwendungszwecke

Nahezu jedem aufwändigerem Verfahren der Gülle- oder Gärrestaufbereitung geht eine Fest-Flüssig-Separierung als erster Schritt voraus. Bei der mechanischen Separierung gelangen die organische Masse sowie die Nährstoffe Phosphor, Magnesium und Calcium, potenziell toxische Elemente (Schwermetalle) sowie Tierarzneimittel vor allem in die feste Fraktion. Ammonium wird überwiegend in die flüssige Fraktion (Fugat) abgeschieden, ebenso Kalium (K). Allerdings enthält auch die feste Fraktion unmittelbar nach der Separierung sehr hohe NH_4^+-N-Gehalte, die in Kombination mit einem hohen Gärrest-pH-Wert sehr stark verlustgefährdet sind, und bei offener Zwischenlagerung innerhalb weniger Tage entgasen, insbesondere während der Sommermonate. Diese Feststoffe enthalten – korrigiert um Unterschiede in der langfristigen Nährstoffwirkung – etwa 4 bis 6 Mal mehr P als N im Verhältnis zum Nährstoffbedarf der Pflanzen. Daher darf maximal 15-30 % des N-Bedarfs im Durchschnitt der Fruchtfolge über solche Feststoffe abgedeckt werden. Jede Düngung darüber hinaus kann zu einer allmählichen P-Anreichung im Boden führen. Allerdings können solche Feststoffe gezielt auf einzelne Flächen ausgebracht werden (z.B. hohe Einzelgaben alle 2 oder 3 Jahre), da die direkte N-Düngewirkung deutlich niedriger als bei Gülle und Gärresten ist. Durch die langsame N-Nachlieferung des in der organischen Substanz gebundenen Stickstoffs eignen sich separierte Feststoffe besonders für die Ausbringung auf Ackerland zu Kulturen mit langen Wachstumszyklen wie Mais, Kartoffeln oder Zuckerrüben. Die hohen P-Gehalte der Feststoffe können den P-Bedarf von Ackerkulturen mit hohen Entzügen, z. B. Körnerfrüchten, ausgleichen. Der Einsatz auf Grünlandflächen ist dagegen aufgrund des geringen P-Bedarfs und der geringen Verwertung der Humusanteile nicht zu empfehlen. Zudem können Festseparate auf Grünland nicht eingearbeitet werden und es besteht die Gefahr von gasförmigen N-Verlusten. In Hanglagen besteht bei starken Niederschlagsereignissen zudem die Möglichkeit von P-Verlusten durch die Abschwemmung von faserreichen Bestandteilen. Separierte Feststoffe eignen sich aus pflanzenbaulicher Sicht in der Regel auch nicht für eine Ausbringung zu gartenbaulich genutzten Flächen und in Kleingärten, da solche Flächen sehr häufig eine sehr hohe Versorgungsstufe für P

aufweisen, und das P-betonte Nährstoffspektrum der Feststoffe solche Ungleichgewichte verstärken würde.

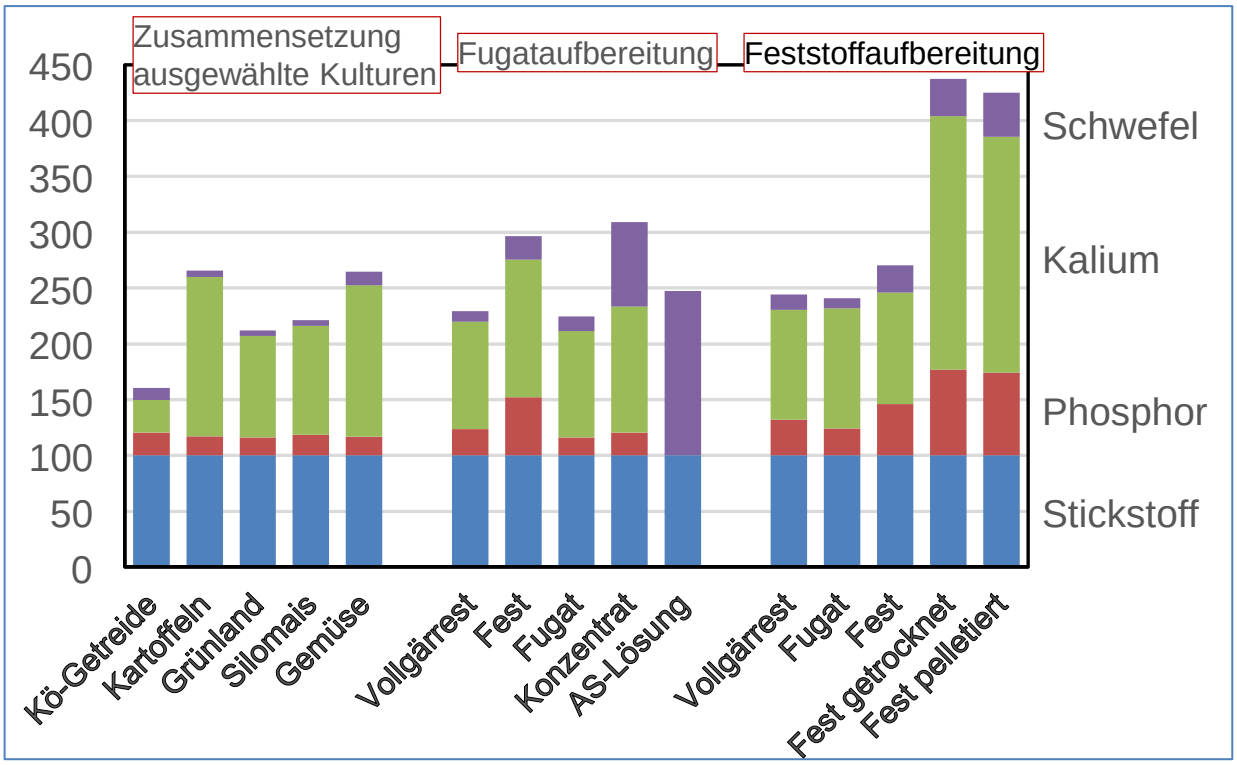


Abbildung 2: Verhältnis der Nährstoffe zueinander in Relation zum Nährstoffentzug ausgewählter Ernteprodukte - korrigiert um Unterschiede in der langfristigen Nährstoffeffizienz

Fugate weisen (am ehesten) ein weitgehend ausgeglichenes Nährstoffspektrum im Verhältnis zum Nährstoffbedarf von Kulturpflanzen auf. Daher ist mit Fugaten am ehesten eine organische Alleindüngung möglich, der notwendige N-Mineraldüngerausgleich zur Kompensation der hohen P-Gehalte ist nur relativ niedrig. Allerdings müssen Fugate bei hohem Anfall weitgehend gleichmäßig über alle Flächen jedes Jahr verteilt werden, weil sonst ein Risiko von N-Verlusten aufgrund von N-Überhängen besteht. Fugate sind besser geeignet als Feststoffe für eine Grünlanddüngung, da das Nährstoffspektrum im Dünger besser mit der Nährstoffabfuhr durch die Pflanzen übereinstimmt. Die Vorteile der Anwendung liegen in der guten Fließ- und Pumpfähigkeit und dem schnellen Abtropfen von der Pflanze bei Kopfdüngung. Durch eine schnelle Infiltration in den Boden weisen sie meist geringere NH_3- und Geruchsemissionen auf. Durch den hohen Ammoniumanteil am Gesamt-N-Gehalt und einer damit schnellen N-Düngewirkung eignen sich Fugate besonders für die (kurzfristige) Düngung von Kulturen mit einem hohen N-Bedarf und eher kurzem Wachstumszyklus im Erntejahr wie Getreide, Raps, Grünland und ggf. Sonderkulturen. Ammoniumstickstoff ist jedoch ähnlich verlustgefährdet wie in unseparatem Gärrest, sodass Flüssigseparate mit geeigneter Technik möglichst verlustarm ausgebracht werden sollten. Das Nährstoffspektrum stimmt auch deutlich stärker mit dem Nährstoffbedarf von Gemüsekulturen überein, so dass Fuga-

te am ehesten für den Kleingartenbereich oder dem intensiven ökologischen Gemüsebau geeignet wären.

Nach einer Fest-Flüssig-Separierung können verschiedene Verfahren zur weiteren Nährstoffabtrennung und –rückgewinnung eingesetzt werden. Ammoniumsalze entstehen bei der N-Rückgewinnung aus Abluftströmen im sog. Brüdenwäscher - einer Gaswäsche nach einer Feststofftrocknung oder einer Ammoniakstrippung aus Fugaten. Dabei wird der im Gas enthaltene Ammoniak durch Schwefelsäure und der nachfolgenden Bildung einer ASL wiedergewonnen. Gängig ist eine Gaswäsche mit Schwefelverbindungen (Schwefelsäure, Ca-Sulfat). Alternative Verfahren sind die Rückgewinnung mittels Salpetersäure und Bildung von Ammoniumnitrat oder zweistufige Verfahren mit einer Kombination aus Kühlung zur Ausfällung von Ammoniumcarbonaten und einer nachfolgenden Säurebehandlung zur Entfernung des restlichen Ammoniaks. ASL enthalten – gemessen am Pflanzenbedarf für N und Schwefel (S) – hohe S-Gehalte. Eine alleinige ASL-Düngung führt ggf. zu einer S-Überdüngung. Da Schwefel als Anion kaum an den Sorptionskomplex des Bodens gebunden wird, unterliegen mineralische S-Verbindungen der raschen Auswaschung ins Grundwasser. Dabei werden auch Kationen verlagert, bevorzugt Calcium, aber auch Magnesium, Natrium oder Kalium. Hohe S-Gehalte im Trinkwasser stellen für Wasserwerke ein Problem dar, denn Sulfat ist aus gesundheitlichen, geschmacklichen und technologischen Gründen im Grundwasser nicht erwünscht. Daher werden die Ausbringungsmengen im Einzeljahr durch die S-Frachten begrenzt. Zudem entsteht anders als beim Ausgangsgärrest ein im Boden sauer wirkendes Düngemittel.

Feststoffe können nach der Separierung getrocknet und in einem weiteren Verfahrensschritt pelletiert werden. Bei einer **Pelletierung** wirken über einen kurzen Zeitraum Wärme und hohe Drücke auf das Düngemittel. Die physikalischen Einwirkungen führen zu chemischen Veränderungen des Düngemittels. Durch eine Pelletierung werden die Gesamt-N-Gehalte kaum beeinflusst. Untersuchungen zeigen, dass die direkte N-Düngewirkung durch eine Pelletierung teilweise verringert, nicht beeinflusst oder erhöht wird. Denn einerseits wird durch die Einwirkung hoher Drücke der Zellverband der organischen Dünger teilweise aufgebrochen und damit Nährstoffe leichter zugänglich gemacht. Jedoch können je nach Prozesstemperatur durch die Hitzeeinwirkung auch sog. Maillardreaktionen ausgelöst werden, bei denen einfache N-Verbindungen in schwer abbaubare heterozyklische N-Verbindungen überführt werden. Pellets sollten zudem zwar während der Handhabung zusammenhalten, aber nach Ausbringung sollten die Pellets rasch quellen und zerfallen. Transport und Verpackung von Pellets sind leicht zu bewerkstelligen, daher eignen sie sich am ehesten zur Vermarktung z.B. im Hobbybereich. Zudem besitzen sie eine viel stärkere Humuswirkung als die Flüssigfraktion, damit lässt sich werben und zahlreiche Kunden ansprechen. Allerdings sind Pellets ähnlich wie Feststoffe zu behandeln, ausgeglichene Nährstoffbilanzen sind nur möglich, wenn ein N-Anteil < 20 % an der Gesamt-N-Düngung über Pellets erfolgt, und der Rest des N-Bedarfs müsste durch (weitgehend) P-freie Quellen ergänzt werden (N-Mineraldünger, Ke-

ratine wie Horndünger, Wolle oder Federmehl, Vinasse, biologische N_2-Fixierung durch Anbau von Leguminosen).

Durch die überproportionale P-Entfrachtung bei der Separierung von Flüssigdüngemitteln kommt es zu einer relativen N-Anreicherung im Fugat (Flüssigseparat). Daher eignen sich Fugate sehr viel besser, einen sehr hohen Anteil der N-Düngung über die organische Düngung abzudecken (Abbildung 2).

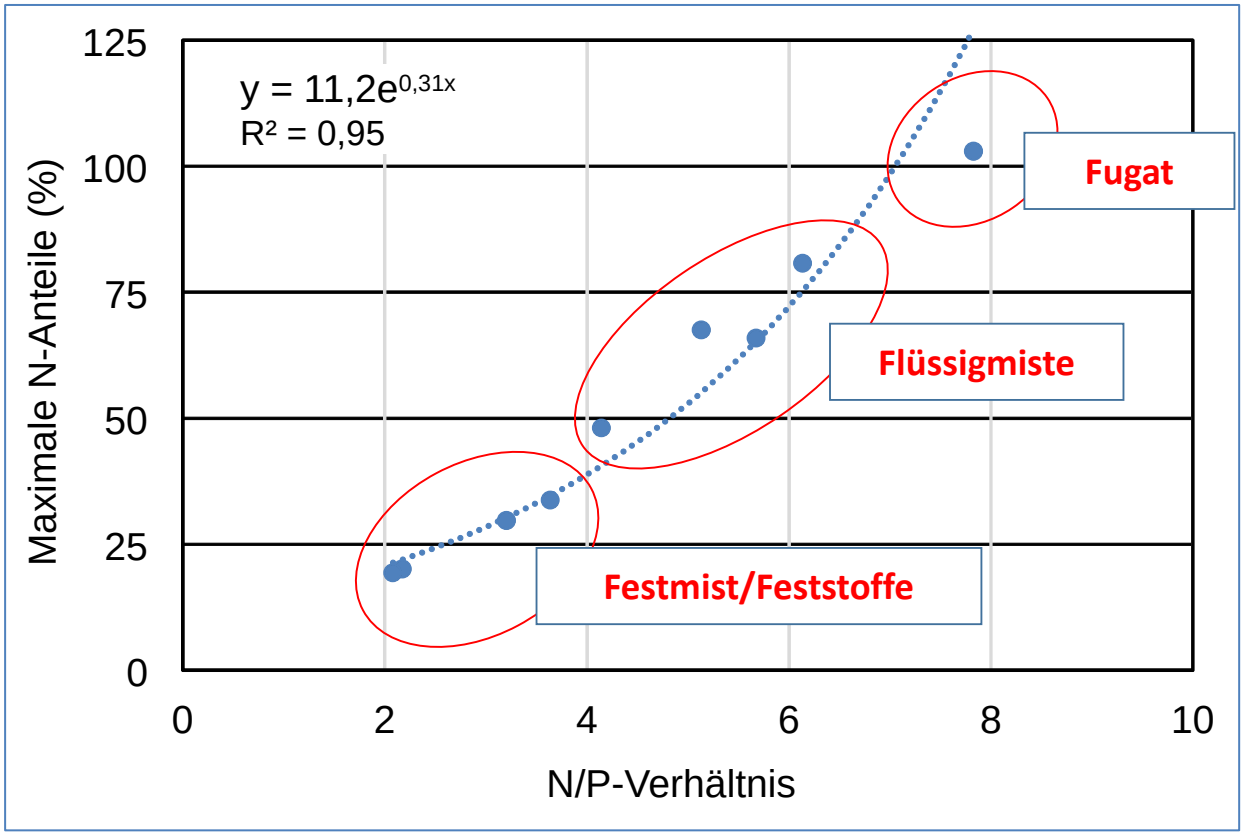


Abbildung 3: Maximale N-Versorgung aus der organischen Düngung (%) als Funktion des N/P-Verhältnisses

Werden **Fugate** nach der Separierung einer Strippung unterzogen, so verändert sich v.a. das Verhältnis der Nährstoffe zueinander. Durch die gezielte N-Entfrachtung steigt der Bedarf einer N-Mineraldüngerergänzung im Feld. Je nach Verfahren steigen auch die S-Gehalte (Abbildung 3).

3.3.2 Kurz- und langfristige Düngewirkung

Die kurzfristige N-Düngewirkung im Jahr der Anwendung unterscheidet sich in Abhängigkeit von Kultur und Aufbereitungsverfahren (Abbildung 4). Die N-Düngewirkung – gemessen als N-Mineraldüngeräquivalente – unterscheidet sich zwischen Vollgärrest und Fugat kaum, schwanken jedoch in einem weiten Bereich zwischen 25 und 70. Das heißt, dass die N-Düngewirkung von 100 kg N aus den organischen Düngemitteln der N-Düngewirkung von 25 bis 70 kg Mineraldünger-N entspricht. Sommerweizen ist teilweise deutlich besser in der Lage, den Stickstoff aus den flüssi-

gen Gärresten zu verwerten als Mais. Dies ist wahrscheinlich eher ein indirekter Effekt, langwachsende Maiskulturen sind besser in der Lage eine N-Nachlieferung aus dem Boden zu verwerten als Kulturen mit kurzem Wachstumszyklus, dies „verdünnt“ die Wirkung jeder N-Düngungsmaßnahme.

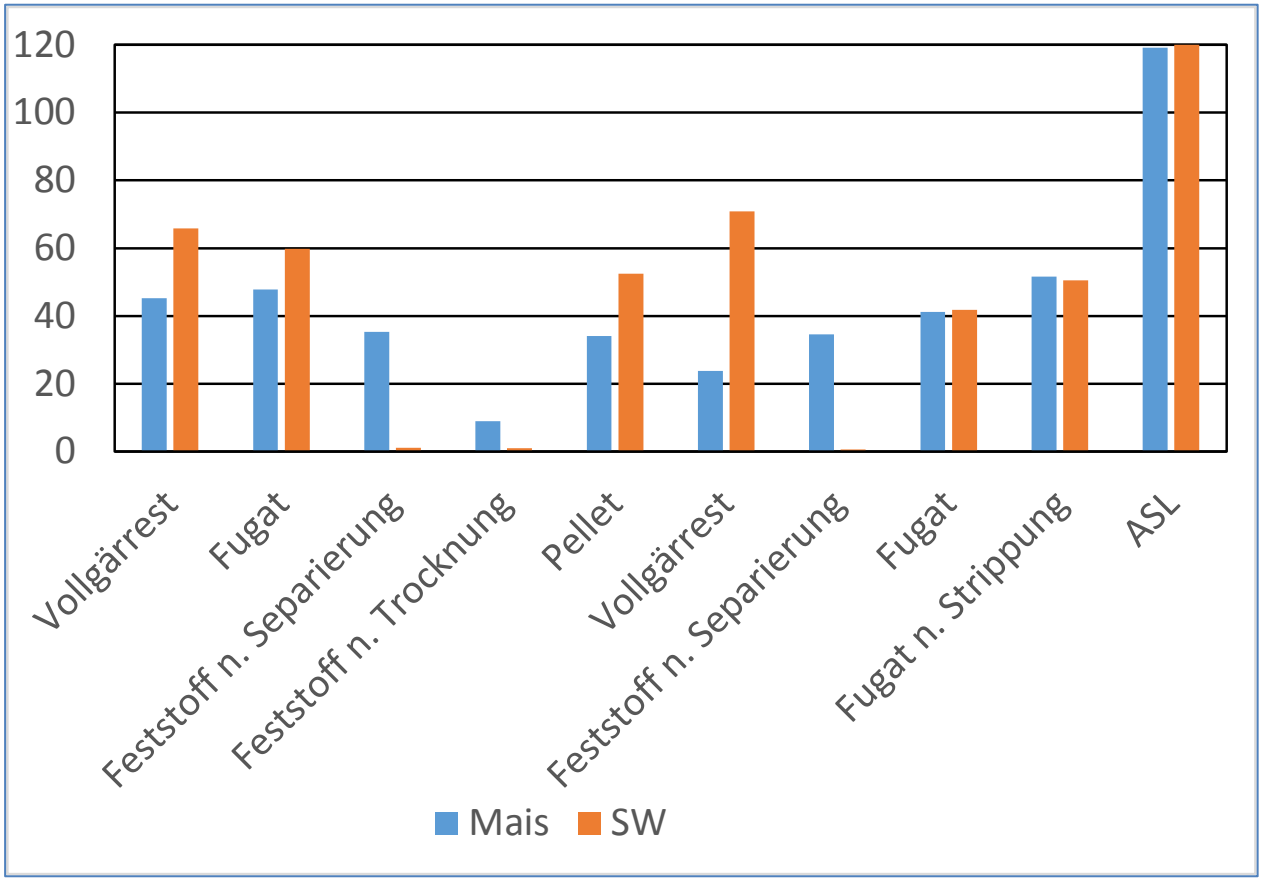


Abbildung 4: Stickstoffmineraldüngeräquivalente [%] von zwei verschiedenen Vollgärresten und daraus erzeugten organischen Düngemitteln (links: Weiterbehandlung des Feststoffes („Feststoffschiene“), rechts: Behandlung des Flüssigseparates („Flüssigschiene“))

Die N-Düngewirkung von Feststoffen beträgt 0 bis 35 Mineraldüngeräquivalente (MDÄ). Feststoffe tragen kaum zur N-Versorgung von Kulturen mit kurzem Vegetationszyklus wie Sommerweizen bei, bei Silomais mit deutlich längerem Vegetationszyklus weisen Feststoffe ein MDÄ von 30 bis 40 auf, in Abhängigkeit von ihrer Nachbehandlung (Trocknung).

Die teilweise N-Strippung aus der Flüssigphase nach der Fest-Flüssig-Separierung wirkt sich kaum auf die N-Düngewirkung auf. Sehr hohe MDÄs können bei der ASL erzielt werden, sie entspricht einem N-Mineraldüngeräquivalent von ca. 120 %. Die S-Komponente in diesem Düngemittel führt bei S-Mangel im Boden zu einer Erhöhung der N-Effizienz im Boden.

Sehr wenig ist bekannt über die Auswirkung der Flüssigmistaufbereitung auf die P-Düngewirkung der Aufbereitungsprodukte. Eine Trocknung verringert den Anteil wasserlöslicher P-Verbindungen ganz erheblich (um bis zu 75 %). Gelöste P-Verbindungen werden je nach Kationenbelag im be-

handelten Düngemittel entweder als schwerlösliche Fe- bzw. Al-Phosphate, oder als kristalline Ca-Phosphate ausgefällt.

Langfristig ist die Düngewirkung von P und K generell mit 100 % gleichzusetzen. Im Rahmen dieses Projektes konnte nur die kurzfristige N-Düngewirkung im Jahr der Anwendung gemessen werden. Bekannt ist, dass sich die langfristige N-Düngewirkung als Summe der N-Düngewirkung im Jahr der Anwendung und der N-Düngewirkung in den nachfolgenden 20 bis 30 Jahren sehr stark zwischen den organischen Düngemitteln unterscheiden kann. Grundsätzlich gilt: je höher die N-Düngewirkung im Jahr der Anwendung, desto höher ist auch die langfristige Düngewirkung. Ursache ist die nicht kontrollierbare Mineralisation von Stickstoff zu ungünstigen Zeitpunkten in den Folgejahren mit der Konsequenz von gasförmigen Verlusten und Nitratauswaschung. Abgesehen von der Biogasgewinnung ist insofern auch die Vergärung von Gülle sinnvoll, da sich dabei der Anteile an Ammonium-Stickstoff und somit die kurzfristige Düngewirkung weiter erhöht.

Tabelle 7: Langfristige N-Düngewirksamkeit von organischen Düngemitteln als Summe der N-Ausnutzung im Anwendungsjahr und der Summe der N-Nachwirkung in den nachfolgenden 20 bis 30 Jahren (% des ausgebrachten bzw. eingearbeiteten Stickstoffs)

	Langfristige N-Düngewirksamkeit (%)	Quellen
Komposte aus Siedlungsabfällen	20-40	(Amlinger et al. 2003; Diez und Krauss 1997; Gutser und Claassen 1994)
Stallmist	50-65	(Russell 1937; Körschens 1987; Asmus 1995; Chang und Janzen 1996; Albert und Grunert 2013; Gutser und Claassen 1994)
Gülle, Gärreste	70-80	(Gutser und Claassen 1994; Schröder et al. 2005; Möller und Müller 2012)
Fugate, Jauchen	80–90	Eigene Schätzung
Nicht-legume Zwischenfrüchte	Ca. 40	(Abshahi et al. 1984; Paustian et al. 1992; Thorup-Kristensen et al. 2003)
Legume Zwischenfrüchte	Ca. 60	Eigene Schätzung
Mineralische N-Düngemittel	80-90	(Körschens 1987; Asmus 1995; Gutser et al. 2005)

Die Zusammenstellung in Tabelle 7 zeigt ein Dilemma bei der Bewertung der organischen Düngung beim Nährstoffvergleich gerade bei P-reichen Feststoffen. Bei den Feststoffen besteht einerseits ein öffentliches Interesse, dass sie aus Gebieten mit überhöhten Gehalten an P im Boden in Regionen mit tatsächlichem P-Bedarf transportiert werden. Anderseits weisen gerade Feststoffe auch bei einer langfristigen Betrachtung eine zum Teil niedrige N-Düngewirkung auf. So kann davon ausgegangen werden, dass getrocknete Feststoffe in Anlehnung an die N-Düngewirksamkeit von Komposten auch langfristig nur eine N-Düngewirksamkeit von 20 bis 40 % der insgesamt ausgebrachten N-Düngemengen aufweisen (Tabelle 7). Nach neuer DüV werden aber beim Nährstoffvergleich über einen Zeitraum von drei Jahren 100 % angesetzt. Dieser Wert ist unter naturwissenschaftlichen Gesichtspunkten und selbst bei bester fachlicher Praxis nicht erreichbar. Wie oben bereits dargelegt, ist die Anwendung von organischen Düngemitteln mit nur wenigen Ausnahmen (Jauche und ähnliche organische Düngemittel, ausgewählte organische Handelsdüngemittel wie Keratine) nicht nur kurzfristig, sondern auch langfristig zwangsläufig mit einer geringeren N-Effizienz als bei Anwendung von N-Mineraldüngemittel verbunden. Müssen beim Nährstoffvergleich selbst in einem dreijährigen Durchschnitt 100 % angerechnet werden, senkt dies die Attraktivität der Verwendung insbesondere von P-reichen Feststoffen aus der Flüssigmistseparierung in potenziellen Abnahmegebieten sehr stark. Vor ähnlichen Problemen stehen die potenziellen Abnehmer von Siedlungskomposten, bei denen die Schere zwischen möglicher N-Effizienz und tatsächlich erzielbarer N-Effizienz besonders stark voneinander abweichen. Dies deutet auf einen gesetzlichen Handlungsbedarf hin zu realistischen Zahlen für eine langfristige N-Düngeverwertung aus organischen Düngemitteln.

3.4 Entfrachtungspotenzial (KTBL)

3.4.1 Ausgangssituation

Je nach Ausgangssituation in der Region, in der sich eine Anlage befindet oder für die eine Anlage geplant wird, kann sich das Ziel der Entfrachtung unterscheiden – zum einen im Umfang der nötigen Entfrachtung, zum anderen aber im Nährstoff, für den eine Überschusssituation vorliegt. Die verschiedenen Verfahren der Gärrestaufbereitung konzentrieren Nährstoffe in unterschiedlichem Maße auf. Daher wird für das Entfrachtungspotenzial neben Phosphor, der als Zielgröße für Bewertungen in Kapitel 4 ausgewählt wurde, auch Stickstoff betrachtet.

Für die Bewertung des Entfrachtungspotenzials wurde die Aufkonzentration der Nährstoffe P und N in den verschiedenen Aufbereitungsprodukten sowie deren Transportwürdigkeit berücksichtigt. Die Aufwendungen und Emissionen aus dem Aufbereitungsprozess selbst sind in diesem Schritt noch nicht in die Bewertung eingegangen.

3.4.2 Rohgärrest (ohne Aufbereitung)

Der unbehandelte Gärrest dient in allen Betrachtungen als Referenz. Das Entfrachtungspotenzial ist aufgrund des hohen Wassergehaltes und des somit hohen Transportbedarfs gering.

3.4.3 Separation (mit Pressschnecke)

Durch die Aufkonzentration des Phosphors in der Festphase besteht für Phosphor ein höheres Entfrachtungspotenzial als für den unbehandelten Gärrest. Sobald das Entfrachtungsziel jedoch den Abscheidegrad der Pressschnecke übersteigt, muss entweder ein Teil der geringer phosphorhaltigen Flüssigfraktion transportiert werden, oder auf effizientere, aber deutlich teurere Verfahren wie den Einsatz von Dekanter oder die P-Fällung aus der Flüssigfraktion zur Bildung von Struvit oder Ca-Phosphaten zurückgegriffen werden.

Für Stickstoff ist das Entfrachtungspotenzial geringer als für den unbehandelten Gärrest, da dieser vornehmlich in die Flüssigphase gelangt. Zudem kann es bei der Lagerung der nicht weiterbehandelten Festphase zu hohen NH_3-Verlusten kommen. Aus Sicht der Luftreinhaltung ist dies sehr kritisch zu sehen. Es sollte entweder eine unmittelbare Ausbringung und Einarbeitung nach der Separierung oder eine Trocknung mit Behandlung der Abluft vorgesehen werden.

3.4.4 Bandtrockner (mit Pressschnecke und Abluftreinigung)

Bei der Bandtrocknung werden das Volumen und die Masse des an Phosphor angereicherten Feststoffs weiter verringert. Zusätzlich wird durch teilweise Trocknung der Flüssigphase weiterer Phosphor in die transportwürdige Phase überführt. Aufgrund dieser Aufkonzentration werden der Transportaufwand und die benötigte Lagerkapazität nochmals verringert, und das Entfrachtungspotenzial für diesen Nährstoff ist gegenüber der alleinigen Separation höher. Jedoch gilt auch hier die Einschränkung, dass der relative Vorteil im Vergleich zu den anderen Verfahren geringer ist, wenn das Entfrachtungsziel über dem P-Abscheidegrad der Pressschnecke liegt.

Für Stickstoff fällt bei der Abluftreinigung mit ASL ein Produkt an, mit dem Stickstoff bei Bedarf gezielt überregional verwertet werden kann. Durch Trocknung eines Teils der Flüssigphase wird dieser Anteil noch zusätzlich erhöht. Hier besteht also ein erhöhtes N-Entfrachtungspotenzial. Die entstehende ASL weist geringere N-Gehalte auf als die aus Strippung oder Vakuumverdampfung, die auf der Austreibung eines hohen Anteils des Ammoniums aus der Flüssigphase beruhen. Daher ist das N-Entfrachtungspotenzial der Bandtrocknung im Vergleich zu diesen beiden Verfahren geringer.

3.4.5 Solares Verfahren (mit Pressschnecke, ohne Abluftreinigung)

Durch die solare Trocknung wird die Festphase aus der Separierung ähnlich gut aufkonzentriert wie durch die Bandtrocknung.

Anders als bei der Bandtrocknung entstehen jedoch deutlich höhere N-Emissionen, da in den vorliegenden Berechnungen keine Abluftreinigung angenommen wird und somit der mineralische Stickstoff aus der Festphase und dem getrockneten Anteil der Flüssigphase fast vollständig in Form von NH_3 verloren geht. Daher ist das Verfahren in dieser Zusammenstellung aus Gründen des Immissionsschutzes nicht zu empfehlen. Für den organischen Stickstoff findet eine Aufkonzentration im Feststoff statt, so dass im Vergleich zu Gärrest und Separation aber dennoch Emissionen aus dem Transport eingespart werden. Die Integration einer Abluftreinigung wäre daher für solare Verfahren zu empfehlen, da sich dann eine deutlich emissionsärmere Entfrachtung realisieren ließe, zusammen mit der Erzeugung eines N-Düngemittels.

3.4.6 Stripverfahren (mit Pressschnecke)

Auch bei der Strippung kommt es über die Feststoffseparation hinaus zu keiner nennenswerten Aufkonzentration des Phosphors in der Flüssigphase. Das Verfahren hat daher ein ähnliches Entfrachtungspotenzial für P wie die reine Feststoffseparation.

Für Stickstoff hingegen besteht durch die Abtrennung eines Großteils des mineralischen Stickstoffs in der ASL ein sehr großes Entfrachtungspotenzial. Das Verfahren ermöglicht nicht nur einen gezielten Transport des Einzelnährstoffs, sondern auch die Einsparung von Transporten durch die starke Aufkonzentration im Vergleich zum Ausgangsgärrest.

3.4.7 Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)

Auch wenn die Vakuumverdampfung ähnlich wie die Strippung auf eine Abtrennung des Stickstoffs abzielt, besitzt sie durch die Volumenreduktion der Flüssigphase zugleich auch ein relativ hohes P-Entfrachtungspotenzial. Dadurch kann auch über den Anteil der in der Festphase der Separation enthaltenen Mengen hinaus noch P für die überregionale Verwertung zu einem vertretbaren Aufwand transportiert werden.

Für die eigentliche Zielgröße des Verfahrens, den Stickstoff, hat die Vakuumverdampfung das höchste Entfrachtungspotenzial. Über ASL und die Festphase hinaus ist der Nährstoff im verbleibenden Konzentrat ebenfalls verhältnismäßig stark aufkonzentriert, so dass sich dieses Verfahren für hohe Entfrachtungsziele (> 80 % N) besonders anbietet.

3.4.8 Membranverfahren (mit Pressschnecke und Dekanter)

Die aufwändige Feststoffabtrennung mit einer zusätzlichen Dekanterzentrifuge erhöht das P-Entfrachtungspotenzial über die Festphase deutlich, so dass über 80 % des P allein über die Festphase überregional verwertet werden könnten.
Der Stickstoff in der Festphase wird zwar in deutlich geringerem Umfang aufkonzentriert, jedoch stärker als bei der Pressschneckenseparation. Bei der hier angenommenen offenen Lagerung der

Festphase kommt es daher zu höheren N-Verlusten in Form von NH_3 und N_2O. Dies hat zwar nur geringen Einfluss auf die Aufkonzentration, ist unter dem Gesichtspunkt der Luftreinhaltung jedoch negativ zu beurteilen. Auch das Volumen der Flüssigphase wird nochmals stark reduziert, so dass das Konzentrat aus dem Membranverfahren ein vergleichsweise hohes Entfrachtungspotenzial besitzt. In der Summe weist das Membranverfahren daher ein hohes N-Entfrachtungspotenzial auf. Die Entscheidung, welches der beiden Produkte für den Ferntransport gewählt wird, hängt für Stickstoff eher vom Absatzpotenzial ab, da beide ähnliche N-Gesamtgehalte aufweisen.

3.4.9 Entfrachtungsziel für alle Nährstoffe

Soll der gesamte Gärrest- bzw. Produktanfall überregional verwertet werden, zeigen sich die Vorteile der Verfahren, die das Volumen des Gärrests reduzieren. Dies trifft besonders für die Vakuumverdampfung zu. Mit diesem Verfahren kann der Aufwand für den Ferntransport am deutlichsten minimiert werden. Aber auch durch eine Membranaufbereitung gelingt es, Emissionen aus dem Transport im Vergleich zum unbehandelten Gärrest in großem Umfang einzusparen. Die komplette Entfrachtung nach einer Aufbereitung durch solargestützte oder Bandtrocknung ist ebenfalls mit einem merklich geringeren Transportaufwand verbunden. Demgegenüber bringen Separation mit der Pressschnecke oder auch die Strippung keine Vorteile für dieses Entfrachtungsziel.

3.4.10 Entfrachtungspotenzial – Übersicht

Die Bewertung des Entfrachtungspotenzials der einzelnen Aufbereitungsverfahren für den typenspezifischen Verfahrensvergleich in Kapitel 4 erfolgte qualitativ mit einer + / - Skala (++ sehr hoch bis – sehr niedrig) im Vergleich zum unbehandelten Gärrest (Tabelle 8).

Tabelle 8: Entfrachtungspotenzial der betrachteten Aufbereitungsverfahren im Vergleich zum unbehandelten Gärrest.

Verfahren	**Entfrachtungspotenzial**	
	P	**N**
Separation (Pressschnecke)		
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	+	+
Solares Verfahren	+	0
Stripverfahren (mit Separation)	0	++
Vakuumverdampfung, (mit Pressschnecke)	+	++
Membranverfahren	+	+

++: sehr hoch im Vergleich zum unbehandelten Gärrest, +: hoch, 0: wie unbehandelter Gärrest, - gering im Vergleich zum unbehandelten Gärrest, -- sehr gering.

3.5 Treibhausgasemissionen (KTBL)

3.5.1 Treibhausgasemissionen des Biogasstroms

Für den zugrunde gelegten Substratmix von 35 % Rindergülle und 65 % Maissilage betragen für den unbehandelten Gärrest inkl. der überregionalen Transporte und der zusätzlichen Emissionen aus der nicht gasdichten Lagerung der Gärreste in der Ackerbauregion

- die Bruttoemissionen der Biogasstromproduktion 0,37 kg CO_2eq kWh_{el}-[1]
- die Treibhausgasbilanz unter Berücksichtigung von Gutschriften für Minderemissionen im Vergleich zur Wirtschaftsdüngerlagerung ohne Vergärung sowie für die Einsparung von Mineraldüngemitteln[3]
    - ohne bestehende externe Wärmenutzung 0,27 kg CO_2eq kWh_{el}^{-1}
    - bei bestehender maximaler externer Wärmenutzung 0,07 kg CO_2eq kWh_{el}^{-1}

Außerdem werden die Ergebnisse mit den Emissionen des deutschen Strommixes verglichen. Diese betrugen im Jahr 2014 0,58 kg CO_2eq/kWh_{el} (Umweltbundesamt 2016). Ohne bestehende Wärmenutzung können also pro kWh Biogasstrom 0,31 kg CO_2eq im Vergleich zum konventionellen Strommix eingespart werden, wenn die Hälfte des im Gärrest anfallenden Phosphors überregional verwertet wird und noch keine externe Wärmenutzung besteht (also keine Emissionen aus der Wärmenutzung der Verfahren angerechnet werden müssen). Wird die zur Verfügung stehende BHKW-Wärme vollständig extern genutzt, sind dies sogar 0,41 kg. Bezogen auf den Kubikmeter unbehandelten Gärrest entspricht dies einer Einsparung von 117 bzw. 191 kg CO_2eq ohne bestehende bzw. mit vollständiger externer Wärmenutzung.

3.5.2 Treibhausgasemissionen ohne Berücksichtigung der Wärmenutzung

3.5.2.1 Rohgärrest (ohne Aufbereitung)

Bei der Verwertung des unbehandelten Gärrests verursacht der Ferntransport aufgrund der großen Volumina den Großteil der Treibhausgasemissionen. Ausbringung und gasförmige Emissionen aus dem überregional gelagerten Gärrestanteil tragen in geringerem Ausmaß zu den Gesamtemissionen bei. Circa drei Viertel der Treibhausgasemissionen aus der Gärrestverwertung können durch den eingesparten Mineraldünger wieder ausgeglichen werden.

[3] Wirtschaftsdüngergutschrift 0,038 kg CO_2eq/kWh_{el}; Mineraldüngergutschrift 0,057 kg CO_2eq/kWh_{el}

3.5.2.2 Separation (Pressschnecke)

Emissionen der Pressschneckenseparation (kein Wärmebedarf): Durch die Separation verändern sich die Bruttoemissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest kaum. Aufgrund des geringen technischen Aufwands fallen nur geringe Emissionen aus der Errichtung der Anlage und dem Betrieb der Aufbereitung an. Durch die Aufkonzentration des Phosphors in der Festphase verringert sich das Volumen für den Ferntransport nur geringfügig. Bei den gasförmigen Emissionen gleichen sich Mehremissionen in Form von NH_3 und N_2O aus der Lagerung der Festphase und geringere Emissionen für die Ausbringung der Flüssigphase im Vergleich zum unbehandelten Gärrest aus. Die geringeren NH_3-Verluste bei der Ausbringung der Flüssigphase nach Separation führen zu geringeren Einsparungen an Mineraldünger gegenüber dem unbehandelten Gärrest. Es ergibt sich eine etwas günstigere Gesamtbilanz als für den unbehandelten Gärrest.

Effekt auf die Emissionen des Biogasstroms: Da die Separation mit der Pressschnecke nur einen geringfügigen Anstieg der Treibhausgasemissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest bewirkt, hat dieses Aufbereitungsverfahren keinen relevanten Einfluss auf die Emissionen bzw. die Treibhausgasbilanz des Biogasstroms.

3.5.2.3 Bandtrockner (mit Pressschnecke und Abluftreinigung)

Emissionen der Bandtrocknung ohne Berücksichtigung der Wärmenutzung: Die Bandtrocknung ermöglicht – sofern keine Treibhausgasemissionen aus der Wärmenutzung angenommen werden und die Wärme vollständig für die Trocknung der Gärreste (Festphase und ein Teil der Flüssigphase aus der Separation) eingesetzt wird - eine deutliche Verringerung der Bruttotreibhausgasemissionen im Vergleich zu einer Nicht-Behandlung des Gärrests. Aufgrund der Volumenreduktion der Festphase sowie eines Teils der Flüssigfraktion aus der Separation sinken die Emissionen aus dem Ferntransport. Die Feststoffe sind stabilisiert, was eine vollständige Vermeidung von gasförmigen Emissionen bei der Lagerung und Ausbringung bewirkt. Dies ermöglicht einen zusätzlichen Ersatz von Nährstoffen. Zudem können durch die Abluftreinigung NH_3-Emissionen vermieden werden. Dem stehen Emissionen aus dem Stromverbrauch des Trockners und der Abluftreinigung gegenüber. Die Bandtrocknung mit Abluftreinigung weist für eine 50%ige P-Entfrachtung die niedrigsten Nettoemissionen aller Aufbereitungsverfahren und damit die höchsten Einsparungen im Vergleich zum Gärrest auf, wenn die Wärmenutzung unberücksichtigt bleibt.

Effekt auf die Emission des Biogasstroms: Für den Fall, dass keine Treibhausgasemissionen für die Wärmenutzung angenommen werden, können durch die Bandtrocknung mit Abluftreinigung die Nettoemissionen für die Erzeugung des Biogasstroms um ca. zehn Prozent verringert werden, wenn die verfügbare Wärme vollständig für die Trocknung verwendet wird. Im Vergleich zum deutschen Strommix können dadurch acht Prozent mehr Treibhausgasemissionen eingespart werden als durch die Verwertung des unbehandelten Gärrests.

3.5.2.4 Solares Verfahren (mit Pressschnecke, ohne Abluftreinigung)

Emissionen der solargestützten Trocknung ohne Berücksichtigung der Wärmenutzung: Auch die solargestützte Trocknung der Festphase und eines Teils der Flüssigphase im Gewächshaus führt zu deutlichen Einsparungen aus dem überregionalen Transport. Im Vergleich zur Bandtrocknung wird deutlich weniger Strom benötigt und somit gegenüber der Bandtrocknung Emissionen aus dem Energieeinsatz vermieden. Dieser Effekte wird jedoch durch NH_3-Verluste über die Abluft und somit indirekte N_2O-Emissionen und Verluste an Düngewirkung wieder aufgehoben. Die Nettoemissionen der solaren Trocknung ohne Berücksichtigung der Wärmebereitstellung sind etwa genauso hoch wie die der Pressschneckenseparation und damit etwas unter denen des unbehandelten Gärrests. Wie bereits oben dargestellt würde die Integration einer Abluftreinigung das Bild deutlich zu Gunsten des solaren Verfahrens verbessern.

Effekt auf die Emission des Biogasstroms: Unter den getroffenen Annahmen ist der Einfluss der solargestützten Trocknung auf die Emissionen bzw. die Treibhausgasbilanz des Biogasstroms vernachlässigbar.

3.5.2.5 Stripverfahren (mit Pressschnecke)

Emissionen des Stripverfahrens ohne Berücksichtigung der Wärmenutzung: Das Stripverfahren zielt auf die Abtrennung des Stickstoffs aus der Flüssigphase der Separation ab und führt zu keiner nennenswerten Volumenreduktion. Daher ergeben sich keine Einsparungen an Emissionen aus dem Transport, wenn die Phosphorentfrachtung das Hauptziel ist. Gegenüber den beiden zuvor betrachteten Trocknungsverfahren sind die Nettoemissionen aus der Bilanz höher, denn es fallen zwar deutlich weniger Emissionen aus dem Strombedarf an, jedoch lassen sich nur geringe Einsparungen bei den Transporten im Vergleich zum unbehandelten Gärrest realisieren. Zur Erreichung des Entfrachtungsziels müssen auch große Volumina an Flüssigphase überregional verwertet werden. So ergeben sich in der Summe für das Stripverfahren kaum weniger Emissionen als für die Verwertung des unbehandelten Gärrests. Ein deutlicher Umweltvorteil würde sich einstellen, wenn es gelänge, Verfahren zur Ammoniakstrippung aus dem Vollgärrest zu implementieren, da auf diese Weise nach einer Separation die N-Emissionen aus dem Feststoff entsprechend reduziert werden können.

Effekt auf die Emission des Biogasstroms: Ohne Berücksichtigung der Wärmenutzung hat das Stripverfahren keinen Einfluss auf die Treibhausgasemissionen des Biogastroms im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests.

3.5.2.6 Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)

Emissionen der Vakuumverdampfung ohne Berücksichtigung der Wärmenutzung: Auch die Vakuumverdampfung hat primär die Stickstoffabtrennung zum Ziel. Da jedoch zugleich eine deutliche Volumenreduktion der Flüssigphase stattfindet, können signifikante Mengen an Treibhaus-

gasemissionen aus dem Ferntransport des Konzentrats eingespart werden. Bruttoemissionen und Gesamtbilanz fallen daher deutlich geringer aus als die des Stripverfahrens und der Verwertung des unbehandelten Gärrests. Trotz eines deutlich geringeren Strombedarfs als die Bandtrocknung kann mit der Vakuumverdampfung keine so umfangreiche Einsparung an Treibhausgasemissionen erreicht werden. Dies liegt zum einen an dem etwas höheren Transportbedarf, zum Großteil jedoch an den Emissionen aus der Lagerung und Ausbringung der frischen Festphase, die durch die Stabilisierung bei der Trocknung entfallen.

Effekt auf die Emission des Biogasstroms: Für den Fall, dass keine Treibhausgasemissionen aus der Wärmenutzung angenommen werden, verringert die Vakuumverdampfung die Nettoemissionen des Biogasstroms um sechs Prozent. Dadurch können unter Berücksichtigung der Gutschriften für die Wirtschaftsdüngernutzung und den Mineraldüngerersatz gegenüber dem unbehandelten Gärrest zusätzliche fünf Prozent an Treibhausgasen im Vergleich zum deutschen Strommix eingespart werden.

3.5.2.7 Membranverfahren (mit Pressschnecke und Dekanter)

Emissionen des Membranverfahrens (kein Wärmebedarf): Das Membranverfahren benötigt als einziges der betrachteten Verfahren zur Aufbereitung der Flüssigphase keine Wärme, was sich jedoch bei Nichtberücksichtigung der Wärme nicht als Vorteil auswirken kann. Das Membranverfahren weist sowohl die höchsten Brutto- als auch Nettoemissionen aller betrachteten Verfahren auf, obwohl mit diesem Verfahren für das Entfrachtungsziel von 50 % des Phosphors die umfangreichsten Treibhausgaseinsparungen aus dem Transport realisiert werden können. Dies liegt zu einem großen Teil am sehr hohen Strombedarf der ersten Verfahrensstufe, der Ultrafiltration. So betragen die energiebedingten Treibhausgasemissionen (nur Strom) das Dreifache derjenigen von Strippung und Verdampfung. Aber auch die gasförmigen Emissionen liegen deutlich über denen der anderen Verfahren. Diese stammen aus der Festphase, die durch die zusätzliche Feststoffabtrennung mit der Dekanterzentrifuge in größeren Mengen als bei den anderen Verfahren anfällt. Die Menge an Stickstoff in der Festphase ist doppelt so hoch wie in der Festphase der Separation mit der Pressschnecke. Dementsprechend höher sind die Lachgasemissionen aus der Lagerung.

Effekt auf die Emission des Biogasstroms: Werden Emissionen aus der Wärmenutzung nicht berücksichtigt, führt das Membranverfahren als einziges der betrachteten Verfahren zu einem Anstieg der Nettoemissionen des Biogasstroms, jedoch nur um 5 %. Dadurch verringert sich verglichen mit dem unbehandelten Gärrest die Treibhausgaseinsparung im Vergleich zum deutschen Strommix um 4 %.

3.5.3 Treibhausgasemissionen bei vollständiger externer Wärmenutzung

3.5.3.1 Referenzsituation

Hier werden nur die Verfahren nochmals genauer beschrieben, die Wärme benötigen. Für Verfahren ohne Wärmebedarf ändert sich zwar der Ausgangswert für den Biogasstrom, da zusätzlich die Wärmegutschrift berücksichtigt wird. Dies hat aber keinen relevanten Einfluss auf das Ergebnis von Separation und Membranverfahren im Vergleich zum unbehandelten Gärrest.

3.5.3.2 Separation (Pressschnecke)

Keine Wärmenutzung, Ergebnis wie für Betrachtung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung.

3.5.3.3 Bandtrockner (mit Pressschnecke und Abluftreinigung)

Emissionen der Bandtrocknung bei Berücksichtigung der Wärmenutzung: Durch die angenommene optimale Ausnutzung der Wärme zur Gärrestetrocknung (d.h. vollständige Verdrängung der externen Wärmenutzung) ergeben sich für die Bandtrocknung durch die Emissionen aus der Wärmenutzung Bruttoemissionen, die fast dreimal so hoch sind wie die Verwertung des unbehandelten Gärrests. Die Nettoemissionen aus der Treibhausgasbilanz liegen in diesem Fall weit über dem Fünffachen derjenigen des unbehandelten Gärrests.

Effekt auf die Emission des Biogasstroms: Für den Fall, dass Treibhausgasemissionen aus der Wärmenutzung einbezogen werden, kommt es zu einer Verdopplung der Nettoemissionen in der Treibhausgasbilanz des Biogasstroms. Dadurch verringert sich die Einsparung gegenüber dem deutschen Strommix um ein Drittel.

3.5.3.4 Solares Verfahren (mit Pressschnecke, ohne Abluftreinigung)

Emissionen der solaren Trocknung bei Berücksichtigung der Wärmenutzung: Wie bei der Bandtrocknung wirkt sich der Effekt zusätzlicher Emissionen durch die Wärmenutzung auch bei der solaren Trocknung drastisch aus. Die Nettoemissionen für die solare Trocknung betragen dann das Sechsfache der Verwertung des unbehandelten Gärrests.

Effekt auf die Emission des Biogasstroms: Durch die zusätzlichen Emissionen aus der Wärmenutzung für die solargestützte Trocknung ist der Saldo für die Treibhausgasbilanz des Biogasstroms zweieinhalbmal so hoch wie für den unbehandelten Gärrest. In diesem Fall können 35 % weniger Emissionen im Vergleich zum deutschen Strommix eingespart werden.

3.5.3.5 Stripverfahren (mit Pressschnecke)

Emissionen des Stripverfahrens bei Berücksichtigung der Wärmenutzung: Der Wärmebedarf der Strippung liegt, da keine Volumenreduktion angestrebt ist, deutlich unter dem der beiden anderen Trocknungsverfahren. Obwohl beim Stripverfahren vergleichsweise wenige zusätzliche Emissionen für den Wärmebedarf anzurechnen sind, steigen die Bruttoemissionen im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests um 60 %. Dadurch erhöht sich die Gesamtbilanz des Verfahrens fast auf das Zweieinhalbfache einer Nicht-Behandlung.

Effekt auf die Emission des Biogasstroms: Durch die Strippung steigen trotz des vergleichsweise geringen Wärmebedarfs die Nettoemissionen aus der Treibhausgasbilanz des Biogasstroms um mehr als zwei Drittel. Dadurch verringern sich die Treibhausgaseinsparungen im Vergleich zum Strommix gegenüber einer Verwertung des unbehandelten Gärrests um zehn Prozent.

3.5.3.6 Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)

Emissionen der Vakuumverdampfung bei Berücksichtigung der Wärmenutzung: Werden Emissionen für die Wärmenutzung durch die ebenfalls wärmeintensive Vakuumverdampfung berücksichtigt, erhöhen sich die Emissionen dieses Verfahrens um siebzig Prozent. Dennoch erreichen diese nicht die Höhe von Band- oder solarer Trocknung. Die Brutto- und auch die Nettoemissionen aus der Gesamtbilanz der Vakuumverdampfung liegen aber um mehr als das Doppelte bzw. Vierfache höher als die der Verwertung des unbehandelten Gärrests und übersteigen damit deutlich die Emissionen für die Strippung.

Effekt auf die Emission des Biogasstroms: Die Berücksichtigung von Emissionen aus der Wärmenutzung bewirken eine deutliche Erhöhung der Nettoemissionen aus der Treibhausgasbilanz des Biogasstroms um 60 %. Dadurch verringert sich die Einsparung gegenüber dem Strommix um ca. ein Viertel im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests.

3.5.3.7 Membranverfahren (mit Pressschnecke und Dekanter)

Keine Wärmenutzung, Ergebnis für Emissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest daher wie für Betrachtung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung.

Im Vergleich zu den Verfahren mit Wärmebedarf liegen die Bruttoemissionen und die Nettoemissionen aus der Treibhausgasbilanz des Membranverfahrens bei Berücksichtigung von Emissionen aus der Wärmenutzung deutlich unter denen der anderen Verfahren zur Flüssigaufbereitung.

3.5.4 Einfluss der Anlagengröße auf die Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen sind bei den betrachteten Verfahren und Verfahrensvarianten nur geringfügig von der Anlagengröße abhängig. Lediglich die Verfügbarkeit von Wärme verursacht

deutliche Unterschiede in den Gesamtemissionen. Bei der Bewertung für den typenspezifischen Verfahrensvergleich in Kapitel 4 muss daher nur eine Unterscheidung für die Berücksichtigung der Wärme getroffen werden. Für den Verfahrensvergleich wurde bei den Treibhausgasemissionen wie bereits beim Entfrachtungspotenzial eine +/- Skala gewählt (Tabelle 9).

Tabelle 9: Treibhausgasemissionen der Aufbereitungsverfahren im Vergleich zum unbehandelten Gärrest.

Verfahren	**Treibhausgasemissionen**	
	Wärme nicht berücksichtigt (W+ Typen)	Wärme berücksichtig (W- Typen)
Separation (Pressschnecke)	0	0
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	+	--
Solares Verfahren	0	--
Stripverfahren (mit Separation)	0	-
Vakuumverdampfung, (mit Pressschnecke)	+	--
Membranverfahren	-	-

++: sehr hoch im Vergleich zum unbehandelten Gärrest, +: hoch, 0: wie unbehandelter Gärrest, - gering im Vergleich zum unbehandelten Gärrest, -- sehr gering.

3.6 Ökonomische Betrachtung

Viele Einflussfaktoren spielen für die Wirtschaftlichkeit eines Aufbereitungsverfahrens eine wichtige Rolle. Dabei sind wichtige Faktoren u.a. die Energiekennzahlen der Verfahren sowie die Flexibilität und das Management beim Betrieb einer solchen Anlage. Eine Übersicht der Energiekennzahlen ist in Tabelle 10 angegeben.

Tabelle 10: Übersicht der Energiekennzahlen

Verfahren	Energiekennzahl
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	0
Separation (Pressschnecke)	61,00
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	0,50
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	0,50
Stripverfahren (mit Pressschnecke)	0,80
Zweistufige Vakuumverdampfung (mit Press-schnecke)	1,43
Membranverfahren (mit Pressschnecke und Dekanter)	3,89

4 Typenspezifischer Verfahrensvergleich - Entfrachtung von 50 % P (Ökonomische Betrachtung und Treibhausgasemissionen)

Im Folgenden werden die typenspezifische Verfahrensvergleiche dargestellt, zur Übersicht über die Typen siehe Tabelle 1.

4.1 500 kW; W+; E+

- Emissionen

  Werden keine Treibhausgasemissionen für die Wärmenutzung durch die Aufbereitungsverfahren berücksichtigt, so ist eine 50%ige P-Entfrachtung über Bandtrocknung und Verdampfung mit geringeren Emissionen verbunden als über den unbehandelten Gärrest.

- Wirtschaftlichkeit

  Alle betrachteten Aufbereitungsverfahren sind unter den angenommenen Rahmenbedingungen ökonomisch vorteilhaft gegenüber einer Nicht-Aufbereitung. Einen sehr starken Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat der gewährte KWK (Kraft-Wärme-Kopplung)-Bonus bei den Verfahren mit einer Wärmenutzung. Die Separation erzielt daher den geringsten Kapitalwert wohingegen die Vakuumverdampfung den höchsten Kapitalwert aufweist. Ähnlich positiv bewertet sind in diesem Szenario die Bandtrocknung sowie das solare Verfahren.

  Der Blick auf den IRR zeigt ein ähnlich positives Bild. Die Vakuumverdampfung erzielt den höchsten und das solare Verfahren den niedrigsten IRR. Die Separation ist aufgrund der relativ geringen Investitionskosten bei Betrachtung des IRR etwas besser gestellt als bei der Betrachtung des Kapitalwertes.

Tabelle 11: Verfahrensvergleich für den Typ 500 kW; W+; E+

Verfahren	**Entfrachtungs-potenzial**		**Emissi-onen**	**Kapital-wert (++/--)**	**Kapitalwert (€)**	**IRR (%)**
	P	N[1)]				
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	-	-	0		Referenzver-fahren	N/A
Separation (Pressschnecke)	0	-	0	+	+32.680	59
Bandtrockner [2)] (mit Pressschnecke)	+	+	+	++	+218.750	85
Solares Verfahren[2)] (mit Pressschnecke)	+	0	0	++	+210.658	40
Stripverfahren (mit Separation)	Für Typen mit 500 kW nicht betrachtet					
Vakuumverdampfung, (mit Pressschnecke)	+	++	+	++	+279.994	102
Membranverfahren (Pressschnecke, Dekanter)	Für Typen mit 500 kW nicht betrachtet					

[1] Die Ergebnisse der anderen Bewertungskriterien beziehen sich auf ein Entfrachtungsziel von 50 % des mit dem Gärrest anfallenden Phosphors. Diese Annahme kann auf das Entfrachtungspotenzial nicht angewendet werden. Daher stellt dieses Kriterium die Eignung eines Verfahrens dar, den jeweiligen Nährstoff in eine transportwürdige Form zu überführen. Hier zeigen sich deutliche Unterschiede für P und N (s. Kapitel 3.4). (gilt für alle folgenden Tabellen bis einschließlich Tabelle 22)

[2] Bei den hier vorgenommenen Bewertungen wurde von einer maximalen Wärmenutzung ausgegangen. Zusätzlich zur Festphase aus der Separation kann ein Teil der Flüssigphase getrocknet werden. (gilt für alle folgenden Tabellen bis einschließlich Tabelle 22)

4.2 500 kW; W+; E+/-

- Emissionen

  Werden keine Treibhausgasemissionen für die Wärmenutzung durch die Aufbereitungsverfahren berücksichtigt, so ist eine 50%ige P-Entfrachtung über Bandtrocknung und Verdampfung mit geringeren Emissionen verbunden als über den unbehandelten Gärrest.

- Wirtschaftlichkeit

  Alle betrachteten Aufbereitungsverfahren sind unter den angenommenen Rahmenbedingungen ökonomisch vorteilhaft gegenüber einer Nicht-Aufbereitung. Auf die wirtschaftliche Vorzüglichkeit hat der KWK-Bonus einen maßgeblichen Einfluss. Die Vakuumverdampfung weist den höchsten Kapitalwert sowie IRR auf. Die Separation profitiert als wärmeunabhängiges Verfahren nicht vom KWK-Bonus und ist gegenüber dem vorangegangenen Typ 500 kW; W+; E+ nur in einem geringen Umfang wirtschaftlich. Darüber hinaus sinken in diesem Szenario die Erlöse, weshalb die Wirtschaftlichkeit der meisten Aufbereitungsverfahren steigt und somit ein höherer Kapitalwert als im Kapitel 4.1 erzielt wird. Dies ist deshalb der Fall, da die Transportkosten für den auszubringenden Rohgärrestmengen im Referenzverfahren in diesem Typ nicht mehr durch Erlöse kompensiert werden. Die Aufbereitung dagegen reduziert die Transportmengen und damit die Transportkosten.

Tabelle 12: Verfahrensvergleich für den Typ 500 kW; W+; E+/-

Verfahren	**Entfrachtungspotenzial**		**Emissionen**	**Kapitalwert (++/--)**	**Kapitalwert (€)**	**IRR (%)**
	P	N				
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	-	-	0		Referenzverfahren	N/A
Separation (Pressschnecke)	0	-	0	+	+19.287	27
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	+	+	+	++	+220.382	86
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	+	0	0	++	+206.804	39
Stripverfahren (mit Separation)	Für Typen mit 500 kW nicht betrachtet					
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	+	++	+	++	+295.775	111
Membranverfahren (Pressschnecke, Dekanter)	Für Typen mit 500 kW nicht betrachtet					

4.3 500 kW; W+; E-

- Emissionen

  Werden keine Treibhausgasemissionen für die Wärmenutzung durch die Aufbereitungsverfahren berücksichtigt, so ist eine 50%ige P-Entfrachtung über Bandtrocknung und Verdampfung mit geringeren Emissionen verbunden als über den unbehandelten Gärrest.

- Wirtschaftlichkeit

  In diesem Szenario, in dem keine Erlöse für die Gärprodukte erzielt werden sowie Gärprodukte auf Kosten des Anlagenbetreibers ausgebracht werden, ist die Aufbereitung von rohen Gärprodukten in ein transportwürdiges Produkt wirtschaftlich noch sinnvoller als bei den Varianten der Kapitel 4.1 und 4.2., weil durch die Aufbereitung die kostenpflichtig auszubringenden Mengen reduziert werden. Die Vakuumverdampfung weist den höchsten Kapitalwert sowie den höchsten IRR auf, wohingegen die Separation im geringfügig negativen Bereich liegt.

Tabelle 13: Verfahrensvergleich für den Typ 500 kW; W+; E-

Verfahren	**Entfrachtungspotenzial**		**Emissionen**	**Kapitalwert (++/--)**	**Kapitalwert (€)**	**IRR (%)**
	P	N				
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	-	-	0		Referenzverfahren	N/A
Separation (Pressschnecke)	0	-	0	-	-22.218	N/A
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	+	+	+	++	+319.200	152
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	+	0	0	++	+252.301	52
Stripverfahren (mit Separation)	Für Typen mit 500 kW nicht betrachtet					
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	+	++	+	++	+326.472	129
Membranverfahren (Pressschnecke, Dekanter)	Für Typen mit 500 kW nicht betrachtet					

4.4 500 kW; W-; E+

- Emissionen

  Werden Treibhausgasemissionen für die Wärmenutzung durch die Aufbereitungsverfahren berücksichtigt, wirkt sich dies deutlich bei den davon betroffenen Verfahren aus. Die Emissionen einer Nährstoffentfrachtung steigen vor allem bei den Trocknungsverfahren und der Vakuumverdampfung drastisch im Vergleich zum unbehandelten Gärrest, selbst wenn Emissionen aus dem Transport in größerem Umfang eingespart werden können.

- Wirtschaftlichkeit

  Ist ein zusätzlicher KWK-Bonus nicht gegeben und muss gleichzeitig für die Wärme bezahlt werden, ist die Wirtschaftlichkeit vieler Verfahren zur Aufbereitung von Gärprodukten nicht gegeben. In diesem Szenario, bei dem für die Nutzung der Wärme 2,6 Cent je kWh_{th} verrechnet werden, ist ein wirtschaftlicher Betrieb nur in seltenen Fällen gewährleistet. Die Separation, welche keine Prozesswärme benötigt, hat einen positiven Kapitalwert. Alle wärmebedürftigen Verfahren haben hingegen einen stark negativen Kapitalwert.

Tabelle 14: Verfahrensvergleich für den Typ 500 kW; W-; E+

Verfahren	**Entfrachtungs-potenzial**		**Emissi-onen**	**Kapital-wert (++/--)**	**Kapitalwert (€)**
	P	N[1)]			
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	-	-	0	Refe-renzver-fahren	N/A
Separation (Pressschnecke)	0	-	0	+	+32.680
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	+	+	--	--	-388.184
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	+	0	--	--	-221.055
Stripverfahren (mit Separation)	Für Typen mit 500 kW nicht betrachtet				
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	+	++	--	--	-512.804
Membranverfahren (Pressschnecke, Dekanter)	Für Typen mit 500 kW nicht betrachtet				

4.5 500 kW; W-; E+/-

- Emissionen

  Werden Treibhausgasemissionen für die Wärmenutzung durch die Aufbereitungsverfahren berücksichtigt, wirkt sich dies deutlich bei den davon betroffenen Verfahren aus. Die Emissionen einer Nährstoffentfrachtung steigen vor allem bei den Trocknungsverfahren und der Vakuumverdampfung drastisch im Vergleich zum unbehandelten Gärrest, selbst wenn Emissionen aus dem Transport in größerem Umfang eingespart werden können.

- Wirtschaftlichkeit

  Wenn Kosten für die Wärmenutzung entstehen, wie in der Variante mit positiven Erlösen für die Gärprodukte, alle wärmebedürftigen Verfahren unrentabel und weisen einen negativen Kapitalwert auf. Nur die Separation liegt im geringfügig positiven Bereich.

Tabelle 15: Verfahrensvergleich für den Typ 500 kW; W-; E+/-

Verfahren	Entfrachtungs-potenzial		Emissi-onen	Kapital-wert (++/--)	Kapitalwert (€)
	P	N			
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	-	-	0	Refe-renzver-fahren	N/A
Separation (Pressschnecke)	0	-	0	+	+19.287
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	+	+	--	--	-385.870
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	+	0	--	--	-226.519
Stripverfahren (mit Separation)	Für Typen mit 500 kW nicht betrachtet				
Vakuumverdampfung, (mit Pressschnecke)	+	++	--	--	-490.427
Membranverfahren (Pressschnecke, Dekanter)	Für Typen mit 500 kW nicht betrachtet				

4.6 500 kW; W-; E-

- Emissionen

  Werden Treibhausgasemissionen für die Wärmenutzung durch die Aufbereitungsverfahren berücksichtigt, wirkt sich dies deutlich bei den davon betroffenen Verfahren aus. Die Emissionen einer Nährstoffentfrachtung steigen vor allem bei den Trocknungsverfahren und der Vakuumverdampfung drastisch im Vergleich zum unbehandelten Gärrest, selbst wenn Emissionen aus dem Transport in größerem Umfang eingespart werden können.

- Wirtschaftlichkeit

  Alle Verfahren weisen in dieser Variante aufgrund des nicht gewährten KWK-Bonus sowie der Kosten für die Wärmenutzung, wie oben schon erläutert, einen negativen Kapitalwert auf.

Tabelle 16: Verfahrensvergleich für den Typ 500 kW; W-; E-

Verfahren	Entfrachtungs-potenzial		Emissi-onen	Kapital-wert (++/--)	Kapitalwert (€)
	P	N			
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	-	-	0	Refe-renzver-fahren	Referenzver-fahren
Separation (Pressschnecke)	0	-	0	-	-22.218
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	+	+	--	--	-328.951
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	+	0	--	--	-162.008
Stripverfahren (mit Separation)	Für Typen mit 500 kW nicht betrachtet				
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	+	++	--	--	-446.902
Membranverfahren (Pressschnecke, Dekanter)	Für Typen mit 500 kW nicht betrachtet				

4.7 2000 kW; W+; E+

- Emissionen

  Werden keine Treibhausgasemissionen für die Wärmenutzung durch die Aufbereitungsverfahren berücksichtigt, ist eine 50%ige P-Entfrachtung über Bandtrocknung und Verdampfung mit geringeren Emissionen verbunden als über den unbehandelten Gärrest. Durch das Membranverfahren kommt es im Gegensatz dazu zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen.

- Wirtschaftlichkeit

  Bei der Größenklasse im 2-MW-Bereich ist im Vergleich zu den 500 kW Anlagen ein positiver Skaleneffekt festzustellen, der zu einer Erhöhung der Kapitalwerte führt. Einen sehr hohen positiven Kapitalwert weisen die Vakuumverdampfung, das solare Verfahren sowie der Bandtrockner auf. Einen negativen Kapitalwert weisen das Membran- und das Stripverfahren auf. Der IRR ist aufgrund der sehr positiven Bewertung dieser Variante in einigen Fällen nicht anwendbar.

  Da der Fokus in diesem Szenario auf der Phosphorentfrachtung liegt, eignet sich das Stripverfahren nicht. Das Membranverfahren ist wärmeunabhängig und kann daher den KWK-Bonus nicht in Anspruch nehmen.

Tabelle 17: Verfahrensvergleich für den Typ 2000 kW; W+; E+

Verfahren	Entfrachtungs-potenzial		Emissi-onen	Kapital-wert (++/--)	Kapitalwert (€)	IRR (%)
	P	N[1)]				
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	-	-	0		Referenzver-fahren	N/A
Separation (Pressschnecke)	Für Typen mit 2000 kW nicht betrachtet					
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	+	+	+	++	+1.352.948	N/A
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	+	0	0	++	+1.030.375	167
Stripverfahren (mit Separation)	0	++	0	--	-1.440.576	N/A
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	+	++	+	++	+1.749.053	237
Membranverfahren (Pressschnecke, Dekanter)	+	+	-	-	-361.510	N/A

4.8 2000 kW; W+; E+/-

- Emissionen

  Werden keine Treibhausgasemissionen für die Wärmenutzung durch die Aufbereitungsverfahren berücksichtigt, ist eine 50%ige P-Entfrachtung über Bandtrocknung und Verdampfung mit geringeren Emissionen verbunden als über den unbehandelten Gärrest. Durch das Membranverfahren kommt es im Gegensatz dazu zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen.

- Wirtschaftlichkeit

  Die Wirtschaftlichkeit unterscheidet sich bei dieser Betrachtung nur in geringem Umfang von dem vorangegangenen Typen (4.7) aufgrund der veränderten Erlöse für Gärprodukte.

Tabelle 18: Verfahrensvergleich für den Typ 2000 kW; W+; E+/-

Verfahren	Entfrachtungs-potenzial		Emissi-onen	Kapital-wert (++/--)	Kapitalwert (€)	IRR (%)
	P	N				
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	-	-	0		Referenzver-fahren	N/A
Separation (Pressschnecke)	Für Typen mit 2000 kW nicht betrachtet					
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	+	+	+	++	+1.359.474	N/A
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	+	0	0	++	+1.014.960	164
Stripverfahren (mit Separation)	0	++	0	--	-1.348.205	N/A
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	+	++	+	++	+1.811.972	255
Membranverfahren (Pressschnecke, Dekanter)	+	+	-	--	-277.358	N/A

4.9 2000 kW; W+; E-

- Emissionen

  Werden keine Treibhausgasemissionen für die Wärmenutzung durch die Aufbereitungsverfahren berücksichtigt, ist eine 50%ige P-Entfrachtung über Bandtrocknung und Verdampfung mit geringeren Emissionen verbunden als über den unbehandelten Gärrest. Durch das Membranverfahren kommt es im Gegensatz dazu zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen.

- Wirtschaftlichkeit

  Aufgrund der negativen Erlössituation für Gärprodukte sind die Aufbereitungsverfahren in diesem Szenario bessergestellt, als in den vorangegangenen Szenarien in Kapitel 4.7 und 4.8 dargestellt ist. Dadurch verbessert sich das Membranverfahren und weist bei diesem Typ einen positiven Kapitalwert auf. Auch das Stripverfahren verbessert sich hinsichtlich des Kapitalwertes, ist jedoch nach wie vor im negativen Bereich. Die Vakuumverdampfung, das solare Verfahren sowie der Bandtrockner weisen hingegen nach wie vor eine hohe Rentabilität auf.

Tabelle 19: Verfahrensvergleich für den Typ 2000 kW; W+; E-

Verfahren	Entfrachtungs-potenzial		Emissi-onen	Kapital-wert (++/--)	Kapitalwert (€)	IRR (%)
	P	N				
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	-	-	0		Referenzver-fahren	N/A
Separation (Pressschnecke)	Für Typen mit 2000 kW nicht betrachtet					
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	+	+	+	++	+1.675.593	N/A
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	+	0	0	++	+1.352.495	251
Stripverfahren (mit Separation)	0	++	0	--	-1.287.961	N/A
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	+	++	+	++	+2.066.154	350
Membranverfahren (Pressschnecke, Dekanter)	+	+	-	+	+388.399	18

4.10 2000 kW; W-; E+

- Emissionen

  Werden Treibhausgasemissionen für die Wärmenutzung durch die Aufbereitungsverfahren berücksichtigt, wirkt sich dies deutlich auf die Verfahren mit Wärmenutzung aus. Die Emissionen einer Nährstoffentfrachtung liegen vor allem bei den Trocknungsverfahren und der Vakuumverdampfung deutlich höher als bei der Verwertung des unbehandelten Gärrests, selbst wenn Emissionen aus dem Transport in größerem Umfang eingespart werden können. Auch für die Strippung mit geringem Wärmebedarf liegen die Nettoemissionen aus der Bilanz für die 50%ige P-Entfrachtung nicht nur weit über dem Gärrest, sondern auch deutlich über dem des stromintensiven Membranverfahrens.

- Wirtschaftlichkeit

  Bei einem Szenario mit einer bereits vorhandenen oder möglichen externen Wärmenutzung, z.B. durch eine Getreidetrocknung oder durch ein Nahwärmenetz, werden Wärmekosten für die Gärproduktaufbereitung veranschlagt. Hinzu kommt, dass der KWK-Bonus nicht zusätzlich gewährt wird (weil er bei der ohnehin schon vorhandenen Wärmenutzung bereits gewährt wird oder für die mögliche Nutzung gewährt werden würde), was sich besonders negativ auf die Wirtschaftlichkeit der wärmeabhängigen Verfahren auswirkt. Es kommt hinzu, dass in diesem Szenario 50 % des Phosphoranteils aus der Region heraustransportiert werden sollen. Da beim Stripverfahren der Fokus auf der Stickstoffentfrachtung liegt, weist es unter den gegebenen Annahmen den höchsten negativen Kapitalwert

auf. Der Bandtrockner erzielt hier das beste Ergebnis. Grund dafür sind vor allem die im Vergleich zu den anderen Verfahren geringen Investitionskosten.

Tabelle 20: Verfahrensvergleich für den Typ 2000 kW; W-; E+

Verfahren	**Entfrachtungs-potenzial**		**Emissi-onen**	**Kapital-wert (++/--)**	**Kapitalwert (€)**
	P	N[1)]			
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	-	-	0	Refe-renzver-fahren	Referenzver-fahren
Separation (Pressschnecke)	Für Typen mit 2000 kW nicht betrachtet				
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	+	+	--	--	-828.686
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	+	0	--	--	-578.735
Stripverfahren (mit Separation)	0	++	-	--	-2.568.056
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	+	++	--	--	-1.829.339
Membranverfahren (Press-schnecke, Dekanter)	+	+	-	-	-361.510

4.11 2000 kW; W-; E+/-

- Emissionen

  Werden Treibhausgasemissionen für die Wärmenutzung durch die Aufbereitungsverfahren berücksichtigt, wirkt sich dies deutlich auf die Verfahren mit Wärmenutzung aus. Die Emissionen einer Nährstoffentfrachtung liegen vor allem bei den Trocknungsverfahren und der Vakuumverdampfung deutlich höher als bei der Verwertung des unbehandelten Gärrests, selbst wenn Emissionen aus dem Transport in größerem Umfang eingespart werden können. Auch für die Strippung mit geringem Wärmebedarf liegen die Nettoemissionen aus der Bilanz für die 50%ige P-Entfrachtung nicht nur weit über dem Gärrest, sondern auch deutlich über dem des stromintensiven Membranverfahrens.

- Wirtschaftlichkeit

  Ähnlich wie in der vorangegangenen Variante (4.10), machen ein nicht gewährter KWK-Bonus sowie die Wärmekosten den Betrieb aller betrachteten Verfahren unwirtschaftlich.

Tabelle 21: Verfahrensvergleich für den Typ 2000 kW; W-; E+/-

Verfahren	Entfrachtungs-potenzial		Emissi-onen	Kapital-wert (++/--)	Kapitalwert (€)
	P	N			
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	-	-	0		-
Separation (Pressschnecke)	Für Typen mit 2000 kW nicht betrachtet				
Bandtrockner (mit Pressschnecke	+	+	--	--	-819.433
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	+	0	--	-	-600.593
Stripverfahren (mit Separation)	0	++	-	--	-2.475.685
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	+	++	--	--	-1.740.124
Membranverfahren (Pressschnecke, Dekanter)	+	+	-	-	-277.358

4.12 2000 kW; W-; E-

- Emissionen

  Werden Treibhausgasemissionen für die Wärmenutzung durch die Aufbereitungsverfahren berücksichtigt, wirkt sich dies deutlich auf die Verfahren mit Wärmenutzung aus. Die Emissionen einer Nährstoffentfrachtung liegen vor allem bei den Trocknungsverfahren und der Vakuumverdampfung deutlich höher als bei der Verwertung des unbehandelten Gärrests, selbst wenn Emissionen aus dem Transport in größerem Umfang eingespart werden können. Auch für die Strippung mit geringem Wärmebedarf liegen die Nettoemissionen aus der Bilanz für die 50%ige P-Entfrachtung nicht nur weit über dem Gärrest, sondern auch deutlich über dem des stromintensiven Membranverfahrens.

- Wirtschaftlichkeit

  Das Membranverfahren hat in diesem Szenario den höchsten Kapitalwert. Der positive Kapitalwert des Membranverfahrens kommt durch die relativ niedrigen Kosten für den Transport der Gärprodukte und die Unabhängigkeit von der BHKW-Abwärme zustande.

Tabelle 22: Verfahrensvergleich für den Typ 2000 kW; W-; E-

Verfahren	Entfrachtungs-potenzial		Emissi-onen	Kapital-wert (++/--)	Kapitalwert (€)
	P	N			
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	-	-	0		-
Separation (Pressschnecke)	Für Typen mit 2000 kW nicht betrachtet				
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	+	+	--	-	-371.197
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	+	0	--	-	-122.016
Stripverfahren (mit Separation)	0	++	-	--	-2.415.441
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	+	++	--	--	-1.379.711
Membranverfahren (Pressschnecke, Dekanter)	+	+	-	+	+388.399

5 Sensitivitäten

5.1 Einführung

Gärproduktaufbereitungsanlagen sind sehr divers hinsichtlich ihrer Komplexität, Investitions- und Betriebskosten sowie der erzeugten Produkte. Abhängig von dem Verfahren, der Betriebsweise sowie den lokalen Umständen gibt es verschiedene Variablen, die die Wirtschaftlichkeit beeinflussen. Mit der oben vorgenommenen Differenzierung nach Biogasanlagentypen wurde dem schon zum Teil Rechnung getragen. Im Folgenden werden weitere Variablen variiert, um deren Einfluss auf die Bewertung darzustellen (Sensitivitäten).

5.2 Phosphor- versus Stickstoffentfrachtung (Betrachtung anhand des Typs: 2000 kW; W+; E-)

5.2.1 Betrachtung der Treibhausgasemissionen

Keine Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen aus der Wärmenutzung: Wird statt einer Phosphor- eine Stickstoffentfrachtung als Zielgröße gewählt, zeigen sich deutliche Vorteile für Strippung und Vakuumverdampfung. Durch die Verwertung der ASL können Treibhausgasemissionen aus dem Ferntransport weitgehend vermieden werden. So werden, sofern keine Emissionen für die Wärmenutzung berücksichtigt werden müssen, Bruttoemissionen deutlich unter denen der Verwertung des unbehandelten Gärrestes erreicht. Die Einsparung von Treibhausgasemissionen durch den Mineraldüngerersatz gleichen zudem beim Entfrachtungsziel von 50 % des Stickstoffs für beide Verfahren die Emissionen aus Anlagenerrichtung und Betriebsmittelverbrauch vollständig aus. In diesem Szenario können mit diesen Verfahren im Vergleich zu einer Entfrachtung über den unbehandelten Gärrest Treibhausgasemissionen in größerem Umfang eingespart werden.

Im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests kann die Einsparung des Biogasstroms gegenüber dem deutschen Strommix sogar um elf Prozent gesteigert werden. Lediglich über die Bandtrocknung lässt sich bei einer 50%igen Stickstoffentfrachtung ebenfalls eine merkliche Einsparung verglichen mit dem Gärrest realisieren, jedoch in geringerem Umfang (6 %).

Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen für die Wärmenutzung durch die Aufbereitung: Werden Treibhausgasemissionen für die Wärmenutzung berücksichtigt, liegen für die Trocknungsverfahren und für die Vakuumverdampfung die Treibhausgasemissionen um ein Vielfaches über den Emissionen für den unbehandelten Gärrest. Aufgrund des geringen Wärmebedarfs und des hohen N-Entfrachtungspotenzials sind die Emissionen des Stripverfahrens trotz der Anrechnung von Emissionen aus der Wärmenutzung geringer als beim Membranverfahren.

Bei Betrachtung der Gesamtemissionen der Erzeugung von Strom aus Biogas verursacht die Strippung mit Berücksichtigung von Emissionen für die Wärmebereitstellung bei einer 50%igen N-Entfrachtung geringfügig erhöhte Bruttoemissionen durch den Biogasstrom im Vergleich zum unbehandelten Gärrest. Die Bilanz des Biogasstroms unter Berücksichtigung der Gutschriften erhöht sich um ca. 25 %. Für die Vakuumverdampfung hingegen ergibt sich eine Verdopplung der Nettoemissionen des Biogasstroms.

Je nach Zielgröße kann sich also die Vorzüglichkeit der Verfahren unterscheiden. Daher muss bei Einzelfallbetrachtungen immer auch die regionale Nährstoffsituation berücksichtigt werden, aus der sich das jeweilige Entfrachtungsziel ergibt. So würde sich bei der Notwendigkeit zum Export aller Nährstoffe und unter Berücksichtigung der Wärmenutzung mit dem Membranverfahren eine fast ausgeglichene Bilanz für das Aufbereitungsverfahren ergeben, wohingegen alle Verfahren mit Wärmebedarf deutliche Zusatzemissionen mit sich bringen.

5.2.2 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

Bei der Variante 2000 kW; W+; E- (Kapitel 4.9) wurde eine Entfrachtung von 50 % Phosphor unterstellt. Diese Annahme wurde auf eine Stickstoff-Entfrachtung von 50 % geändert, um die Vorzüglichkeit von stickstoffabtrennenden Verfahren besser herauszuarbeiten. In Tabelle 23sind die Kapitalwerte der betrachteten Verfahren unter der Annahme der Phosphor- bzw. Stickstoffentfrachtung gegenübergestellt. Hervorzuheben ist hier das Stripverfahren, das sich unter der Annahme der Stickstoffentfrachtung wirtschaftlich stark verbessert. Durch die effektive Feststoffabtrennung des Membranverfahrens und die damit einhergehende starke Konzentration des Phosphors in der Festphase reduziert sich im Szenario „Phosphorentfrachtung“ die Menge des auf Kosten des Anlagenbetreibers auszubringenden Feststoffes. Dieser Vorteil des Membranverfahrens kommt im Szenario „Stickstoffentfrachtung“ nicht zum Tragen, weshalb dort höhere Mengen auszubringen sind und der Kapitalwert entsprechend sinkt.

Tabelle 23: Kapitalwertvergleich unter der Annahme einer 50 %igen P- bzw. N-Entfrachtung

	Phosphorentfrachtung		Stickstoffentfrachtung	
Verfahren	**Kapital-wert (++/--)**	**Kapitalwert (€)**	**Kapi-talwert (++/--)**	**Kapitalwert (€)**
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	++	+1.675.593	++	+1.325.542
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	++	+1.352.495	+	+532.942
Stripverfahren (mit Separation)	--	-1.287.961	++	+1.042.244
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	++	+2.066.154	++	+3.046.287
Membranverfahren (Pressschnecke, Dekanter)	+	+388.399	--	-909.431

5.3 Wirtschaftsdüngeranteil im Substratmix und Wärmeverfügbarkeit (KTBL)

Bis auf das Membranverfahren benötigen alle weiteren betrachteten Verfahren Wärme für die weitere Aufbereitung nach der Feststoffabtrennung. Diese kann über das BHKW der Biogasanlage bereitgestellt werden. Allerdings wird ein Teil der BHKW-Abwärme für die Aufrechterhaltung der Prozesstemperatur im Fermenter benötigt. Dieser Prozesswärmebedarf variiert im Jahresverlauf aufgrund unterschiedlicher Außentemperaturen, so dass im Winter weniger Wärme für eine externe Nutzung oder die Gärrestaufbereitung zur Verfügung steht. Mit steigendem Wirtschaftsdüngeranteil wird mehr Wärme für die Fermenterbeheizung benötigt. Der Prozesswärmebedarf einer 500 kW-Anlage in Abhängigkeit vom Wirtschaftsdüngeranteil ist in Abbildung 5 dargestellt.

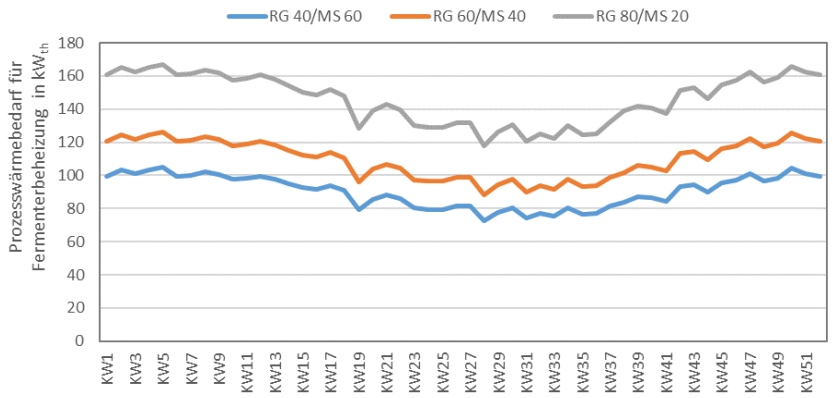


Abbildung 5: Prozesswärmebedarf einer 500 kW-Biogasanlage im Jahresverlauf bei unterschiedlichem Wirtschaftsdüngeranteil am Substratinput. Es wurden die Klimadaten des Standorts Münster (NRW) zugrunde gelegt.

Schlüssel: RG: Rindergülle, 10 % TM; MS: Maissilage, 35 % TM Substratzusammensetzung: z.B. RG 40/MS 60 = 40 % des FM-Inputs Rindergülle, 60 % Maissilage

Bei hohen Wirtschaftsdüngeranteilen kann gegebenenfalls nicht gewährleistet werden, dass ganzjährig ausreichend Wärme für die Aufbereitung des gesamten Gärrestanfalls zur Verfügung steht. Dies wäre in Abbildung 6 z.B. für die 2-stufige Verdampfung B der Fall, deren Wärmebedarf (laut Produktblatt des Herstellers) bei 80 % Rindergülle im Substratinput durch die verbleibende Restwärme des BHKW nur in den Sommermonaten gedeckt werden könnte. Die im Projekt betrachtete Vakuumverdampfung („Verdampfung 2-stufig A“) ist deutlich wärmeeffizienter und kann auch bei Biogasanlagen mit einem hohen Wirtschaftsdüngeranteil ganzjährig den gesamten Gärrestanfall behandeln. Die Bandtrocknungsanlage wurde im Projekt für eine 500 kW-Biogasanlage mit einem Substratmix von 35 % Wirtschaftsdünger und 65 % Maissilage dimensioniert. Daher kann bei einem Wirtschaftsdüngeranteil von über 40 % die Kapazität des Trockners im Winterhalbjahr nicht mehr vollständig ausgenutzt und damit ein entsprechend geringerer Anteil an Flüssigphase getrocknet werden.

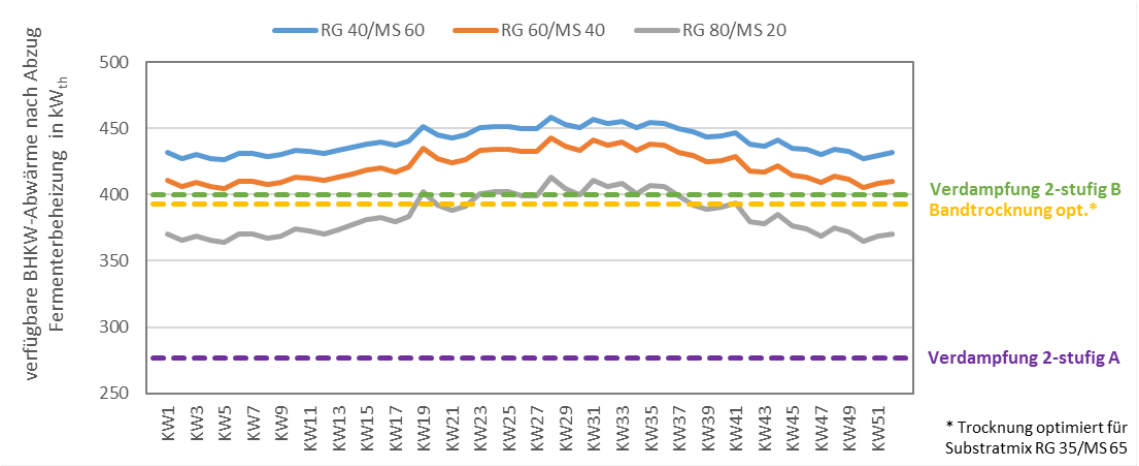


Abbildung 6: Wärmebedarf verschiedener Gärrestaufbereitungsverfahren im Vergleich zur verfügbaren Restwärme einer 500 kW-Biogasanlage im Jahresverlauf bei unterschiedlichem Wirtschaftsdüngeranteil am Substratinput. Es wurden die Klimadaten des Standorts Münster (NRW) zugrunde gelegt.

Schlüssel: RG: Rindergülle, 10 % TM; MS: Maissilage, 35 % TM Substratzusammensetzung: z.B. RG 40/MS 60 = 40 % des FM-Inputs Rindergülle, 60 % Maissilage

5.4 Wärmevergütung (Betrachtung anhand des Typs: 500 kW; W-; E-)

Bei den Aufbereitungsverfahren existieren wärmeabhängige und wärmeunabhängige Verfahren. Viele Verfahren, welche für die Aufbereitung Wärme benötigen, nutzen die BHKW-Abwärme, die bei der Verstromung des Biogases entsteht. Band- oder Trommeltrockner sind z.B. Verfahren, die viel Wärme benötigen. Zu den Verfahren, die keine thermische Energie benötigen, zählen die Separation oder das Membranverfahren.

Abhängig von der zur Verfügung stehenden und der benötigten Wärme für die Aufbereitung sowie der monetären Vergütung dieser thermischen Energie unterscheidet sich die Eignung bestimmter Verfahren hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit. Dabei sind zwei Faktoren zu unterscheiden: Zum einen der KWK-Bonus, der im Falle einer bereits vor Installation der Gärresteaufbereitung vorhandenen vollständigen Wärmenutzung gewährt wird und somit dem Gärrestaufbereitungsverfahren nicht mehr zugerechnet werden kann. Zum zweiten der Preis, den die Anlage bislang für die Wärmeabgabe erzielen kann. Hierfür wurden in den vorhergehenden Kapiteln 2,6 Ct/kWh$_{therm}$ angenommen. Für das Aufzeigen der Sensitivität dieser Annahme wurde beim Wärmepreis im Folgenden jeweils 1,0 / 2,6 / 5,0 Cent je kWh angenommen. Die Auswirkungen von Wärmekosten bzw. entgehender Wärmerlöse auf den Kapitalwert sind in Tabelle 24dargestellt. Sie sind, wie in der Tabelle deutlich wird, ganz erheblich.

Tabelle 24: Sensitivität bei Veränderung der Wärmekosten

Wärmepreise	**1,0 Cent/kWh$_{therm}$**	**2,6 Cent/kWh$_{therm}$**	**5,0 Cent/kWh$_{therm}$**
	Kapitalwert (€)	**Kapitalwert (€)**	**Kapitalwert (€)**
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	-133.614	-328.951	-621.956
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	-21.422	-162.008	-372.886
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	-191.415	-446.902	-830.132

5.5 Wärmeverbrauch (Betrachtung anhand des Typs: 500 kW; W-; E-)

Die Wärmeverbräuche können abhängig vom Verfahren sowie der Betriebsweise abweichen und müssen bei einer Inanspruchnahme des KWK-Bonus für den Umweltgutachter dokumentiert werden. Die Angebotsdaten wurde mit den gemessenen Daten der TU Berlin hinsichtlich der Sensitivität verglichen und sind in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25: Sensitivität bei Veränderung des Wärmeverbrauchs

Wärmeverbrauch	**Angebotsdaten**		**Messdaten**	
	Kapitalwert (€)	**kWh_{therm}/a**	**Kapitalwert (€)**	**kWh_{therm}/a**
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	-328.951	1.736.814	-136.235	682.344
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	-446.902	2.640.000	-436.584	2.215.172

5.6 Sommerbetrieb: Reduktion von 8000h auf 4000h (Betrachtung anhand des Typs: 500 kW; W+; E-)

Anlagenbetreiber haben in einigen Fällen die Möglichkeit, neben der Gärproduktaufbereitung eine weitere Wärmesenke zu beliefern. Dies ist z.B. bei einem Nahwärmenetz oder einer Getreidetrocknung der Fall. In dieser Sensitivitätsrechnung wurde von der Annahme ausgegangen, dass für die Aufbereitung der Gärprodukte nur im Sommer Wärme zur Verfügung steht. Es wird deutlich, dass dieser „Sommerbetrieb“ die Wirtschaftlichkeit erheblich verschlechtert und im Fall des solaren Verfahrens und der Vakuumverdampfung dazu führen kann, dass die Verfahren unwirtschaftlich werden (Tabelle 26).

Tabelle 26: Sensitivität bei Veränderung der Betriebsstunden

Betriebsstunden	**8000 h**	**4000 h**
	Kapitalwert (€)	**Kapitalwert (€)**
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	+319.200	+87.385
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	+252.301	-82.719
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	+326.472	-67.234

5.7 Transportentfernung (Betrachtung anhand des Typs: 500 kW; W-; E-)

Die Logistikkosten sind von entscheidender Bedeutung für die wirtschaftliche Nutzung von Gärprodukten. Die Transport- und Ausbringungskosten von der Biogasanlage bis aufs Feld machen den größten Kostenanteil bei der Gärproduktvermarktung aus. In den bisher betrachteten Szenarien

wurde von einer Standardtransportentfernung von 300 km ausgegangen. Bei einer Veränderung dieser Distanz auf 150 km ergeben sich die nachfolgenden Änderungen, welche in Tabelle 27 dargestellt sind. Wie deutlich wird, werden alle Verfahren durch diese Variation ökonomisch unattraktiver. Der Grund dafür ist, dass die Verringerung der Transportmengen durch die Aufbereitung wegen der geringeren Entfernung wirtschaftlich nicht so stark zum Tragen kommt. Denn auch für den unbehandelten Gärrest, der als Referenz dient, halbieren sich die Transportkosten, so dass die Einsparung durch die Aufbereitungsverfahren weniger hoch ausfällt als bei 300 km.

Auch auf die Treibhausgasemissionen hat die Verringerung der Transportdistanz eine deutliche Auswirkung, denn die durch die Aufbereitung gegenüber dem unbehandelten Gärrest eingesparten Emissionen aus dem Transport halbieren sich. Dies verringert die emissionsmindernde Wirkung von Bandtrocknung und Vakuumverdampfung für die 50%ige P-Entfrachtung erheblich.

Tabelle 27: Sensitivität bei Veränderung der Transportdistanz

Transportdistanz	**300 km**	**150 km**
	Kapitalwert (€)	**Kapitalwert (€)**
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	-328.951	-569.437
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	-162.008	-399.512
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	-446.902	-641.903

5.8 Eigenkapitalzinssatz (Betrachtung anhand des Typs: 500 kW; W+; E-)

Investitionsgüter, wie z.B. Gärproduktaufbereitungsanlagen, werden in dem meisten Fällen durch einen Bankkredit finanziert. In den Betrachtungen wurde von einem Eigenkapitalanteil der zu finanzierenden Summe von 20 % ausgegangen, der mit 10 % zu verzinsen ist. Die Auswirkungen der Anpassung des Eigenkapitalzinssatzes auf 5 % bzw. 3% sind in Tabelle 28 dargestellt. Es wird deutlich, dass der Kapitalwert bei geringeren Ansprüchen an die Verzinsung des Eigenkapitals ganz erheblich steigen kann.

Tabelle 28: Sensitivität bei Veränderung des Eigenkapitalzinssatzes

Zinssatz	**10 %**	**5 %**	**3 %**
	Kapitalwert (€)	**Kapitalwert (€)**	**Kapitalwert (€)**
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	+319.200	+423.819	+481.699
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	+252.301	+330.824	+374.326
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke)	+326.472	+431.287	+489.171

6 Aufbereitungskosten (anhand der Typen: 500 kW bzw. 2 MW; W+; E-)

Bisher wurde in diesem Bericht die Wirtschaftlichkeit immer inklusive Transport- und Ausbringungskosten dargestellt, da dies die relevante Grundlage für eine wirtschaftliche Entscheidung darstellt. Im Folgenden werden ergänzend die reinen Aufbereitungskosten ohne Transport- und Ausbringungskosten detaillierter betrachtet.

Die Aufbereitungsverfahren sind hinsichtlich ihrer Komplexität sehr verschieden. Dies beeinflusst die Kosten für die Aufbereitung von Gärprodukten. Die verfahrensspezifischen Kosten für die Aufbereitung je Kubikmeter unbehandelter Gärprodukte sind in Tabelle 29 dargestellt.

Tabelle 29: Übersicht der Aufbereitungskosten abhängig von den Verfahren

Anlagengröße	**500 kW**	**2 MW**
Separation (Pressschnecke)	0,51 €/m³	Für Typen mit 2 MW nicht betrachtet
Bandtrockner (mit Pressschnecke)	5,99 €/m³	4,35 €/m³
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	7,15 €/m³	5,72 €/m³
Stripverfahren (mit Separation)	Für Typen mit 500 kW nicht betrachtet	7,72 €/m³
Vakuumverdampfung, (mit Pressschnecke)	7,40 €/m³	6,17 €/m³
Membranverfahren (Pressschnecke, Dekanter)	Für Typen mit 500 kW nicht betrachtet	8,81 €/m³

7 Nutzbarkeit im Pflanzenbau an bestimmten Nutzerkategorien dargestellt (u.a. Humuswirkung, Zeitrahmen Ausbringbarkeit) (Universität Hohenheim)

Zusammenfassend lassen sich die Eignung und Nutzbarkeit von den verschiedenen Produkten, die aus wirtschaftseigenen Flüssigdüngemitteln hergestellt werden können, wie folgt charakterisieren (Tabelle 30).

- Rohgärreste (ohne Aufbereitung) sind zuvorderst P-Düngemittel, allerdings mit einem hohen Anteil an Ammoniumstickstoff (50 bis 80 %). Daher werden die Applikationsmengen i.d.R. im Jahr der Anwendung durch die N-Wirksamkeit begrenzt. Im Durchschnitt einer Rotation begrenzen jedoch die P-Frachten die Mengen an unseparierten Flüssigdüngemitteln, die auf einer Fläche sinnvollerweise aufgebracht werden können. Der Rest des N-Bedarfes muss durch eine angemessene N-Mineraldüngerergänzung vorgenommen werden, oder organisch durch biologische N_2-Fixierung oder den Einsatz von Keratinen oder anderen P-freien organischen Handelsdüngemitteln (z.B. Vinasse) erfolgen. Rohgärreste wirken optimal, wenn sie im Zeitraum Januar bis Mai ausgebracht werden und unmittelbar eingearbeitet werden.
- Fugate können durch Pressschneckenseparatoren oder durch Dekanter als Flüssigseparate erzeugt werden. Da Phosphor sehr stark über die Feststoffe abgetrennt wird, ist das N:P-Verhältnis von Fugaten i.d.R. deutlich ausgewogener als beim Ausgangsprodukt, entsprechend eignen sich Fugate deutlich besser als unbehandelte organische Flüssigdüngemittel als (nahezu) ausschließliche externe Nährstoffquelle. Dennoch weisen sie in der Regel immer noch ein P-betontes Nährstoffspektrum auf, mit einem entsprechenden Bedarf einer N-Ergänzung mit P-freien N-Düngemitteln (Abbildung 3). Ähnlich wie bei Rohgärresten werden die Applikationsmengen bei Fugaten i.d.R. im Jahr der Anwendung durch die N-Wirksamkeit begrenzt, im Durchschnitt einer Rotation begrenzen jedoch meistens die P-Frachten die Mengen an unseparierten Flüssigdüngemitteln, die auf einer Fläche sinnvollerweise aufgebracht werden können. Auf die Möglichkeiten einer sinnvollen mineralischen Ergänzungsdüngung wurde bereits oben hingewiesen. Auch Fugate wirken optimal, wenn sie im Zeitraum Januar bis Mai ausgebracht werden und unmittelbar eingearbeitet werden.
- Feststoffe aus der Separierung sind ebenfalls zuvorderst P-Düngemittel (und ggf. Humusdüngemittel), die jedoch unmittelbar nach Separierung (und wenige Tage danach) noch erhebliche Mengen an Ammonium-N enthalten können. Aufgrund des N:P-Verhältnisses dürfen mittel- und langfristig (im Durchschnitt einer Rotation) max. 15 bis 30 % des Stickstoffbedarfs aus Feststoffen abgedeckt werden, der Rest des N-Bedarfs muss durch andere Quellen abgedeckt werden, entweder mineralisch oder organisch (siehe oben). Die N-Wirksamkeit der Feststoffe sinkt mit zunehmender Lagerzeit oder durch eine Kompostierung, ebenso wie nach einer Trocknung mittels Bandtrockner oder einem solaren Verfah-

ren. Daher sollten Feststoffe möglichst rasch nach ihrem Anfall ausgebracht und eingearbeitet werden. Die Gefahr einer Nitratauswaschungsgefahr im Anwendungsjahr ist bei Feststoffen deutlich niedriger als bei Fugaten. Aber auch bei Feststoffen dürften aus pflanzenbaulicher Sicht die optimalen Ausbringungszeitpunkte im Zeitraum zwischen November und März oder April liegen. Auch Feststoffe sollten unmittelbar nach Ausbringung eingearbeitet werden, zur Verminderung der gasförmigen N-Verluste.

- Durch Vakuumverdampfung wird Ammonium-N weitgehend entfernt, es entstehen Düngemittel mit einem P-betonten Nährstoffspektrum und geringen Anteilen an Ammonium-N. Durch die Aufkonzentrierung sinken die Anteile an wasserlöslichen P-Verbindungen. Ähnlich wie bei Feststoffen werden mittelfristig die Ausbringungsmengen durch die P-Frachten bestimmt, Stickstoff muss entsprechend aus anderen Quellen ergänzt werden (siehe oben). Solche Düngemittel lassen sich über das ganze Jahr sinnvoll einsetzen, da durch die weitgehende Entfernung des Ammonium-Stickstoffs die Gefahr unkontrollierter N-Freisetzung gering ist.
- Die Flüssigrückstände eines Stripverfahrens zur gezielten Entfernung von Ammonium-N verringert das N:P-Verhältnis, ähnlich wie bei einer Vakuumverdampfung werden die Ausbringungsmengen durch die P-Frachten bestimmt. Es gelten ähnliche allgemeine Regeln wie bei Produkten aus der Vakuumverdampfung.
- Die Eignung von Düngemitteln aus dem Membranverfahren wird kaum durch das Verfahren selbst beeinflusst, und wird weitgehend durch die Zusammensetzung des Ausgangsflüssigseparates bestimmt. Je nach Ausgangsmaterial kann ein Düngemittel mit einem relativ ausgewogenem N:P-Verhältnis bestehen, ähnlich wie bei den Fugaten. Ansonsten gelten ähnliche Regeln wie oben für die Fugate beschrieben.
- Ammonium-haltige Lösungen nach Strippung und Rückgewinnung aus der Dampfphase sind mit den N-Mineraldüngemitteln gleichzusetzen. Zu beachten ist das jeweilige Begleition. Bei ASL werden bei guter fachlicher Praxis die Ausbringungsmengen durch die S-Frachten bestimmt. Einsatzzeitpunkte wie bei chemisch-synthetisch hergestellte N-Mineraldüngermittel.
- Aschen entstehen bei der Verbrennung von Feststoffen. Bei der Verbrennung entweichen Stickstoff und Schwefel, die Ausbringungsmengen werden durch die P-Frachten bestimmt. Phosphorverbindungen werden teilweise in den Ausgangszustand ähnlich dem eines Rohphosphates geführt, sodass eine P-Düngewirkung nur auf Standorten mit einem pH-Wert < 6,0 gemessen werden kann. Aschen weisen eine erhebliche kalkende Wirkung auf.
- Struvite sind neuartige Düngemittel aus der Aufbereitung von Flüssigdüngemitteln oder Klärschlämmen mit sehr geringer Wasserlöslichkeit. Es handelt sich um ein Phosphordüngemittel. Deren Zusammensetzung kann je nach Ionenzusammensetzung und pH-Wert im Reaktor stark schwanken, durch Ausfällung von anderen Produkten wie Ca-Phosphaten oder Ersatz von Ammonium durch Kalium oder anderen einwertigen Kationen. Trotz geringer

Wasserlöslichkeit ist die P-Düngewirkung sehr hoch, auch im Vergleich zu wasserlöslichen P-Mineraldüngemitteln.

- Organisch-mineralische Düngemittel: Hersteller von organischen Düngemitteln streben häufig die Herstellung von Mischdüngemitteln aus organischen und mineralischen Komponenten an. Dadurch sollen ausgewogenere Düngemittel mit einer rasch wirkenden N-Komponente, einer langfristig nachliefernden N-Komponente aus der organischen Masse sowie den anderen Nährstoffen erzeugt werden. Allerdings machen solche Mischdüngermittel aus pflanzenbaulicher Sicht meistens keinen Sinn, da die Standorte nicht gleichermaßen von Nährstoffmangel betroffen sind. So weisen über 90 % der Hausgärten zu hohe Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor und Kalium auf, dort sollten eigentlich nur N-Düngemittel wie Harnstoff bzw. Kalkammonsalpeter oder Keratine eingesetzt werden. Streng genommen schränkt die Herstellung solcher Mischdüngemittel die Freiheitsgrade ihres Einsatzes und damit das Einsatzspektrum der Düngemittel ein.

Tabelle 30: Zusammenfassende Beschreibung des Hauptbestandteils und der Eignung von Flüssigmisten und Flüssigmistaufbereitungsprodukten für verschiedene Einsatzzwecke

	Hauptbestandteil [1)]	Lager- und Transportaufwand	Direkte N-Düngewirkung	Langfristige N-Düngewirkung	P-Düngewirkung	Eignung Ackerbau	Eignung Grünland	Eignung Sonderkulturen	Eignung Hausgarten
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	Phosphor	sehr hoch	hoch	Hoch	hoch	sehr hoch	hoch	mittel bis hoch	mittel bis hoch
Aufkonzentrierte Flüssigphase nach Verdampfung	Phosphor	mittel	hoch	Hoch	hoch	sehr hoch	hoch	mittel bis hoch	mittel bis hoch
Festseparat (Feststoff)	Phosphor	mittel	gering bis mittel	Mittel	hoch	sehr hoch	gering	gering	gering
Festseparat nach Trocknung	Phosphor	mittel	gering	Gering	hoch	sehr hoch	gering	gering	gering
Pellet	Phosphor	gering	gering bis hoch	mittel bis hoch	hoch	sehr hoch	gering	gering bis mittel	Gering bis mittel
Aschen	Phosphor	sehr gering	keine	Keine	kaum	sehr gering	sehr gering	sehr gering	sehr gering
Flüssigseparate (Fugat)	meist Phosphor	sehr hoch	hoch/sehr hoch	hoch/sehr hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
N-reduzierte Flüssigphase nach Strippung	Phosphor	sehr hoch	mittel	mittel bis hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
Konzentrate nach Ultrafiltration und Umkehrosmose	meist Phosphor	gering	hoch	Hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
Ammoniumsulfatlösung	Schwefel	sehr gering	sehr hoch	sehr hoch	-	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
Ammoniumnitratlösung	Stickstoff	sehr gering	sehr hoch	sehr hoch	-	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
Struvit	Phosphor	sehr gering	unbekannt	unbekannt	sehr hoch	sehr hoch	Ggf. die sehr hohen P-Frachten beachten		

[1)] aufnahmebegrenzter Nährstoff (Nährstoff der i.d.R. zuerst den Nährstoffbedarf der Pflanzen abdeckt)

8 Kurzzusammenfassung

Es besteht in vielen Regionen Deutschlands ein stärker werdender Druck zur Aufbereitung von Flüssigmisten einschließlich Gärresten und zur Verbringung aus der Region der Anlage. Die Analysen in den Kapiteln 3 und 4 haben aber deutlich gezeigt, dass die Aufbereitung unter den gewählten Prämissen nicht in allen Fällen ökologisch (Emissionen) oder ökonomisch (Kapitalwerte) vorteilhaft sein muss. Die entscheidende Stellgröße ist dabei die Berücksichtigung der Wärmenutzung, d.h. die Wärmeverfügbarkeit.

Werden keine Treibhausgasemissionen durch die Wärmenutzung bei der Aufbereitung berücksichtigt, d.h. wird die Wärme bisher nicht genutzt, zeigen der Einsatz eines Bandtrockners und einer Vakuumverdampfung eine positive Wirkung auf die Treibhausgasbilanzen, die Effekte des solaren Verfahrens, des Stripverfahrens und der Separation hingegen sind vernachlässigbar. Das Membranverfahren erhöht den Ausstoß von Treibhausgasen. Werden Emissionen für die Wärmenutzung angerechnet, ist die Wirkung von Bandtrockner, solarem Verfahren, Stripverfahren und Verdampfung auf die Treibhausgasbilanzen dagegen negativ, das Membranverfahren neutral.

Ähnlich wirkt sich die Wärmenutzung bei der Wirtschaftlichkeit aus. Bei den 500-kW-Typen sind ohne Anrechnung von Wärmekosten alle relevanten Verfahren in nahezu allen Typen ökonomisch vorteilhaft. Muss die Wärme eingekauft werden oder wird eine vorhandene oder mögliche Wärmenutzung verdrängt, ist wegen der Anrechnung der Wärmekosten außer der Separation kein Verfahren ökonomisch sinnvoll. Zwischen den Verfahren gibt es große Unterschiede in der finanziellen Vorteilhaftigkeit. Bei den 2000-kW-Typen sind ohne Berücksichtigung von Wärmekosten der Bandtrockner, das solare Verfahren sowie die Vakuumverdampfung ökonomisch vorteilhaft, das Stripverfahren immer negativ. Das Membranverfahren lohnt sich nur, falls der Anlagenbetreiber die Ausbringung zahlt. Werden Kosten für die Wärme veranschlagt, ist keines der relevanten Verfahren ökonomisch vorteilhaft, bis auf das Membranverfahren (falls der Anlagenbetreiber die Ausbringung zahlt). Auch hier gibt es wieder große Unterschiede zwischen den Verfahren.

Für das Membranverfahren werden derzeit Alternativen für die stromintensive Ultrafiltrationsstufe entwickelt. Dies würde deutliche Verbesserungen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Klimawirkung dieses Verfahrens mit sich bringen. Besonders für Fälle, in denen Kosten für die genutzte Wärme angesetzt werden müssen, könnte das Membranverfahren damit zu einer vorteilhaften Alternative werden.

Die Zusammensetzung und die Düngewirksamkeit der schlussendlich erzeugten Düngemittel unterscheiden sich teilweise sehr stark. Bei den meisten Verfahren der Aufbereitung entstehen Düngemittel mit spezifischeren Eigenschaften, die sich eher für einen gezielteren Einsatz entweder als Phosphor- und Humusdünger (Feststoffe), als Stickstoff-Kalium-Dünger (Flüssigseparate), oder als N-Düngemittel (Ammoniumsalze) eignen. Bei den meisten Düngemitteln sind die P-Frachten aufnahmebegrenzend. Die Einhaltung ausgeglichener P-Bilanzen würde automatisch auch die N-

Zufuhr begrenzen. Das sinnvolle Ausbringungsfenster für Feststoffe ist sehr groß, da bei deren Einsatz die Gefahr von Nitratverlagerungen gering ist, und gegebenenfalls mit der Gefahr von N-Emissionen bei der Lagerung gegengerechnet werden muss. Dagegen sind bei Flüssigseparaten die Applikationsfenster sehr eng (in der Regel optimaler Weise zwischen Februar und Mai), dies macht die Vorhaltung entsprechender Lagerkapazitäten nötig. Bei der Ausbringung auf die Felder kann insbesondere bei Verwendung von Feststoffen und deren Aufbereitungsprodukten (Pellets, etc.) der Einsatz auf einzelne Kulturen konzentriert werden, ohne dass zwangläufig eine erhöhte Nitratauswaschungsgefahr eintritt. Dagegen ist bei Flüssigseparaten mit hohen Ammoniumgehalten nicht nur der Zeitpunkt der Ausbringung entscheidend, sondern die verabreichte Menge im Einzeljahr muss sehr viel genauer an den N-Bedarf der Kulturpflanze ausgerichtet werden. Es ist davon auszugehen, dass bei aufnehmenden Betrieben die Regelungen der Anrechnung von organischen Düngemitteln beim Nährstoffvergleich eine Aufnahme von organischen Düngemitteln aus Überschussregionen unattraktiv macht, da die Vorgaben zur N-Anrechnung sehr restriktiv sind.

Die Sensitivitätsbetrachtungen haben deutlich gemacht, wie stark die Beurteilung der Verfahren, insbesondere zur ökonomischen Vorteilhaftigkeit, von den Annahmen abhängen. So gewinnt das Stripverfahren erheblich an Vorteilhaftigkeit, wenn statt von einem Fokus auf der P-Entfrachtung von einem Fokus auf der N-Entfrachtung ausgegangen wird. Auch die anderen Annahmen, z.B. zur Transportentfernung, zum Zinssatz oder den Wärmekosten beeinflussen die Ergebnisse erheblich. Insofern kann es bei einer Kumulation positiver Abweichungen zu den hier getroffenen Annahmen zu durchaus großen Effekten kommen. Das kann bedeuten, dass auch unter Annahme von Wärmekosten einige wärmenutzende Verfahren durchaus noch ökonomisch vorteilhaft sein können. Dies gilt umso mehr, wenn die Gärprodukte statt einer landwirtschaftlichen Nutzung, wie hier angenommen, einer Vermarktung an andere Kundensegmente, wie z.B. Privatgärtner, zugeführt werden. In diesem Fall können die Erlöse ganz erheblich steigen und viele Verfahren in die ökonomische Vorteilhaftigkeit bringen. Allerdings sind die meisten Biogasanlagenbetreiber heute noch nicht in der Lage eine Vermarktung an private Endkunden durchzuführen. Hierfür ein Pilotprojekt durchzuführen, ist möglicher Gegenstand eines Folgeprojektes.

Dieser Bericht kann Anlagenbetreibern, die eine Investition in eine Gärrestaufbereitung in Erwägung ziehen, einen ersten Anhaltspunkt bieten, der durch die Typenbildung einen Mehrwert gegenüber einer pauschalen Beurteilung der Verfahren aufweist. Trotzdem sind für jedes Projekt die individuellen Gegebenheiten in einer Wirtschaftlichkeitsrechnung abzubilden, um eine verlässliche Entscheidungsgrundlage zu erhalten.

9 Danksagung

Die Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes GÄRWERT (FKZ: 22402312, 22401913, 22402113, 22402213) durchgeführt. Die Förderung des Projektes erfolgte durch finanzielle Unterstützung des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe. Wir bedanken uns herzlich für die Unterstützung und das große Interesse an unserem Projekt.

10 Literaturverzeichnis

Abshahi, A.; Hills, F. J.; Broadbent, F. E. (1984): Nitrogen Utilization by Wheat from Residual Sugarbeet Fertilizer and Soil Incorporated Sugarbeet Tops1. In: *Agronomy Journal* 76, S. 954–958. DOI: 10.2134/agronj1984.00021962007600060021x.

Al Seadi, Teodorita; Drosg, Bernhard; Fuchs, Werner; Rutz, Dominik; Janssen, Rainer (2013): Biogas digestate quality and utilization. In: Artur. Wellinger, David Baxter und Jerry Murphy (Hg.): The biogas handbook. Science, production and applications. Oxford: Woodhead Publishing Limited (Woodhead Publishing Series in Energy, no. 52), S. 267–301.

Albert, Erhard; Grunert, Michael (2013): Wirkung einer langjährig differenzierten mineralisch-organischen Düngung auf Ertrag, Humusgehalt, N-Bilanz und Nährstoffgehalte des Bodens. In: *Archives of Agronomy and Soil Science* 59 (8), S. 1073–1098. DOI: 10.1080/03650340.2012.708104.

Amlinger, Florian; Götz, Bettina; Dreher, Peter; Geszti, Jutta; Weissteiner, Christof (2003): Nitrogen in biowaste and yard waste compost: dynamics of mobilisation and availability—a review. In: *A collection of application-related papers from the conference 'Microbiology of Composting'* 39 (3), S. 107–116. DOI: 10.1016/S1164-5563(03)00026-8.

Asmus, Fritz (1995): Ergebnisse aus einem langjährigen Dauerfeldversuch zur organisch-mineralischen düngung auf Tieflehm-Fahlerde. In: *Archives of Agronomy and Soil Science* 39 (5), S. 359–367. DOI: 10.1080/03650349509365914.

Chang, C.; Janzen, H. H. (1996): Long-Term Fate of Nitrogen from Annual Feedlot Manure Applications. In: *Journal of Environmental Quality* 25, S. 785–790. DOI: 10.2134/jeq1996.00472425002500040019x.

Diez, Th; Krauss, M. (1997): Wirkung langjähriger Kompostdüngung auf Pflanzenertrag und Bodenfruchtbarkeit. In: *Agribiol. Res* 50 (1), S. 78–84.

Fuchs, Werner; Drosg, Bernhard (2010): Technologiebewertung von Gärrestbehandlungs- und Verwertungskonzepten. Wien: Universität für Bodenkultur.

Gutser, R.; Claassen, N. (1994): Langzeitversuche zum N-Umsatz von Wirtschaftsdüngern und kommunalen Komposten Zeitschriftentitel: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*.

Gutser, R.; Ebertseder, Th.; Weber, A.; Schraml, M.; Schmidhalter, U. (2005): Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. In: *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168 (4), S. 439–446. DOI: 10.1002/jpln.200520510.

Herbes, Carsten; Halbherr, Verena (2017): Stärkere Wärmenutzung in Biogasanlagen kann sich lohnen. In: *Biogas Journal* (1/2017), S. 68–71.

Körschens, M. (1987): N-Ausnutzung in Abhängigkeit von mineralischer und organischer N-Düngung im Verlaufe von vier Jahrzehnten im Statischen Düngungsversuch Lauchstädt. In: *Archiv für Acker-und Pflanzenbau und Bodenkunde* 31 (3), S. 161–168.

Möller, Kurt; Müller, Torsten (2012): Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review. In: *Engineering in Life Sciences* 12 (3), S. 242–257.

Paustian, Keith; Parton, William J.; Persson, Jan (1992): Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. In: *Soil Science Society of America Journal* 56 (2), S. 476–488.

Russell, E. J. (1937): Fünfzig Jahre Dauerfeldversuche in der Versuchsstation Woburn, einer Abteilung der Versuchsstation Rothamsted. In: *Landw Jahrb* 84, S. 161–261.

Schröder, J. J.; Jansen, A. G.; Hilhorst, G. J. (2005): Long-term nitrogen supply from cattle slurry. In: *Soil Use and Management* 21 (2), S. 196–204.

Spindler, H.; Bauermeister, U.; Meier, T. (2012): Method and device for producing nitrogen fertilizer, removing phosphate from organic waste products, and limiting the potassium concentration. Angemeldet durch Phoenix Beteilgungs GmbH.

Thorup-Kristensen, Kristian; Magid, Jacob; Jensen, Lars Stoumann (2003): Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. In: *Advances in agronomy* 79, S. 227–302.

Umweltbundesamt (2016): Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen. Wie viel CO2 verursacht eine Kilowattstunde Strom? Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen.

VDI (2012): VDI 4600: Kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden. VDI-Richtline. Düsseldorf.

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

GÄRWERT - GÄRprodukte ökologisch optimiert und WERTorientiert aufbereiten und vermarkten

Teilvorhaben 1: Angebots- und Nachfrageforschung, Kostenkalkulationen

Zuwendungsempfänger:

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen

Förderkennzeichen:

22402312

Laufzeit:

01.10.2013 bis **31.03.2017**

Monat der Erstellung:

03/2017

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Zuwendungsempfänger und ausführende Stelle:

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen
Institute for International Research on Sustainable Management and Renewable Energy (ISR)
Neckarsteige 6-10
72622 Nürtingen

Zuwendungsgeber:

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
Hofplatz 1
18276 Gülzow-Prüzen

Kooperationspartner:

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)
Bartningstraße 49
64289 Darmstadt

Technische Universität Berlin
Fachgebiet Verfahrenstechnik
Ackerstraße 76
13355 Berlin

Universität Hohenheim
Fachgebiet Düngung und Bodenstoffhaushalt
Fruwirthstr. 20
70593 Stuttgart

Projektleitung:

Prof. Dr. Carsten Herbes

Mitwirkende:

Prof. Dr. Carola Pekrun
M.Sc. Johannes Dahlin

Die Ergebnisse der pflanzenbaulichen Projektarbeiten im Teilvorhaben mit der FKZ 22402312 (Teilvorhaben 1) sind im Teilvorhaben mit der FKZ 22402113 (Teilvorhaben 3) integriert, da dort der Hauptteil der pflanzenbaulichen Arbeiten dargestellt wird.

1 Ziele 6
1.1 Aufgabenstellung 6
1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand 7
1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 8
2 Hintergrund und Einleitung 9
3 Gärproduktvermarktung – die Perspektive der Anbieter 10
4 Gärproduktvermarktung – die Perspektive der Abnehmer 15
4.1 Landwirte 15
4.2 Garten- und Landschaftsbau 17
4.3 Privatgärtner 18
5 Vermarktungsansätze 31
6 Aspekte der Nachhaltigkeit 31
7 Gärproduktaufbereitung und resultierende Kosten 33
7.1 Berechnung einer Biogas Modellanlage sowie Angebotseinholung 33
7.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 35
7.3 Auswertung 37
8 Vergleich mit ursprünglichem Arbeitsplan 40
9 Verwertungsplan 42
10 Literaturverzeichnis 45
11 Danksagung 47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: N-Überschuss für Kreise in Deutschland (eigene Darstellung; Daten von Bach 2014) 9

Abbildung 2: Mögliche Distributionspfade für Gärprodukte (eigene Darstellung) 14

Abbildung 3: Vermarktung von kompostierten Gärprodukten (Foto: J. Dahlin) 18

Abbildung 4: Beispiele eines Gartendüngers und Gartenerde auf Basis von Gärprodukten (Fotos: J. Dahlin; www.allmig.ch) 19

Abbildung 5: Beispiel eines Choice Experiments (Foto: J. Dahlin) 24

Abbildung 6: Vielfalt an Produkt- und Verpackungsvarianten von Düngern (Foto: J. Dahlin) 24

Abbildung 7: Bewerbung einer regional erzeugten und torffreien Erde (Foto: J. Dahlin) 33

Abbildung 8: Screenshot der Excel-Eingabemaske (Foto: J. Dahlin) 38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Liste der interviewten Unternehmen 11

Tabelle 2: Hemmende Faktoren bei der Vermarktung von Gärprodukten 12

Tabelle 3: Übersicht der Ergebnisse aus den landwirtschaftlichen Interviews zum Einsatz von Gärprodukten 17

Tabelle 4: Kategorisierung von Privatkunden 21

Tabelle 5: Prozentuelle Bedeutung der Produktattribute für 5 Kundengruppen (Dünger) 25

Tabelle 6: Teilnutzenwerte der Produktattribute (Dünger) 26

Tabelle 7: Soziodemographischen Daten 27

Tabelle 8: Soziodemographische Daten der 5 Gruppen 28

Tabelle 9: Prozentuelle Bedeutung der Produktattribute für 5 Kundengruppen (Erde) 29

Tabelle 10: Teilnutzenwerte der Produktattribute (Erde) 29

Tabelle 11: Kenngrößen der 500 kW sowie 2 MW Modellanlage 34

Tabelle 12: Kenngrößen der Biogas-Modellanlagen 34

Tabelle 13: Übersicht bezüglich der eingegangenen Herstellerangebote 35

Tabelle 14: Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 36

Tabelle 15: Kapitalwerte betrachteter Aufbereitungsverfahren unter variierenden Bedingungen für eine 500 kW BGA 39

Tabelle 16: Barwerte betrachteter Aufbereitungsverfahren unter variierenden Bedingungen für eine 2000 kW BGA 40

Tabelle 17: Vergleich von Zielen und Umsetzung 41

Abkürzungsverzeichnis

%	**Prozent**
€	**Euro**
ASL	**Ammoniumsulfat-Lösung**
BGA(s)	**Biogasanlage(n)**
BioAbfV	**Bioabfallverordnung**
DüV	**Düngeverordnung**
EEG	**Erneuerbare-Energien-Gesetz**
GAA	**Gärproduktaufbereitungsanlage**
K	**Kalium**
Kg	**Kilogramm**
KTBL	**Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.**
kW	**Kilowatt**
KWK	**Kraft-Wärme-Kopplung**
l	**Liter**
IZF	**Interner Zinsfuß**
LW	**Landwirtschaft**
MW	**Megawatt**
N	**Stickstoff**
NaWaRos	**Nachwachsende-Rohstoffe**
P	**Phosphor**
t	**Tonne**
TM	**Trockenmasse**

1 Ziele

Ein immer größerer Anteil an Biogas-Gärprodukten kann nicht im näheren Umfeld der Anlage ausgebracht werden. Dies rührt zum einen daher, dass neben Landwirten immer mehr nichtlandwirtschaftliche Betreiber auftreten, die über keine eigenen Flächen verfügen und außerdem entstehen immer mehr Biomethanaufbereitungsanlagen. Diese sind tendenziell größer als Anlagen mit Vorortverstromung. Sie kaufen daher in der Regel, selbst wenn sie von Landwirten betrieben werden, Substrate zu und haben deshalb weniger Fläche als zur Ausbringung der Gärprodukte nötig ist. Zudem entstehen nach wie vor Biogasanlagen (BGAs) in nährstoffreichen Regionen, in denen die Landwirte aus Gesichtspunkten der guten fachlichen Praxis die Gärprodukte nicht anlagennah ausbringen können.

Diese drei Trends führen dazu, dass die Gärprodukte an Dritte vermarktet werden und bei einer herkömmlichen Verwertung ohne Aufbereitung teilweise über sehr weite Entfernungen transportiert werden müssen, obwohl der Anteil der darin enthaltenen Nährstoffe im Verhältnis zum hohen Wassergehalt aus ökonomischer Sicht kaum Transportentfernungen über 10 km rechtfertigt. Dieser Umstand verlangt, je nach Anlage in unterschiedlichem Maße, nach einer Aufbereitung der Gärprodukte zur Reduzierung des Transportvolumens. Außerdem ist der Betreiber gefordert, ein Vermarktungssystem aufzubauen. Dies beinhaltet die Schaffung von Produkten, die in den verschiedenen Teilmärkten einsetzbar sind. So können unbehandelte Gärreste im Hobbygärtner-Segment nicht eingesetzt werden. Nur mit einem guten Vermarktungssystem können die wertvollen Gärprodukte mit ihrer Dünger- und Humuswirkung einer optimalen Verwertung zugeführt, Umweltrisiken minimiert und die Biogas-Wertschöpfungskette optimiert werden. Speziell der Aspekt der Vermarktung wurde bislang in der Forschung aber noch nicht beleuchtet. Bei den ökonomischen und ökologischen Folgen der verschiedenen Aufbereitungsverfahren gibt es noch erhebliche Forschungslücken. Das Ziel des Verbundvorhabens war es, für Betreiber, Abnehmer, Umweltbehörden und politische Entscheider Transparenz über die Eignung verschiedener Aufbereitungsverfahren und Vermarktungsalternativen unter ökologischen, ökonomischen und pflanzenbaulichen Aspekten zu schaffen. Dazu wurden neben empirischen Marktuntersuchungen, Aufbereitungsverfahren technisch bewertet und Energieverbrauchs- und Kostendaten erhoben. Zusätzlich wurden Feld- und Gefäßversuche zur Düngewirkung und Emissionsmessungen durchgeführt sowie Treibhausgas-Bilanzen berechnet. In der konsequenten Verknüpfung von ökologischen und ökonomischen Parametern sowie der Einführung einer Marketing-Perspektive weist das durchgeführte Projekt über die existierende Forschung deutlich hinaus.

1.1 Aufgabenstellung

Ziel dieses Forschungsvorhabens (Teilprojekt: FKN 22402312) ist es, eine erste wissenschaftliche Grundlage für die Vermarktung von Gärprodukten zu schaffen. Dazu wurden Vermarktungsansätze und Kosten verschiedener Aufbereitungsverfahren betrachtet.

Durch eine Analyse bestehender Vermarktungsansätze sollten potenzielle Zielmärkte analysiert sowie hemmende und fördernde Faktoren bezüglich der Vermarktung ergründet werden. Gärprodukte werden in den meisten Fällen als unbehandeltes Produkt in anlagennahen landwirtschaftlichen Betrieben eingesetzt. Mit Hilfe verschiedener Aufbereitungsverfahren, wie z.B. Bandtrockner, können aus den rohen Gärprodukten weitere Produktformen z.B. Pellets oder Kompost hergestellt werden. Die potenziellen Abnehmergruppen (z.B. Landwirtschaft, Garten- und Landschaftsbau, Privatgärtner) haben verschiedene Anforderungen und Präferenzen bezüglich der Beschaffenheit von Gärprodukten, die als Dünger und Bodenverbesserer eingesetzt werden. Diese Präferenzen wurden mithilfe von persönlichen Interviews mit Gärproduktvermarktern sowie Gärproduktabnehmern aus dem landwirtschaftlichen sowie dem gartenbaulichen Bereich ermittelt. Dabei spielen die Produktformen sowie Gärproduktaufbereitungstechnologien eine wichtige Rolle, da erst durch eine Aufbereitung von flüssigen Gärprodukten in ein festes bzw. trockenes Produkt die Voraussetzung für die Erschließung von Nischenmärkten entsteht.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse sollten mögliche Erfolgsfaktoren bezüglich der Vermarktung von Gärprodukten bei verschiedenen Zielgruppen erarbeitet werden. Für eine geplante Vermarktung in Nischenmärkten, wie z.B. an Privatgärtner, können so aus den vorliegenden Ergebnissen maßgeschneiderte Vermarktungsstrategien abgeleitet werden.

Des Weiteren sollten die Kosten für verschiedene Aufbereitungsverfahren ermittelt werden. Dabei sollte nicht nur der eigentliche Aufbereitungsprozess betrachtet werden, sondern die Kosten des gesamten Prozesses vom Ausgang der BGA bis hin zur Pflanze. Zudem sollten die Kosten differenziert für verschiedene Szenarien bzw. BGA-Typen dargestellt werden, um eine bessere Entscheidungsgrundlage für Anlagenbetreiber zu schaffen.

1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Vermarktungskonzepte und Marketingaspekte sind, wie in der gesamten Biogasforschung, bislang vernachlässigt worden und bereits mehrfach als zu bearbeitende Forschungslücke angemahnt worden (Schüsseler 2009).

Bei der Vermarktung von Biogas-Gärprodukten kann jedoch auf Parallelen zur Kompostvermarktung zurückgegriffen werden. Hier gibt es verschiedene, z.T. mit der Gärproduktvermarktung identische, Abnehmergruppen. Auch hier geht es um organisches Material, das außerhalb der Mainstream-Marktforschung liegt und als Nebenprodukt entsteht. Daher folgt es auch keinen industriellen Standards und bringt Unsicherheiten und Vorbehalte auf der Verbraucherseite mit sich. Parallelen bestehen beim Imageproblem, beim Angebotsüberhang sowie beim Kundennutzen in den Bereichen Düngewirkung und Humuswirkung. Zur Kompostvermarktung existiert schon eine Reihe, meist älterer, Veröffentlichungen (Eggerth et al. 2007; Probert et al. 2005; Dawson und Probert 2007; Alexander 2010). Bei den Inhalten dieser Beiträge handelt es sich aber hauptsächlich um praxisnahe Aspekte zur Qualität von Komposten sowie deren Auswirkung auf die Vermark-

tung. Eine theoretisch und empirisch fundierte Konsumentenforschung ist trotz der langjährig bestehenden Herausforderung noch nicht verfügbar.

Die Kosten von Gärrestaufbereitungsverfahren waren schon in der Vergangenheit Gegenstand der Forschung (Nakazi et al. 2009; Block 2009, Döhler und Wulf 2009; Golkowska et al. 2014). Zum einen entwickeln sich aber die Aufbereitungstechnologien weiter, was eine regelmäßige Aktualisierung erforderlich macht. Zum anderen, und dies ist eine Lücke der bisherigen Forschung, werden die Kosten in der Regel undifferenziert angegeben, d.h. die Kosten in verschiedenen Szenarien (Wärmekosten, Ausbringungs- und Transportkosten) nicht differenziert. Auch fehlen oft Sensitivitätsbetrachtungen. Das macht es gerade Anlagenbetreibern schwer zu entscheiden, wie relevant die präsentierten Kostenschätzungen bzw. –berechnungen für die Bedingungen ihrer spezifischen Anlage sind.

1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

An dieser Stelle möchten wir uns bei den Projekt- und Praxispartnern, die an diesem Vorhaben mitgewirkt haben, bedanken:

- Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.
- Bundesgütegemeinschaft Gärprodukte e.V.
- Diverse Biogasanlagenbetreiber
- Diverse Gärproduktaufbereitungsanlagenhersteller
- Fachverband Biogas e.V.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
- Technische Universität Berlin
- Universität Hohenheim

Die Bundesgütegemeinschaft Kompost, der Fachverband Biogas sowie die von diesen beiden Institutionen maßgeblich unterstützte Bundesgütegemeinschaft Gärprodukte wurden regelmäßig über die Zwischenergebnisse informiert und lieferten wichtiges Feedback. Ebenso wichtiges Feedback lieferten diverse BGA-Betreiber, die auch für Interviews, insbesondere zur Vermarktung, zur Verfügung standen

Für die Ergebnisse zur Kostenberechnung war insbesondere die Zusammenarbeit mit dem KTBL und der TU Berlin relevant. Das KTBL lieferte Daten zu den Kosten von Transport und Ausbringung und die TU Berlin trug aus ihren Messungen Daten für die Sensitivitätsberechnungen beim Wärmeverbrauch bei. Die Grunddaten für die Kostenberechnungen stammen aus den Angeboten, die von diversen Herstellern von Gärproduktaufbereitungsanlagen eingeholt wurden.

2 Hintergrund und Einleitung

Gärprodukte werden überwiegend in der Landwirtschaft als organischer Dünger und Bodenverbesserer eingesetzt. Ihr Einsatz wird u.a. durch die Düngeverordnung (DüV) geregelt. Aufgrund von Nährstoffüberschüssen können die Gärprodukte in einigen Regionen Deutschlands nicht im regionalen Kontext eingesetzt werden. Abbildung 1 verdeutlicht die Stickstoffverteilung in Deutschland und zeigt Regionen mit Nährstoffüberschüssen auf.

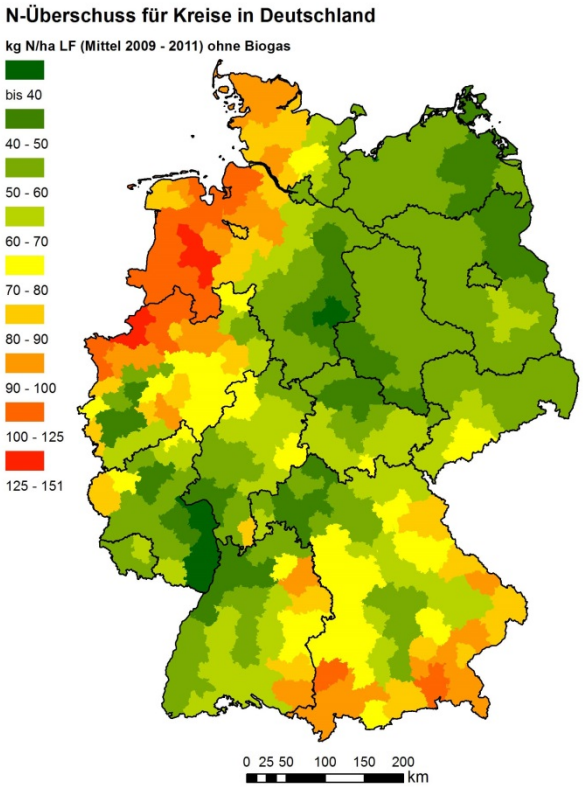


Abbildung 1: N-Überschuss für Kreise in Deutschland (eigene Darstellung; Daten von Bach 2014)

Aufgrund der am 31. März 2017 im Bundesrat beschlossenen Novelle der DüV wird der Einsatz von Gärprodukten in der Landwirtschaft erschwert werden. Lösungsansätze für die weitere Nutzung der Nährstoffe sind u.a.:

- Transport und Vermarktung von Gärprodukten in Regionen mit einem Nährstoffbedarf (z.B. Ackerbauregionen)
- Vermarktung von Gärprodukten in den nicht landwirtschaftlichen Bereich (z.B. an Privatgärtner)

Die Aufbereitung von Gärprodukten durch eine Aufkonzentrierung der Nährstoffe erhöht deren Wert je Gewichtseinheit. Abhängig von der Beschaffenheit des Gärproduktes und der gewünschten Endprodukte gibt es verschiedene Aufbereitungsverfahren. Von einer einfachen Separation bis hin zum Bandtrockner oder einer Verdampfung steht eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung. Als mögliche Endprodukte können beispielsweise Pellets, Granulat und Kügelchen sowie Flüssigkonzentrat oder Ammoniumsulfat-Lösung (ASL) erzeugt werden. Im Gegensatz zu nicht aufberei-

teten Gärprodukten sind diese Produktformen einfacher zu handhaben und geruchsärmer. Die Aufbereitung von Gärprodukten erhöht nicht nur deren Transportwürdigkeit sondern eröffnet ein breiteres Spektrum für deren Vermarktung. In der EU werden bislang über 95 % der Gärprodukte in der Landwirtschaft als Dünger und Boden-Verbesserer eingesetzt. Bereits 3 % der Gärprodukte werden jedoch zu hochwertigen Produkten aufbereitet und stehen auch für den nicht landwirtschaftlichen Bereich zur Verfügung (Saveyn und Eder 2014). Der Einsatz dieses organischen Düngers substituiert die Nutzung von mineralischen und nichterneuerbaren Rohstoffen.

3 Gärproduktvermarktung – die Perspektive der Anbieter

Für die Schaffung einer wissenschaftlichen Basis und um die Erfahrungen und Probleme bei der Gärproduktvermarktung aus Anbietersicht zu erfassen, haben wir 21 qualitative Interviews mit Vermarktern von Gärprodukten durchgeführt. Die interviewten Marktteilnehmer setzen sich sehr heterogen zusammen bezogen auf die eingesetzten Substrate, Anlagengrößen und Hintergründe (Landwirte, Kommunen, Entsorger, Investoren). Die Ansätze bezüglich der Vermarktung sind ebenfalls sehr divers. Die Anbieter können unterteilt werden in Unternehmen mit bzw. ohne Aufbereitung der Gärprodukte. Rohe Gärprodukte finden ausschließlich Anwendung in der Landwirtschaft im Gegensatz zu aufbereiteten Produkten, die auch im nicht landwirtschaftlichen Bereich vermarktet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse aus diesen Interviews sind wichtige Leitlinien für zukünftige Vermarkter und bilden eine erste Grundlage für die Untersuchungen auf der Abnehmerseite. Es wurden hemmende und fördernde Faktoren bei der Gärproduktvermarktung identifiziert, was potentiellen Vermarktern einen erleichterten Markteintritt ermöglicht. Die interviewten Unternehmen und Personen sind anonymisiert in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 1: Liste der interviewten Unternehmen

Interviewte Unternehmen

No.	Land	Interviewte Person	Substrat	Interviewform
1	CH	Anlagenbetreiber	Kommunale Abfälle	face to face
2	CH	Anlagenbetreiber	Kommunale Abfälle	face to face
3	CH	Anlagenbetreiber	Kommunale Abfälle	face to face
4	CH	Anlagenbetreiber	Kommunale Abfälle	face to face
5	CH	Anlagenbetreiber/Erdenhersteller	Kommunale Abfälle	face to face
6	DE	Anlagenbetreiber	Substrate aus der LW	face to face
7	DE	Anlagenbetreiber/Düngerhersteller	Kommunale Abfälle	face to face
8	AT	Anlagenbetreiber	Substrate aus der LW	face to face
9	DE	Anlagenbetreiber	Substrate aus der LW	face to face
10	DE	Lohnunternehmer	-	face to face
11	DE	Lohnunternehmer	-	face to face
12	DE	Anlagenbetreiber/Erdenhersteller	Substrate aus der LW	face to face
13	DE	Anlagenbetreiber	Kommunale Abfälle	face to face
14	DE	Anlagenbetreiber	Kommunale Abfälle	face to face
15	DE	Düngerhersteller/Hersteller von GAA	Substrate aus der LW	face to face
16	NL	Düngerhersteller	Substrate aus der LW	face to face
17	DE	Anlagenbetreiber	Kommunale Abfälle	face to face
18	FR	Berater	-	Telefon
19	DE	Düngerhersteller	Substrate aus der LW	face to face
20	DE	Anlagenbetreiber	Substrate aus der LW	face to face
21	DE	Anlagenbetreiber	Substrate aus der LW	face to face

(Schlüssel: CH Schweiz, DE Deutschland, FR Frankreich, AT Österreich, NL Niederlande, GAA Gärproduktaufbereitungsanlagen, LW Landwirtschaft)

Die qualitativen Interviews wurden transkribiert und mit Hilfe der Software MAXQDA analysiert. Die Daten wurden nach der zusammenfassenden Inhaltsanalyse ausgewertet und erste Ergebnisse bereits als Artikel in einem Journal mit Peer-Review Verfahren veröffentlicht (Dahlin et al. 2015). Die Einflussfaktoren und Motive für die Gärproduktvermarktung sind regional sehr verschieden. Zusammenfassend haben wir nachfolgende Erkenntnisse gewonnen. Hauptantriebe für die Vermarktung sind:

- Push-Faktoren (Abgabe der Gärreste steht im Fokus):
    - Regionen mit Nährstoffüberschüssen
    - Rechtliche Restriktionen u. Anreize (Bioabfallverordnung (BioAbfV), Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)-Bonus etc.)

- Kein verfügbares Land auf Seiten der BGAs für die Ausbringung der Gärprodukte (z.B. bei Investorenanlagen)

- Pull-Faktor (Marktchancen stehen im Fokus): Marktnische für Erden- u. Düngerhersteller

Die erzielten Preise für Gärprodukte variieren sehr stark und werden hauptsächlich von den nachfolgenden Faktoren beeinflusst:

- Produktbezogene Faktoren:
  - Ausgangsmaterial (Nachwachsende-Rohstoffe (NaWaRos), Abfall)
  - Inhaltstoffe (Dünge- und Humuswert)
  - Aufbereitungsgrad und Produktform
- Umfeldbezogene Faktoren:
  - Regionale Nährstoffüberschüsse
  - Landwirtschaftliche Struktur
  - Transportkosten
  - Jahreszeit

Diese Faktoren können die hohen Preisunterschiede von -18 bis +5 €/t für rohe Gärprodukte erklären. Aufbereitete Gärprodukte erzielen höhere Preise und können aufgrund der Aufbereitung auch im nicht landwirtschaftlichen Bereich vermarktet werden. Hier können bis zu 10€/l (ca. 0,2 kg) für ein aufbereitetes Gärprodukt erzielt werden. Der große Vorteil der Gärproduktaufbereitung ist aus Sicht der Anbieter die Aufkonzentration von Nährstoffen. Dies erhöht die Transportwürdigkeit der erzeugten Produkte.

Faktoren, die der Vermarktung von Gärprodukten aus Sicht der Anlagenbetreiber, Erden- bzw. Düngerhersteller und Vermarkter entgegenstehen, sind in Tabelle 2 aufgeführt:

Tabelle 2: Hemmende Faktoren bei der Vermarktung von Gärprodukten

BGA-Betreiber	• Energieerzeugung steht im Fokus, begrenzte Ressourcen (Zeit, Geld) • Die Investition in eine Gärproduktaufbereitung ist oft teuer und mit Risiko behaftet • Geringe Mengen an Gärprodukten (kleine BGAs), aber hohe Fixkosten für das Marketing • Schwierigkeiten, mit großen Strukturen zu konkurrieren • Transportdistanz von Gärprodukten ist begrenzt
Erden- / Düngerhersteller	• Inhomogene Nährstoffgehalte bei Gärprodukten • Alternative Substrate oft preiswerter
Bau- / Gartenmärkte	• Produktvielfalt erwünscht, durch einzelnen BGA-Betreiber kaum zu leisten • Flexibilität (Inhaltstoffe, Verfügbarkeit, Menge)

Beispiele belegen, dass eine erfolgreiche Vermarktung von Gärprodukten möglich ist. So haben einige Anlagen ein defizitäres Entsorgungsgeschäft in einen profitablen Erwerbszweig umgewandelt. Dieser Wandel ist nicht einfach zu vollziehen, sondern oft mit einem hohen personellen und finanziellen Einsatz verbunden. Der Einsatz zahlt sich häufig erst nach einigen Jahren aus. Neben qualitativ hochwertigen Produkten als Basis bedarf es oft eines hohen Aufwandes bei der Vermarktung des Endproduktes. Nachfolgende Maßnahmen wurden u.a. eingesetzt, um bestehende Kunden zu halten und neue Kunden zu akquirieren:

- Homepage, Flyer etc.
- Tag der offenen Tür u. Anlagenbesichtigungen
- Spezielle Dienstleistungen (Erde ausfahren bzw. Anlieferung in den Garten)
- Workshops bezüglich der Anwendung von Kompost
- Feldtage für Landwirte

Die Einstellung der Kunden aus dem landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Bereich bezüglich Gärprodukten ist aus Sicht der Anbieter generell positiv. Der Gartenbau kann in den Profi- bzw. Hobbybereich unterteilt werden. Hier ist, so die Sicht der Anbieter, auf Seiten der Hobbygärtner eine eminente Skepsis bezüglich der Biogasherkunft erkennbar. Es sollten, abhängig von der Zielgruppe, spezifische Produktwünsche und Einstellungen in den verschiedenen Anwendergruppen berücksichtigt werden. Bei Kunden aus der Landwirtschaft sowie dem Gartenbau könnten die nachfolgenden Aspekte identifiziert werden.

Landwirtschaftliche Kunden:

- Generelle Zufriedenheit
- Besonders bei Biobauern hohe Akzeptanz
- Akzeptanz ist insgesamt gestiegen
- Reduzierte Akzeptanz bei Produkten aus Abfallanlagen

Kunden aus dem Gartenbaubereich (Profi, Hobby):

- Zufrieden mit der Wirkung/Eigenschaft (Komposte, org. Dünger)
- Starker Geruch ist hemmender Faktor beim Verkauf
- Biogasherkunft wird eher negativ bewertet (vor allem bei Privatkunden)
- Organischer Dünger, nachwachsend, regional, torffrei / torfreduziert wir als positiv angesehen

Ein genereller Lösungsansatz für die Vermarktung von Gärprodukten ist aus den Interviews kaum zu identifizieren. Die stark variierenden Inputstoffe bedingen den Einsatz unterschiedlicher Anlagentechniken und resultieren in verschiedenartigen Gärprodukten. Beispielweise werden viele kommunale Reststoffe sowie die grüne Tonne häufig in Anlagen mit einer Boxenfermentation eingesetzt. Aufgrund des hohen Trockensubstanzgehaltes eignen sich diese Produkte eher zur Kompostierung als Gärprodukte aus einer landwirtschaftlichen Anlage mit einem hohen Gülleanteil. Die

nachfolgenden Punkte können Anlagenbetreibern jedoch als Anhaltspunkte und Lösungsansätze mitgegeben werden:

- Spezialisierung ist vorteilhaft (Landwirt hat meist keine Zeit für Marketing etc.)
- Zusammenarbeit mit Großabnehmern
- Zusammenschluss von BGAs (Pooling)
- Franchisemodell

Aus den ersten Gesprächen mit Betreibern von BGAs sowie Experten aus dem Umfeld der Gärprodukte konnten des weiteren folgende Erkenntnisse und Tendenzen gewonnen werden:

- In Ackerbauregionen oder Regionen mit einer geringen Viehdichte erzielen Gärprodukte positive Preise.
- In viehdichten Regionen und Regionen mit einer hohen BGA-Dichte werden bis zu zweistellige Eurobeträge für die Abnahme (Entsorgung) der Gärprodukte gezahlt.
- Abfall- und Reststoffanlagen haben große Schwierigkeiten, Abnehmer für ihre Produkte zu finden. In der Regel zahlt hier der Anlagenbetreiber für die Abholung der Gärreste.
- Der KWK-Bonus ist für die Anlagenbetreiber ein wichtiges Argument für die Aufbereitung von Gärprodukten.

Auf dem Gärprodukt-Markt sind viele verschiedene Vertriebswege möglich. Abhängig von der persönlichen Kreativität der Betreiber sowie den regionalen Gegebenheiten wurden viele Varianten des Produktvertriebes umgesetzt. Die möglichen Varianten sind schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

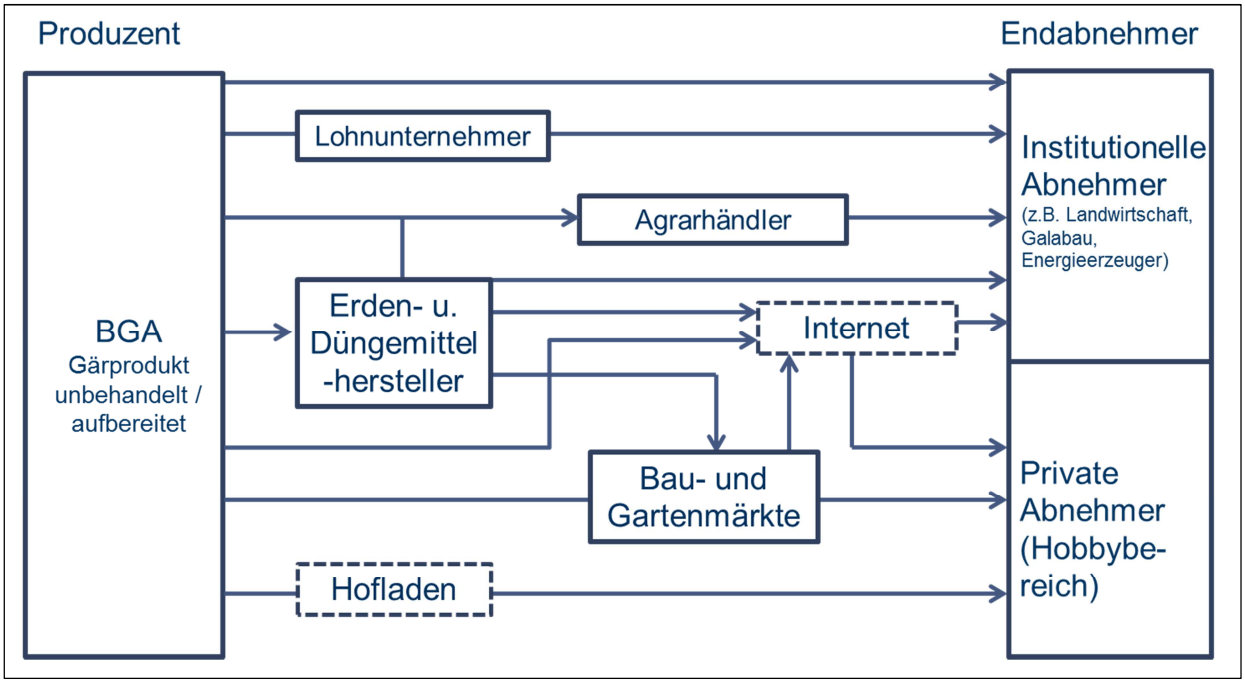


Abbildung 2: Mögliche Distributionspfade für Gärprodukte (eigene Darstellung)

In Abgrenzung zu den potenziellen Vertriebspfaden sind auch die möglichen Anwendungen für Gärprodukte sehr vielfältig. Neben der Anwendung als Dünger und Bodenverbesserer in der Landwirtschaft und dem Gartenbau, werden Gärprodukte auch als Tiereinstreu oder Brennmaterial verwendet. Weitere Verwertungs- und Anwendungspfade, wie z.B. die Herstellung von Biokohle oder als Nährmedium für die Algenproduktion werden hier nicht weiter verfolgt.

Nach der eben erfolgten Betrachtung der Anbieterseite werden in den folgenden Abschnitten die Ergebnisse der Analysen der Abnehmerseite dargestellt. Dabei wurden die Abnehmergruppen Landwirte, Garten- und Landschaftsbau sowie Hobbygärtner untersucht.

4 Gärproduktvermarktung – die Perspektive der Abnehmer

4.1 Landwirte

Die Landwirtschaft ist der größte Abnehmer für Gärprodukte. Hier werden über 95 % der anfallenden Mengen, meist unbehandelt, als Dünger und Bodenverbesserer eingesetzt. Aus den explorativen Experteninterviews haben wir bereits gute Einblicke bezüglich der vielfältigen Anforderungen von Landwirten und die Zahlungsbereitschaft für Gärprodukte gewonnen. Diese Informationen haben wir von den BGA-Betreibern und Vermarktern erhalten. Um diese explorativen Ergebnisse aus den Experteninterviews zu validieren, haben wir qualitative Telefoninterviews mit landwirtschaftlichen Abnehmern durchgeführt.

Insgesamt wurden 10 telefonische Interviews durchgeführt, aufgenommen und anschließend transkribiert und deren Inhalt ausgewertet. Die Informationen belegen unsere Erkenntnisse aus den Experteninterviews und erweitern bzw. ergänzen diese in einigen Aspekten.

Generell präferieren Landwirte Gärprodukte aus landwirtschaftlichen BGAs. Substrate wie Gülle, Festmist sowie Gras- und Maissilage sind für die Landwirte bekannte Produkte und so werden Gärprodukte, die aus diesen Rohstoffen produziert wurden, auch bevorzugt eingesetzt. Gärprodukte aus Abfallanlagen werden hingegen von den meisten Landwirten gemieden. Einige gaben sogar an, dass sie Produkte aus Abfallanlagen auf Ihren Flächen überhaupt nicht einsetzen würden. Dies wurde damit begründet, dass die eingesetzten Substrate nicht im Detail bekannt seien und mögliche unerwünschte Fremdstoffe im Gärprodukt enthalten sein könnten.

Die Abnehmer von Gärprodukten sind häufig auch Substratlieferanten einer BGA. Sie sind oft durch einen Substratliefervertrag zur Abnahme einer äquivalenten Gärproduktmenge verpflichtet oder nehmen diese aufgrund der guten Erfahrungen freiwillig ab. Da die befragten landwirtschaftlichen Betriebe sowohl aus Regionen mit Nährstoffüberschuss als auch aus Regionen mit einem Nährstoffbedarf kommen, sind die Preise bzw. Entsorgungskosten sehr verschieden. Einige Landwirte haben angegeben, eine Zuzahlung für die Abnahme von Gärprodukten zu bekommen wohingegen andere die Produkte von der BGA kostenlos selbst abholen. Interessant ist jedoch, dass sich die Landwirte in nährstoffreichen Regionen sehr bewusst darüber sind, dass die Anlagenbetreiber stark abhängig von ihnen sind.

Die Landwirte gaben an, mit den Gärprodukten sehr zufrieden zu sein und dass sie sogar auf die Zuzahlung verzichten würden. Diese Zahlung wird jedoch aufgrund des allgemein bekannten Nährstoffüberschusses in einigen Regionen und der damit schlechten Verhandlungsposition der BGA-Betreiber gerne als Bonus mitgenommen. Der Einsatz von Gärprodukten erfolgt hauptsächlich im Ackerbau und wird zur Düngung diverser Kulturen verwendet. Hier sind die Anforderungen sowie der spezifische Nährstoffbedarf verschieden. Abhängig von den Bedürfnissen der Kultur sowie der erwünschten Qualität werde zusätzlich mit mineralischen Düngern nachgedüngt. Von den Landwirten wurde betont, dass Gärprodukte sehr positive Eigenschaften für die Bodenfruchtbarkeit hätten und im Vergleich zu mineralischen Düngern preisliche Vorteile böten. Ein Landwirt aus einer nährstoffreichen Region gab sogar an, dass wenn er keine Zuzahlungen für die Abnahme von Gärprodukten bekommen würde, er im Gegenzug bereit wäre für die Lieferung von Gärprodukten einen finanziellen Betrag zu zahlen. Er merkte jedoch an, dass die Marktmacht auf Seiten der Abnehmer liege und diese frei entscheiden könnten, ob und von welchem Lieferanten sie Gärprodukte annehmen. Dies weist darauf hin, dass Landwirte auf diesen Bonus verzichten würden bzw. sogar für die Gärprodukte zahlen würden, wenn der BGA-Betreiber in einer besseren Verhandlungsposition wäre, z.B. durch die Erschließung alternativer Vermarktungspfade. In Ackerbauregionen mit einem geringen Tierbesatz ist diese Marktmacht der Abnehmer stark abgeschwächt. Hier sind alle organischen Dünger sehr nachgefragt und werden auch von den abnehmenden Landwirten abgeholt und ausgebracht.

Der aktuellen Ungewissheit bezüglich der DüV sehen viele Landwirte gelassen entgegen. Zwar wird die genaue Auslegung und Umsetzung mit Spannung erwartet, aber ein möglicher Änderungsbedarf wird erst nach der finalen Umsetzung sowie der anschließenden Interpretation der Richtlinien in Angriff genommen. Generell kam von den Landwirten Verständnis für die Änderung und Verschärfung der Düngeverordnung. Was jedoch bemängelt wurde, war das alle Regionen in Deutschland über einen Kamm geschoren würden. Diese Aussage bezog sich vor allem auf die verschiedenen Böden und deren Eignung, Nährstoffe aufzunehmen. Darüber hinaus wurde darauf hingewiesen, dass aus Sicht einiger Landwirte, eine Verschärfung nur umgesetzt würde, weil einige Regionen, vor allem an der holländischen Grenze, Probleme hätten, die Regeln der guten fachlichen Praxis zu erfüllen. Landwirte aus Ackerbauregionen, die bemüht sind, die Düngeverordnung einzuhalten, zweifeln die Rechtmäßigkeit der Praktiken in Regionen mit einem Nährstoffüberschuss an. Aus deren Sicht ist eine Einhaltung der bestehenden Regeln in Regionen mit einem Nährstoffüberschuss bereits jetzt nicht möglich und wird durch die neue Düngeverordnung nochmals erschwert. Die Ergebnisse der Befragungen mit den Landwirten sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht der Ergebnisse aus den landwirtschaftlichen Interviews zum Einsatz von Gärprodukten

	Positiv	Negativ
Anlagentyp	Landwirtschaftliche BGAs werden bevorzugt	Abfallanlagen werden von Landwirten eher gemieden
Gärproduktform	Rohe Gärprodukte werden überwiegend bevorzugt, da sie alle essentiellen Nährstoffe sowie Organik beinhalten	Aufbereitete Gärprodukte werden aufgrund der Trennung der Nährstoffe (z.B. N/P Trennung durch Separation) eher gemieden
Gärprodukteinsatz	Für Anwender, die nicht auf maximale Erträge abzielen und in Gärprodukten eine preiswerte Alternative zu mineralischen Düngern finden	Für maximale Erträge und beste Qualität werden Gärprodukte eher gemieden, da z.B. die Stickstoffmenge schwer einzustellen ist bzw. mineralisch nachgedüngt werden muss.
Preise	Positive Preise werden in Ackerbauregionen erzielt. Diese Preise spiegeln jedoch nicht den äquivalenten Düngerwert eines Gärproduktes wider	Negative Preise bzw. Zuzahlungen für die Gärproduktaufnahme werden in Regionen mit einem Nährstoffüberschuss erzielt

4.2 Garten- und Landschaftsbau

Der Garten- und Landschaftsbau bietet diverse Möglichkeiten für die Nutzung von aufbereiteten Gärprodukten. Hauptsächlich werden hier kompostierte Gärprodukte eingesetzt. Kommunale Kompostier- und Vergärungsanlagen nehmen oft Abfälle und Reststoffe aus der Landschaftspflege an. Viele Gärtnereien und Landschaftspflegebetriebe, die diese Reststoffe abliefern, verwenden die kompostierten Gärprodukte für Arbeiten im Landschafts- und Gartenbau. Oft werden größere Mengen an loser Ware abgenommen und direkt bei aktuellen Projekten eingesetzt. Einige Betriebe bevorzugen jedoch den Einsatz von Sackware, die palettenweise z.B. für ein Projekt bestellt wird. Dies hat den Vorteil, dass die kompostierten Gärprodukte nicht direkt verwendet bzw. verarbeitet werden müssen, sondern nach Bedarf eingesetzt werden können und nicht nass oder feucht werden. Verpackte Erden ermöglichen es, die Baustellen langfristiger zu planen und gegebenenfalls bei schlechtem Wetter die Baumaßnahmen zu unterbrechen. Kompostierungsanlagen gehen oft auf die Wünsche ihrer Kunden ein. Oft werden z.B. verschiedenen Erdenmischungen, die kompostierte Gärprodukte enthalten, für diverse Anwendungen fertig gemischt angeboten. Abbildung 3 zeigt eine Möglichkeit, wie eine Kompostier- und Vergärungsanlage verschiedene Erden als Schüttgut für Selbstabholer anbietet.

Abbildung 3: Vermarktung von kompostierten Gärprodukten (Foto: J. Dahlin)

Der Gartenbau wurde als Zielmarkt für Gärprodukte von einigen Akteuren aus der Biogasbranche bereits ins Auge gefasst. Sie versuchen gezielt, Gärprodukte in diesem Nischenmarkt zu vermarkten. Der große Vorteil bei der Vermarktung in diesem Bereich ist, dass die Optionen für die Nutzung der Gärprodukte diversifiziert und Nährstoffe aus der Landwirtschaft herausgenommen werden.

4.3 Privatgärtner

4.3.1 Potenzial für Gärprodukte im Privatgartenbereich

Der Gartenbau in Privathaushalten ist ein Bereich, in dem bereits geringe Mengen an Gärprodukten eingesetzt werden. Dieser könnte in der Zukunft vermehrt für den Absatz von Gärprodukten genutzt werden und dort den mineralischen Dünger ergänzen und längerfristig substituieren. In Deutschland besitzen ca. 36 Mio. Menschen und damit etwas mehr als die Hälfte aller Personen über 14 Jahren einen Garten bzw. lebt in einem Haushalt, der einen Garten besitzt (statista 2017). Insgesamt werden mit Gartenpflanzen ca. 4 Mrd. € pro Jahr umgesetzt (Zentralverband Gartenbau 2015).

Bei Privatgärtnern können hohe Verkaufspreise für Gärprodukte von bis zu 9 €/l erzielt werden. Dabei spielen die Nährstoffgehalte aus Sicht der Vermarkter oft eine untergeordnete Rolle. Diese Preise erscheinen auf dem ersten Blick sehr hoch, müssen jedoch mit Vorsicht betrachtet werden. Die Verpackungs- und Marketingkosten dürfen nicht unterschätzt werden. Hinzu kommen die Margen von über 50 %, die vom Handel für den Vertrieb und die Verkaufsfläche beansprucht werden. Die Vermarktung der Produkte geschieht u.a. ab Hof, per Internet, über einen Zwischenhändler oder direkt an ein Gartencenter.

Die Integration von Gärprodukten in diesem Sektor ist jedoch abhängig von der Akzeptanz der Düngemittelhersteller, der Vermarkter sowie der Endkunden. Die Präferenzen und Einstellungen

der Privatgärtner zu Gartendüngern sind daher von entscheidender Bedeutung und bieten wichtige Anhaltspunkte bei der Vermarktung von Gärprodukten im Gartenbaubereich. Abhängig von den eingesetzten Substraten und dem Aufbereitungsverfahren können aus den resultierenden Gärprodukten

- Komposte zur Substrat- und Erdenherstellung sowie
- organische Dünger

erzeugt werden. Diese Produktkategorien lassen sich, insbesondere aus Verbrauchersicht, nicht immer strikt trennen. In Abbildung 4 werden jeweils ein Gartendünger und einer Gartenerde gezeigt, die auf Basis von Gärprodukten aus der Biogaserzeugung hergestellt wurden.

Abbildung 4: Beispiele eines Gartendüngers und Gartenerde auf Basis von Gärprodukten (Fotos: J. Dahlin; www.allmig.ch)

Der Einsatz von Gärprodukten im Gartenbaubereich wurde bereits mehrfach aus pflanzenbaulicher Sicht untersucht. Die Qualität und Wertigkeit der Gärprodukte ist maßgeblich von den eingesetzten Inputstoffen abhängig. Diese Qualität kann zusätzlich durch unabhängige Prüflabore kontrolliert und abgesichert werden. Der Düngewert des Produktes kann über die Analyse ebenfalls berechnet werden, indem die pflanzenverfügbaren Nährstoffe mit den Düngerpreisen multipliziert werden. Schadstoffe, wie z.B. Schwermetalle, werden ebenfalls erfasst. Die absoluten Schwermetallgehalte werden durch den Biogasprozess nicht verändert sondern erhöhen sich aufgrund des Abbaus der organischen Bestandteile. Laut eines aktuellen Testergebnisses zu Gartendüngern konnte bei einigen Düngern Uran nachgewiesen werden. Dieses stammt hauptsächlich aus dem Abbau von mineralischem Phosphor. Durch die Substitution von mineralischem Phosphor durch Gärprodukte könnte dem Uraneintrag in Hausgärten vorgebeugt werden. An dieser Stelle sollte jedoch berücksichtigt werden, dass viele Gärten einen Phosphorüberschuss aufweisen und eine weitere Überdüngung vermieden werden sollte. Wie Konsumenten ihre Gärten düngen, wie sie Düngemittel auswählen und ob sie geneigt sind, Gärprodukte zu Düngezwecken in ihren Hausgärten einzusetzen, wurde bislang aber noch nicht untersucht.

4.3.2 Qualitative Interviews mit Privatgärtnern

4.3.2.1 Allgemeines

Nach unseren ersten Erkenntnissen aus den Interviews mit Vermarktern von Gärprodukten haben wir uns auf potenzielle Abnehmer von Gärprodukten fokussiert. Wie bereits aus den Experteninterviews ersichtlich wurde, ist es für die Biogasbranche entscheidend, ihre erzeugten Gärprodukte gewinnbringend zu vermarkten und somit Entsorgungskosten zu vermeiden. Dafür ist es notwendig, alternative Absatzwege außerhalb der Landwirtschaft für Gärprodukte zu etablieren. Die Vermarktung von Gärprodukten in nicht-landwirtschaftliche Nischenmärkte hat den Vorteil, dass weniger Nährstoffe für die regionale Landwirtschaft zur Verfügung stehen und somit Überschüsse minimiert und Entsorgungskosten für Gärprodukte reduziert werden können.

Einige Hersteller von Gärprodukten haben bereits begonnen, ihre Produkte an Privatgärtner zu vermarkten. Deren Ansätze waren aber bisher häufig nicht von einem professionellen Marketing geprägt und ihr Markterfolg deshalb nicht befriedigend. Als Grundlage für ein erfolgreiches Marketing sind Kenntnisse der Konsumentenpräferenzen unabdingbar. Diese fehlen bislang. Darum haben wir in unserer weiteren wissenschaftlichen Vorgehensweise qualitative Interviews mit Privatgärtnern durchgeführt. Die persönlichen Interviews zielten darauf ab, die Einstellungen, Präferenzen und das Kaufverhalten der Privatgärtner bezüglich Dünger und Erden zu evaluieren. Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse ist es potenziellen Vermarktern von Gärprodukten möglich, auf die Bedürfnisse und Wünsche der Kunden einzugehen.

Um die vielfältigen Faktoren, die eine Kaufentscheidung beeinflussen, zu ergründen, haben wir uns für einen qualitativen Ansatz bei der Konsumentenbefragung entschieden. In Forschungsfeldern, in denen wenig existierende Forschung vorliegt, ist dies ein Standardvorgehen (Fischer et al. 2014). Insgesamt haben wir 20 Interviews mit Privatgärtnern durchgeführt. Die Interviews wurden jeweils aufgezeichnet, transkribiert und anschließend mit der Inhaltsanalyse Software MAXQDA ausgewertet. Die Ergebnisse der Interviews können wie folgt zusammengefasst werden:

Der durchschnittliche Privatgärtner hat wenig fachliches Wissen darüber, welche Erden oder Dünger für seine Bedürfnisse am besten passen. Daher ist das Gefühl der Ungewissheit bei vielen Gärtnern sehr groß. Da die Pflanzen im Garten den Hobbygärtnern sehr wichtig sind und diese oft einen großen Teil ihrer Freizeit mit Gartenarbeit verbringen, wollen Privatgärtner ihre in den Garten investierte Arbeit mit Erden und Düngern absichern. Sie können aber in der Regel die Inhaltsstoffe eines Produktes und deren Passung zum Düngebedarf ihres Gartens nicht beurteilen. Nur in seltenen Fällen können Privatgärtner etwas mit den Informationen bezüglich der Nährstoffgehalte (NPK Werte; Stickstoff, Phosphor, Kalium) anfangen. So wusste zum Beispiel eine Gärtnerin gar nicht, ob hohe oder niedrige NPK Werte die Wertigkeit eines Düngers erhöhen. Beim Einkauf von Erden und Düngern wird daher hauptsächlich auf die Verpackung, das Verpackungsdesign sowie die Aufschrift geachtet. Gärtner, die z.B. einen Gemüsegarten mit Tomaten haben, werden bei

ihrer Produktauswahl vermehrt zu Produkten greifen, die durch ihren Namen und das Produktdesign die Eignung für Tomatenpflanzen implizieren. Daher würde für diesen Anwendungsbereich hauptsächlich Gemüseerde und –dünger sowie Tomatenerde und –dünger erworben. Die Inhaltsstoffe der Produkte sowie die Zusammensetzung der Nährstoffgehalte haben für die Privatkonsumenten oft nur eine geringe Aussagekraft.

Aus den ersten Erkenntnissen können für die Privatkonsumenten induktiv folgende Kategorien gebildet werden:

Tabelle 4: Kategorisierung von Privatkunden

Spontane Kunden	• Machen sich wenig Gedanken zum Produkt • Preis eher unwichtig • Herkunft zweitrangig
Preiskunden	• Erwerben nur die günstigsten Produkte • Herkunft zweitrangig
Ökologisch bewusste Kunden	• Regionale, torffreie, organische und ökologische Produkte sind erwünscht
Anspruchsvolle Kunden	• Markenbewusstsein • Spezialdünger erwünscht (Orchideen etc.)

Unter Hobbygärtnern ist das Wissen über Düngung meist sehr begrenzt. Viele Anwendungen werden aus Tradition durchgeführt und die Tipps und Tricks aus der Nachbarschaft werden oft ausprobiert, so z.B. die Düngung der Rosen mit Bananenschalen. Zu berücksichtigen ist außerdem, dass die Mehrzahl der Kunden im Gartenbaubereich weiblich ist. Die weibliche Kundengruppe könnte bei Marketing-Aktivitäten daher vermehrt berücksichtigt werden.

Da für die Privatkonsumenten eine Erde oft nur als braunes, homogenes Produkt wahrgenommen wird, sind folgende Merkmale auf einer Verpackung wichtig:

- Produktname (z.B. Tomatenerde)
- Markenname (z.B. Compo)
- Labels (z.B. Bio, Torffrei)
- Zusätzliche Merkmale (z.B. mit Guano aufgedüngt)

Dünger hingegen sind in den Augen der Privatkonsumenten alleine schon wegen ihrer Struktur und möglichen farblichen Variationen heterogener als Erden. Nachfolgende Merkmale werden von den Konsumenten bei einer Kaufentscheidung berücksichtigt:

- Produktname (z.B. Tomatendünger)
- Markenname (z.B. Compo)
- Labels (z.B. Bio)
- Rohstoff (organisch, mineralisch)
- Nährstoffgehalte (N, P, K)

Interessant ist ebenfalls, dass die Befragten nur eine vage Vorstellung davon haben, aus welchen Ausgangsmaterialien Erden oder Dünger bestehen könnten. Daher wäre es bei der Integration von Gärprodukten ratsam, deren Herkunft nicht hervorzuheben, um die oft negative Wahrnehmung bezüglich der Biogasbranche entgegenzuwirken. Wir haben dennoch die Interviewten zu ihrer generellen Einstellung zu BGAs sowie zu den gewünschten Einsatzstoffen befragt. Es hat sich abgezeichnet, dass Biogas ein generell eher schlechtes Ansehen unter den Befragten hat. Die „Tank oder Teller“ Diskussion bedingt diese eher negative Haltung und ist eine Erklärung dafür, dass die Befragten generell den Einsatz von Abfällen und Reststoffen in einer BGA über den von NaWaRos präferieren. Beim möglichen Einsatz von Gärprodukten im Garten war jedoch die Präferenz entgegengesetzt. Hier präferierten die Kunden aufgrund des Risikos von möglichen Störstoffen den Einsatz von homogenen NaWaRos gegenüber Abfallprodukten. Die Befragten zeigten also durchaus widersprüchliche Einstellungen und Präferenzen. Insgesamt bildet die qualitative Befragung aber eine gute Grundlage für eine quantitative Befragung, die die Ergebnisse stärker statistisch absichern und weitere Erkenntnisse ermöglichen soll.

4.3.2.2 Differenzierung bei der Düngeranwendung

Die interviewten Privatgärtner unterscheiden bei der Anwendung von Düngern und Erden im Garten oft zwischen den verschiedenen Pflanzen und deren Nutzung. Vermehrt wurde angegeben, dass für den Gemüseanbau organische Dünger bevorzugt eingesetzt würden. Begründet wurde dies mit dem Wunsch, biologisches Gemüse selbst zu erzeugen. Mineralischer Dünger werde dagegen vermehrt bei Zier- und Kübelpflanzen eingesetzt. Aufgrund der blauen oder weißen Farbe wurde dieser Dünger den Bereichen „Chemie“ und „Spritzmittel“ zugeordnet und mit möglichen Belastungen assoziiert. Trotz der eher negativen Einstellung zu mineralischen Düngern werden diese bei Zierpflanzen bevorzugt angewendet. Zierpflanzen müssen in den Augen des Privatgärtners nur schön aussehen, werden jedoch nicht verzehrt und müssen daher nicht „gesund“ sein. Dünger werden im Garten häufig eingesetzt, obwohl die absolute Notwendigkeit dafür von den Privatgärtnern selbst bezweifelt wird. Dies wurde damit begründet, dass sie als Hobbygärtner ihre Freizeit für den Garten opfern, im Gegenzug aber die Früchte ihrer Arbeit ernten wollen. Der Einsatz von Düngern ist für viele Gärtner daher eine zusätzliche Absicherung ihrer Arbeit.

4.3.2.3 Bereitschaft, Biogas-Gärprodukte einzusetzen

Die Einstellung der meisten interviewten Personen zu Biogas ist tendenziell eher negativ. Zwar werden erneuerbare Energien und die Verwertung von organischen Abfallstoffen in BGAs generell begrüßt – der gezielte Anbau von nachwachsenden Rohstoffen sowie die „Tank oder Teller“ Diskussion wurden jedoch negativ bewertet. Darüber hinaus wurde die Biodiesel- und Bioethanolherstellung oft mit Biogasgewinnung gleichgesetzt. Für manche der Befragten spielte die Biogasthematik jedoch überhaupt keine Rolle. Die Präferenzen bezüglich der möglichen Ausgangsstoffe der Gärprodukte waren sehr unterschiedlich. NaWaRos wurden eher negativ bewertet, da sie speziell

für die Biogasgewinnung angebaut würden. Ihre Eigenschaften hingegen wurden aufgrund ihrer Homogenität für einen möglichen Einsatz im Garten durchaus positiv bewertet. Bei Gärprodukten aus Abfallanlagen war es genau entgegengesetzt. Die Verwertung von organischen Reststoffen und die zusätzliche Gewinnung von Energie wurden positiv bewertet. Deren Einsatz im Garten würden viele Privatgärtner jedoch meiden, da unliebsame Rest- und Störstoffe darin vermutet werden. Plastik, Glas und Metall sowie die Möglichkeit von Fleischabfällen und darin enthaltenen Knochen wurden damit assoziiert. Gülle und Mist wurden mit starkem Geruch in Verbindung gebracht. Bei einem möglichen Einsatz im Garten waren die interviewten Privatgärtner zwiegespalten. Mist und Gülle sind als Dünger bekanntlich eine gute Möglichkeit, aber aufgrund des Geruchs, der damit assoziiert wird, sind die Kunden eher zurückhaltend.

4.3.3 Quantitative Befragung von Privatgärtnern

4.3.3.1 Experimentelles Design und Erhebung der Daten

Aufbauend auf den qualitativen Ergebnissen haben wir einen Fragenkatalog für eine großzahlige Studie erarbeitet. Ziel war es, zu verstehen, welche Eigenschaften von Düngern bzw. Erden von den Konsumenten als positiv empfunden werden und welchen Einfluss diese Eigenschaften auf die Kaufentscheidung haben. In Zusammenarbeit mit dem Marktforschungsinstitut TNS Infratest haben wir insgesamt 1.011 Personen zu ihrem Einkaufsverhalten bezüglich Erden und Düngern befragt. Nur Personen, die einen Garten besitzen, durften an der Online-Befragung teilnehmen. Ein weiteres Auswahlkriterium bestand darin, dass diese Personen innerhalb der letzten 3 Jahre entweder Erden oder Dünger erworben haben mussten. Im ersten Teil der Befragung gab es einige generelle Fragen zum Garten sowie dem präferierten Einkaufsort für Dünger und Erden. Anschließend durften die Befragten in einer simulierten Einkaufsentscheidung (sogenanntes Discrete Choice-Experiment, siehe Abbildung 5) entweder Erden oder Dünger aus jeweils drei Produkten mit verschiedenen Merkmalen (Attributen) auswählen. Diese hypothetische Kaufentscheidung wurde jeweils 12 Mal wiederholt.

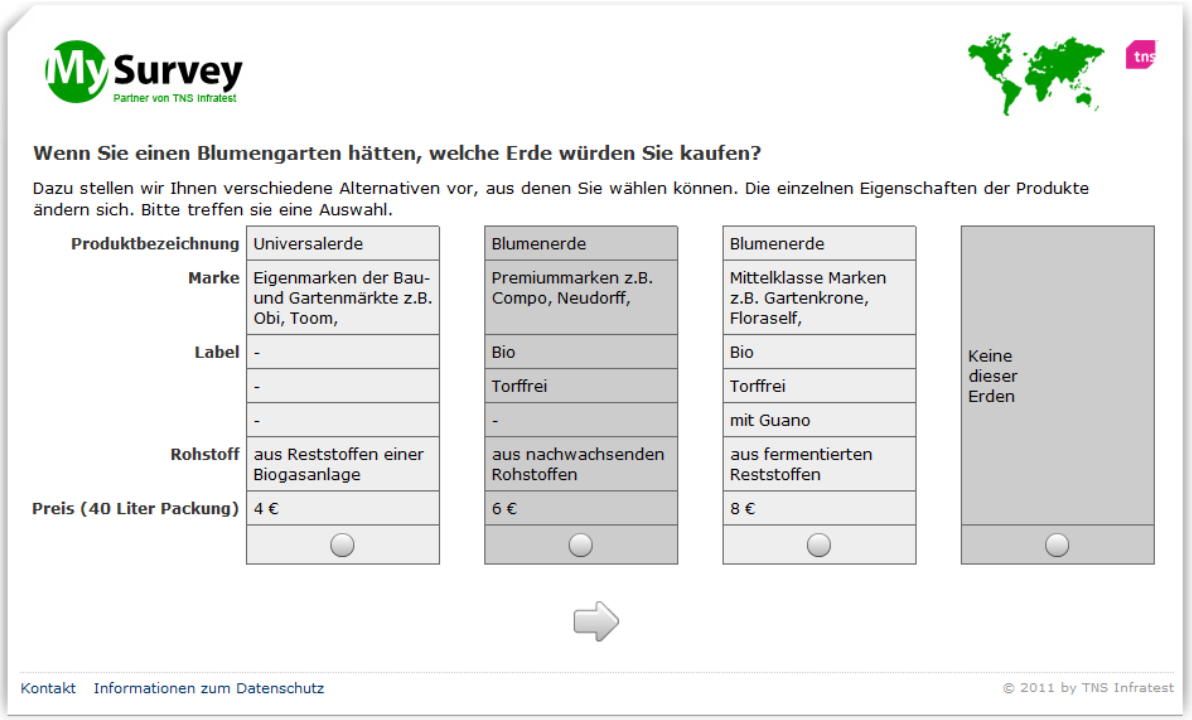


Abbildung 5: Beispiel eines Choice Experiments (Foto: J. Dahlin)

Choice-Experimente sind in der praktischen und wissenschaftlichen Konsumentenforschung ein Standardinstrument zur indirekten Ermittlung von Präferenzen (Louviere et al. 2000; Train 2009). Anhand eines solchen Experiments kann anschließend ausgewertet werden, auf welche Produkteigenschaften ein Konsument achtet und die Präferenzen für bestimmte Produktmerkmale (Attribute) können bestimmt werden. Abbildung 6 zeigt die vielfältige Düngerauswahl in einem Gartenmarkt und verdeutlicht, vor welcher Herausforderung ein Käufer bei der Entscheidungsfindung steht.

Abbildung 6: Vielfalt an Produkt- und Verpackungsvarianten von Düngern (Foto: J. Dahlin)

Die Vorgehensweise in einem Discrete Choice-Experiment ermöglicht eine Bewertung der verschiedenen Produktattribute, z.B. wie wichtig Konsumenten eine torffreie Erde ist und wie viel sie bereit sind, dafür zu bezahlen. Ein solches Discrete Choice-Experiment haben wir jeweils für Erden und Dünger durchgeführt. Bei den Erden haben 507 Privatgärtner am Experiment teilgenommen und bei den Düngern waren es 504 Personen. Mit diesem Ansatz können wir die Einzelnutzenwerte der verschiedenen Attribute auf individueller Ebene auswerten. Dies hat den Vorteil, dass eine Segmentierung der Kundenbasis nach verschiedenen Gruppenmerkmalen (Alter, Geschlecht, Einkommen) oder Gruppen mit ähnlichen Präferenzen ermöglicht wird.

4.3.3.2 Discrete Choice-Experiment: Dünger

Wir haben im ersten Schritt eine Segmentierung in 5 Gruppen (latent class analysis) mit ähnlichen Präferenzen vorgenommen. Tabelle 5 veranschaulicht die prozentuale Bedeutung der verschiedenen Produktattribute für 5 Kundengruppen (aufgrund von Rundungen kann die Gesamtsumme von 100% abweichen). Die Prozentwerte sind wie folgt zu verstehen: die Prozentwerte geben an, wie wichtig das jeweilige Attribut für eine Kundengruppe ist. Es gibt jedoch nicht an, welches Attributlevel (z.B. hohe oder niedrige Preise) von den Gärtnern präferiert wird. Gut zu erkennen ist z.B., dass die Gruppen 2 und 3 primär auf den Preis des Produktes achten. Personen der Gruppe 5 hingegen achten stark auf die Marke des Produktes und beziehen andere Faktoren, wie den Preis und den Nährstoffgehalt in ihre Entscheidung mit ein.

Tabelle 5: Prozentuelle Bedeutung der Produktattribute für 5 Kundengruppen (Dünger)

n=504	Gruppe 1 (n=53)	Gruppe 2 (n=36)	Gruppe 3 (n=96)	Gruppe 4 (n=273)	Gruppe 5 (n=46)
Düngertyp (Universaldünger/Spezialdünger)	34%	1%	2%	12%	3%
Marke (Premiumdünger/Billigdünger)	7%	6%	6%	9%	46%
Label Bio (ja/nein)	12%	19%	1%	18%	13%
Nährstoffgehalte (NPK)	8%	6%	7%	15%	5%
organisch/mineralisch	4%	1%	4%	6%	14%
Preis (6€, 9€ ,12€)	35%	67%	80%	39%	19%

Die verschiedenen Attribute können noch weiter ausdifferenziert werden und eine Bewertung der einzelnen Ausprägungen vorgenommen werden. In Tabelle 6 sind die Teilnutzenwerte der Produktattribute für Dünger dargestellt. Eine positive Zahl wirkt sich positiv auf die Kaufentscheidung aus. Gut zu erkennen ist bei dieser näheren Betrachtung, dass bei Gruppe 2 und 3 der Preis das entscheidende Einkaufskriterium darstellt und günstige Produkte teuren deutlich vorgezogen werden. In Gruppe 5 ist dies jedoch genau entgegengesetzt. Dort werden teure Produkte billigen Pro-

dukten vorgezogen. Interessant ist bei diesem Experiment auch, dass die Nährstoffgehalte nur einen geringen Einfluss auf die Kaufentscheidung haben.

Tabelle 6: Teilnutzenwerte der Produktattribute (Dünger)

Attribut	Attributlevel	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5
Produktbe-zeichnung	Universaldünger	101,85	1,95	-6,15	-37,09	10,01
	Blumendünger	-101,85	-1,95	6,15	37,09	-10,01
Marke	Premiummarken z.B. Compo, Neudorff	20,10	-15,37	-21,48	22,63	176,92
	Mittelklasse Marken z.B. Gar-tenkrone, Floraself	-20,88	-4,21	5,03	-28,86	-76,37
	Eigenmarken der Bau- und Gartenmärkte z.B. Obi, Toom	0,78	19,57	16,44	6,23	-100,56
Label	-	-35,02	-57,28	2,81	-54,01	38,52
	Bio	35,02	57,28	-2,81	54,01	-38,52
Nährstoff-gehalte (NPK)	4 - 2 -3	-33,54	-19,45	-14,88	-45,94	-6,86
	8 - 6 – 7	16,09	15,17	28,10	0,21	18,07
	12 - 10 – 11	17,44	4,28	-13,22	45,74	-11,21
Rohstoffe	Organisch	-10,91	-3,63	11,18	19,35	41,20
	Mineralisch	10,91	3,63	-11,18	-19,35	-41,20
Preise	6 €	98,67	196,10	230,55	14,76	-69,48
	9 €	15,13	12,53	17,73	110,58	25,17
	12 €	-113,80	-208,63	-248,28	-125,34	44,32

Die soziodemographische Auswertung der Düngerkäufer kann weitere hilfreiche Einblicke geben und lässt Rückschlüsse auf bestimmte Präferenzen zu. Gruppe 5 z.B. hat das durchschnittlich höchste Bildung- und Einkommensniveau (siehe Tabelle 8). Daher verwundert es nicht, dass diese Gruppe präferiert hochpreisige Produkte erwirbt. Für die Auswertung der demographischen Daten haben wir das Alter, Einkommen, Bildungsgrad, Haushaltsgröße sowie das Haushaltseinkommen der Konsumenten erfragt. Diese Parameter können darüber Aufschluss geben, ob z.B. Konsumenten mit einem hohen Einkommen bereit sind, hochpreisige Produkte zu erwerben. In Tabelle 7 sind die soziodemographischen Daten sowie weiterführende Fragen zum Garten und der Düngernutzung aufgeführt.

Tabelle 7: Soziodemographischen Daten

Soziodemographische Daten	
• Alter	in Jahren
• Geschlecht	(weiblich in %)
• Haushaltsgröße	Personenanzahl
• Einkommen (gesamtes Haushaltsnettoeinkommen):	1 = unter 1000€, 2 = 1000–1999€, 3 = 2000–2999€, 4 = 3000–3999€, 5 = 4000–4999€, 6 = 5000€ und mehr
• Bildungsgrad:	1= keinen beruflichen Abschluss 2 = in der Ausbildung 3 = Berufsausbildung abgeschlossen 4 = Ausbildung an einer Fach-, Meister-, Technikerschule abgeschlossen 5 = Fachhochschulabschluss 6 = Universitätsabschluss, Promotion
Fragen zum Garten	
• Art des Düngers für den Garten (z.B. Rasen); von 1 bis 5	1 = nur fest 5 = nur flüssig
• Art des Düngers für in Topfpflanzen; von 1 bis 5	1 = nur fest 5 = nur flüssig
• Ich bin mir sicher, welches Produkt zu meinen Pflanzen passt; von 1 bis 6	1 = stimme gar nicht zu 6 = stimme voll zu
• Dünger wird benötigt, um das Pflanzenwachstum abzusichern; von 1 bis 6	1 = stimme gar nicht zu 6 = stimme voll zu
• Gärtnern ist ein wichtiges Hobby von mir; von 1 bis 6	1 = stimme gar nicht zu 6 = stimme voll zu

Die erfragten sozioökonomischen Daten und weiterführende Gartenfragen wurden in einem weiteren Schritt den bereits herausgearbeiteten 5 Gruppen zugeordnet und ausgewertet. Durch diese Zuordnung einiger Aussagen können sich mögliche Kaufentscheidungen besser erklären lassen. Die ausgewerteten Daten für die 5 latenten Gruppen sind in Tabelle 8 abgebildet.

Tabelle 8: Soziodemographische Daten der 5 Gruppen

	Gruppe 1 *n* = 53	Gruppe 2 *n* = 36	Gruppe 3 *n* = 96	Gruppe 4 *n* = 273	Gruppe 5 *n* = 46
Soziodemographische Daten					
Durchschnittsalter (Jahre)	52.06 (12.42)	57.25 (10.34)	53.14 (13.08)	51.47 (13.78)	52.11 (10.59)
Geschlecht (weiblich in %)	49%	36%	44%	44%	48%
Haushaltsgröße	2.77 (1.15)	2.42 (0.91)	2.51 (1.14)	2.68 (1.07)	2.57 (1.09)
Einkommensniveau	4.02 (1.50)	3.78 (1.55)	3.67 (1.61)	3.92 (1.53)	4.02 (1.26)
Bildungsgrad	3.98 (1.34)	3.64 (1.15)	3.89 (1.35)	3.86 (1.15)	4.09 (1.15)
Fragen zum Garten					
Art des Düngers im Garten (z.B. Rasen)	1.94 (0.79)	2.08 (0.97)	1.99 (0.96)	2.21 (0.85)	2.17 (0.74)
Art des Düngers in Topfpflanzen	2.68 (1.06)	2.94 (1.16)	3.11 (1.17)	3.00 (0.97)	2.98 (0.95)
Sicherheit bezüglich des Produktkaufs	3.79 (1.23)	4.03 (1.18)	3.89 (1.08)	4.43 (1.09)	4.96 (1.01)
Dünger wird benötigt, um das Pflanzen-wachstum abzusichern	4.94 (0.85)	4.68 (0.88)	4.79 (0.94)	5.02 (0.82)	5.37 (0.68)
Gärtnern ist ein wichti-ges Hobby von mir	4.19 (1.34)	4.43 (1.44)	4.25 (1.29)	4.72 (1.22)	5.11 (1.22)

Nach genauer Betrachtung von Tabelle 8 lassen sich aus diesen Daten einige Faktoren, die einen Einfluss auf die Kaufentscheidung haben, erkennen. Gruppe 5, die ein hohes Einkommen sowie einen hohen Bildungsgrad hat, präferiert hochpreisige Produkte. Die Konsumenten aus Gruppe 5 gaben ebenfalls an, dass Gärtnern ein wichtiges Hobby für sie ist, eine weitere Begründung dafür, dass Premiumprodukte bevorzugt werden. Auf der anderen Seite stehen die Gruppen 2 und 3, die fast ausschließlich günstige Produkte präferieren. Diese Tendenz kann möglicherweise unter anderem auf den niedrigeren Bildungsgrad sowie das niedrigere Einkommensniveau zurückgeführt werden. Die Produktform des Düngers entscheidet oft über den Anwendungsbereich. So finden flüssige Dünger vermehrt bei Topfpflanzen Anwendung, wohingegen feste Dünger häufiger im Garten eingesetzt werden. Bei der Frage, wie sicher sich die Privatgärtner bezüglich ihrer Kaufentscheidung sind, war sich Gruppe 5, vermutlich aufgrund der höheren Zahlungsbereitschaft, sehr sicher.

4.3.3.3 Discrete Choice–Experiment: Erden

Kohärent zu den Düngern haben wir ebenfalls bei Gartenerden ein Choice-Experiment durchgeführt und eine Einteilung in 5 Gruppen vorgenommen. Wiederum gut zu erkennen ist, dass in allen Gruppen, außer in Gruppe 3, der Produktpreis von großer Bedeutung für die Kaufabsicht ist. In Gruppe 3 spielte die eingesetzte Rohstoffbezeichnung eine wichtigere Rolle als der Preis (siehe Tabelle 9, aufgrund von Rundungen kann die Gesamtsumme von 100% abweichen). Tabelle 10 gibt nähere Einblicke zu den Produktattributen und verdeutlicht die Präferenzen der jeweiligen Gruppen.

Tabelle 9: Prozentuelle Bedeutung der Produktattribute für 5 Kundengruppen (Erde)

n=507	Gruppe 1 (n=55)	Gruppe 2 (n=148)	Gruppe 3 (n=61)	Gruppe 4 (n= 116)	Gruppe 5 (n=127)
Erdentyp (Universal-/Blumenerde)	6%	4%	2%	11%	3%
Marke (Premium, Mittelklasse, Eigen-marken)	5%	7%	7%	9%	10%
Label (Bio)	1%	2%	13%	5%	2%
Label (Torffrei)	1%	11%	11%	9%	5%
Label (mit Guano)	20%	11%	9%	3%	5%
Rohstoff (NaWaRos, fermentierte Reststoff-fe, Reststoffe BGA)	30%	9%	44%	16%	5%
Preis (4€, 6€, 8€)	36%	567%	16%	49%	69%

Tabelle 10: Teilnutzenwerte der Produktattribute (Erde)

Attribut	Attributlevel	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5
Produktbe-zeichnung	Universalerde	-21,93	-12,34	5,24	-38,01	10,98
	Blumenerde	21,93	12,34	-5,24	38,01	-10,98
Marke	Premiummarken z.B. Compo, Neudorff,	16,08	-30,62	29,65	37,47	-31,62
	Mittelklasse Marken z.B. Gartenkrone, Floraself,	-17,27	11,33	-13,83	-15,01	-3,85
	Eigenmarken der Bau- und Gartenmärkte z.B. Obi, Toom,	1,19	19,29	-15,82	-22,46	35,48
Label	Bio	4,07	6,63	43,93	16,53	-8,71
	-	-4,07	-6,63	-43,93	-16,53	8,71
	Torffrei	-4,15	38,54	36,88	31,32	-18,57
	-	4,15	-38,54	-36,88	-31,32	18,57
	mit Guano	-71,24	38,05	29,95	9, 18	-18,83
	-	71,24	-38,05	-29,95	-9,18	18,83
Rohstoffe	aus nachwachsenden Rohstoffen	125,93	40,41	184,19	55,46	19,69
	aus fermentierten Rest-stoffen	-39,58	-19,34	-60,56	-2,28	-6,36
	aus Reststoffen einer BGA	-86,35	-21,07	-123,64	-53,18	-13,32
Preis	4 €	81,62	117,12	67,20	-224,17	244,74
	6 €	84,99	140,17	-19,71	106,99	-3,77
	8 €	-166,60	-257,30	-47,49	117,18	-240,97
	NONE	344,24	-741,40	-130,03	-831,91	-40,65

In Gruppe 4 ist deutlich zu sehen, dass Premiumprodukte vor anderen Produkten präferiert werden. Weitere Produkteigenschaften, wie z.B. eine hochpreisige, torffreie Bio-Erde, die mit Guano aufgedüngt ist, erzielen gerade in dieser Kundengruppe einen hohen Zuspruch.

Gruppe 5 ist hingegen sehr preissensitiv, schaut daher hauptsächlich auf den Preis des Produktes und bevorzugt die günstigsten Produkte. Alle Attribute, die einen erhöhten Preis vermuten lassen, werden von dieser Kundengruppe gemieden. Daher werden hauptsächlich günstigere Eigenmarken der Bau- und Gartenmärkte erworben und Attribute, wie z.B. Bio-Erden gemieden.

4.3.3.4 Empfehlungen für Marketing-Instrumente

Gärproduktanbieter können wichtige Schlussfolgerungen u.a. aus den Choice-Experimenten für die erfolgreiche Vermarktung ziehen:

- Produktpolitik
  - Der Produktname (Buchsdünger, Rosendünger, Tomatendünger etc.) ist von großer Bedeutung beim Kauf, da er eine empfehlende Wirkung hat
  - Nährstoffgehalte sind für viele Käufer ohne Aussagekraft
  - Dünger mit Bio-Label sowie der Ausgangsstoffe (mineralisch/organisch) sind nur für eine kleinere Käuferschicht von Bedeutung
- Preispolitik
  - Niedrig- und mittelpreisige Produkte werden überwiegend nachgefragt
  - Hochpreisige Premiumprodukte werden nur von einer Minderheit erworben
- Kommunikationspolitik
  - Ansprechende Homepage
  - Öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen
- Distributionspolitik
  - Zugang zu Großabnehmern wie z.B. Bau- und Gartenmärkten

4.3.3.5 Ausblick

Der Markt für Dünger im Gartenbaubereich wird von etablierten Unternehmen bestimmt, deren Strukturen über Jahre hinweg gewachsen sind. Für neue Anbieter ist es daher schwierig, sich zu etablieren. Der Biogas Sektor hat sich erst in den letzten zehn Jahren stark entwickelt. Aufgrund der oft hohen Entsorgungskosten für unbehandelte Gärprodukte in Regionen mit einem Nährstoffüberschuss sowie rechtliche Restriktionen ist der Druck zum Handeln gegeben. Daher müssen weitere Absatzmärkte und Strukturen für die Gärproduktvermarktung entwickelt und etabliert werden. Dabei sind regionale Lösungen anzustreben weil sie den Vorteil einer lokalen Wertschöpfung sowie vermiedener Transportkosten haben. Zusätzlich könnten steigende Preise für mineralische Dünger die Wertschätzung und Nachfrage nach Gärprodukten auf Seiten der Düngerhersteller positiv beeinflussen. In einigen bereits auf dem Markt befindlichen Düngern werden u.a. tierische Nebenprodukte der Kategorie 3 (Material mit einem geringen Risiko) sowie pflanzliche Stoffe aus der Lebens-, Genuss- und Futtermittelindustrie angeboten. Gärprodukte könnten in diesen Düngern ebenfalls integriert werden. Da vielen Privatgärtnern nicht bewusst ist, welche Ausgangsstoffe in Ihrem Dünger enthalten sind, könnten Gärprodukte ebenfalls integriert werden. Von einer deutli-

chen Kenntlichmachung der Biogas Herkunft ist jedoch abzuraten. Die Düngermittelhersteller sind an dieser Stelle das entscheidende Nadelöhr bei einer weiteren Integration von Gärprodukten in den Markt für Gartendünger für Privathaushalte.

5 Vermarktungsansätze

Gärprodukte können entweder als reines 100%iges Gärprodukt oder als Mischprodukt hergestellt und angeboten werden. Der Trockensubstanzgehalt sollte mindestens 85 % betragen um eine angemessene Produktstabilität über die gesamte Wertschöpfungskette inclusive Lagerung im Handel leisten zu können. Die Gärprodukte werden in verschiedenen Produktformen und Verpackungsgrößen vertrieben. Die Verpackungsvarianten reichen von kleinen Eimern über Kartons bis hin zu Säcken und Big Bags.

Aufgrund der geringen anfallenden Mengen einer einzelnen BGA ist der Vertrieb an einen überregionalen Großabnehmer nur schwer zu realisieren. Der Vertrieb der Gärprodukte erfolgt daher vornehmlich an einen kleinen und regionalen Kundenkreis. Der Absatz auf diesem Wege ist sehr aufwändig, da die Abfüllung, Etikettierung und Auslieferung kleiner Chargen sehr zeitintensiv ist. Skaleneffekte kann der Einzelbetrieb kaum erzielen.

Mit der Produktvielfalt und den Preisen der großen Hersteller und Gartencenter können kleine Anbieter oft nicht mithalten. Darüber hinaus ist es für neue Produkte aufgrund ihrer mangelnden Bekanntheit schwierig mit den etablierten Produkten und Marken zu konkurrieren. BGA-Betreiber gehen oft so vor, dass sie ein Produkt erst erzeugen und im zweiten Schritt versuchen, dafür einen Markt zu finden und mögliche Kundenwünsche zu berücksichtigen. Die Kundenwünsche können dabei eher von größeren Anbietern und Unternehmen umgesetzt werden, da eine größere Produktvielfalt angeboten werden kann. In Belgien und den Niederlanden gibt es bereits Düngemittelhersteller, die getrocknete Gärprodukte erwerben um anschließend durch Zugabe von weiteren mineralischen und organischen Düngern ein gewünschtes Endprodukt zu erzielen. Somit kann ein uniformes Produkt mit einer einheitlicher Produktform sowie konstanten Nährstoffgehalten hergestellt werden. Ab einer bestimmten Größe erhöht sich die Wahrscheinlichkeit auch für größere Abnehmer (z.B. Gartencenter) als interessanter Lieferant eingestuft zu werden. Für größere Abnehmer, wie z. B. Weiterverarbeiter und Gartencenter, sind eine gleichbleibende Qualität sowie konstante Nährstoffgehalte von zentraler Bedeutung. Um Gärprodukte nachfrageorientiert produzieren zu können, ist es wichtig, die Präferenzen der Kunden zu berücksichtigen.

6 Aspekte der Nachhaltigkeit

Die wertgebenden Eigenschaften eines Düngers sind u.a. die Nährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium. Die Produktion von Düngern ist sehr energieintensiv und verbraucht daher viele nichterneuerbare Energieträger. Stickstoff wird durch das energieintensive Haber-Bosch Verfahren hergestellt und Phosphor und Kalium werden abgebaut (Heffer und Prud'homme 2015). Der politische Fokus konzentriert sich oft auf die Nutzung von nachhaltigen und erneuerbaren Energiequellen

sowie Energieeinsparungsmaßnahmen. Andere Bereiche, wie z.B. der Düngersektor, der 1,2 % der globalen Energie für die Produktion in Anspruch nimmt, werden hingegen vernachlässigt. Dabei bietet die Herstellung und Nutzung von organischen und regional erzeugten Düngern und Boden-Verbesserern viele Vorteile:

- Reduzierung der Importabhängigkeit von Rohstoffen, z.B. befinden sich77 % der Phosphorreserven in Marokko (Cooper et al. 2011; Walan et al. 2014)
- Verminderung des Energieverbrauchs für die Herstellung von Düngern
- Nutzung von Synergien durch die Nutzung der BHKW Abwärme für die Herstellung von organischen Düngern und damit Steigerung des Gesamtwirkungsgrades
- Stärkung der Kreislaufwirtschaft und Schaffung von regionalen Arbeitsplätzen

Diese Potenziale sind noch weitestgehend ungenutzt und bedürfen einer Sensibilisierung aller Betroffenen wie Behörden, Verbände, Dünger- und Erdenproduzenten sowie den möglichen Endkunden. Zwar hat sich nach dem starken Biogas-Boom der Fokus vermehrt auf die Effizienzsteigerung von BGAs sowie die Aufbereitung und Nutzung von Gärprodukten gerichtet. Es besteht jedoch weiterhin ein großes Potenzial für die Aufbereitung, Vermarktung und Nutzung dieser wertvollen Ressource und es braucht daher eine weitere Sensibilisierung bezüglich der vielfältigen Vorteile dieser Produkte.

Bei der Vermarktung von Konsumgütern bedarf es oft eines übergeordneten Anreizes oder Sympathieträgers für die Sensibilisierung potenzieller Konsumenten. Bei Energieprodukten spielt die Herkunft aus erneuerbaren Energien eine wichtige Rolle (Tabi et al. 2014). Bei Lebensmitteln ist ein Bio- oder Fairtrade-Siegel oft von Bedeutung für „Grüne Konsumenten“ (Thøgersen und Nielsen 2016; Janssen und Hamm 2014; Meyerding 2016). Diese Ansätze können alle unter dem Nachhaltigkeitsaspekt eingeordnet werden. Das Recycling von Nährstoffen sowie der Schutz von natürlichen und nichterneuerbaren Ressourcen kann direkt auf Gärprodukte oder artverwandte Produkte übertragen werden.

Bei Privatkonsumenten findet bereits seit vielen Jahren eine Sensibilisierung in Bezug auf Nachhaltigkeit statt. Gartenerden sind z.B. aufgrund des oft hohen Torfanteils in den Fokus gerückt, da aufgrund des Torfabbaus biologisch wertvolle Lebensräume zerstört werden. Der Status von Torf als nichterneuerbare oder nur langsam erneuerbare Ressource ist noch nicht eindeutig definiert (Quintero et al. 2015). In Abbildung 7 ist ein Straßenschild mit dem Verkaufsargument für den Moorschutz dargestellt.

Abbildung 7: Bewerbung einer regional erzeugten und torffreien Erde (Foto: J. Dahlin)

In vielen Gartenmärkten gibt es bereits die Möglichkeit torffreie Erden zu erwerben. Dies stellt ein wichtiges Verkaufsargument für Vermarkter von kompostierten Gärprodukten dar.

7 Gärproduktaufbereitung und resultierende Kosten

Gärprodukte können auf vielfältige Weise aufbereitet werden. Von einer einfachen Separation bis hin zu hochkomplexen Systemen wie dem Membranverfahren gibt es eine große Auswahl an zur Verfügung stehenden Technologien. Diese unterscheiden sich stark hinsichtlich ihrer Komplexität, Nutzerfreundlichkeit, Anfälligkeit, erzeugten Produkten sowie den Investitionskosten. Welche Aufbereitungsverfahren für eine BGA geeignet sind, hängt von der Beschaffenheit des Gärproduktes, den gewünschten Endprodukten sowie den Umfeldbedingungen der BGA ab. Nachfolgend stellen wir ein Modell zur Unterstützung bei der Entscheidungsfindung dar. Die wesentlichen Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnungen sind im gemeinsamen Teil des Endberichtes dargestellt.

7.1 Berechnung einer Biogas Modellanlage sowie Angebotseinholung

Für die Erarbeitung einer Entscheidungsgrundlage haben wir uns für die Berechnung von zwei Biogas-Modellanlagen entschieden. Mit den Kennzahlen dieser Modellanlagen haben wir anschließend technische sowie ökonomische Angebote bei diversen Herstellern von Gärproduktaufbereitungsanlagen erbeten. Die Biogas-Modellanlagen hat jeweils eine Leistung von 500 kW_{el} bzw. 2 MW_{el}. Wir haben uns bei der Berechnung für diese zwei Größenklassen entschieden, da eine BGA mit 500kW_{el} eine vielfältig gebaute Variante darstellt, die oft im landwirtschaftlichen Bereich vorzufinden ist. Die größere Variante mit 2 MW_{el} bildet im Kontrast eher eine Abfall- bzw. Investorenanlage ab, bei denen wegen der in Kapitel 1 geschilderten Umstände (große Mengen, keine eigenen Flächen) eine Aufbereitung der Gärreste besonders häufig notwendig ist. Für diese Größenklasse sind einige Aufbereitungstechnologien verfügbar, die jedoch aufgrund der höheren Kosten nicht bei kleineren Hofbiogasanlagen, bis zu einer Größe von ca. 500 kW zur Anwendung kommen. Darüber hinaus bieten diese zwei Größenklassen die Möglichkeit bei Verfahren, die in

beiden Varianten eingesetzt werden können, einen möglichen Größendegressionseffekt aufzuzeigen. Die Kenngrößen von Variante 1 (500 kW_{el}) und Variante 2 (2 MW_{el}) sind nachfolgend in Tabelle 11aufgeführt:

Tabelle 11: Kenngrößen der 500 kW sowie 2 MW Modellanlage

Gärprodukte		**Variante 1**	**Variante 2**
Gärprodukte gesamt (t)		**10.715 t**	**42.859 t**
TM (%) Gärprodukte gesamt		**7,89%**	**7,89%**
oTM gesamt (%)		5,59%	5,59%
Mais Gärprodukt (t)		6.214 t	24.855 t
Rindergülle Gärprodukt (t)		4.501 t	18.004 t

Variante 1:

Eine BGA mit einer elektrischen Leistung von 500 kW und einem angenommenen Substratinput von 13.383 t. Der Substratinput besteht zu 65 % aus Mais (8.699 t) und zu 35 % aus Gülle (4.684 t). Die daraus resultierenden Gärprodukte belaufen sich auf 10.715 t mit einem durchschnittlichen Trockenmassegehalt von 7,89 %.

Variante 2:

Bei der zweiten Variante handelt es sich um eine BGA mit 2,0 MW elektrischer Leistung. Die Massenströme und kW-Größen betragen das Vierfache von Variante 1.

Weitere Zusatzinformationen zu den Biogas-Modellanlagen können aus Tabelle 12 entnommen werden:

Tabelle 12: Kenngrößen der Biogas-Modellanlagen

Biogas-Modellanlage		**Variante 1 (1 BHKW)**	**Variante 2 (4 BHKWs)**
elektrische Leistung		500 kW	2000 kW
thermische Leistung		524 kW	2096 kW
thermische Leistung für Gärpr. Aufbereitung verfügbar		393 kW	1572 kW
erzeugte th. Energie	8.000 h	4.192.000 kWh	16.768.000 kWh
th. Energie für Fermenterbeheizung (25%)	8.000 h	1.048.000 kWh	4.192.000 kWh
th. Energie für Gärpr. Aufbereitung verfügbar	8.000 h	3.144.000 kWh	12.576.000 kWh
el. Wirkungsgrad (%)	38 %		
th. Wirkungsgrad (%)	40 %		
Vorlauf Temperatur (°C)	80 °C		
Biogasverbrauch pro Stunde (52,2% CH4)		252,7 m³/h	1010,9 m³/h
Mais - Biogasertrag (Normgas) je Tonne FM	216,1 m³/t FM		
TM % (Trockenmasse)	35%		
Methangehalt (%) Mais	52,0 Vol.-%		
Rindergülle - Biogasertrag (Normgas) je Tonne FM	30,4 m³/t FM		
TM % (Trockenmasse)	10%		
Methangehalt (%) Rindergülle	55,0 Vol.-%		
Maisanteil (35% TM)	65 %	8.699 t	34.795 t
Rindergülleanteil (10% TM)	35 %	4.684 t	18.736 t
Methan je Tonne Input (65% Mais / 35% Gülle)	78,89 m³/t FM		
Methangehalt je Tonne Input (65% Mais / 35% Gülle)	52,2%		
Tonnen Substrat gesamt (p.a.)		**13.383 t**	**53.530 t**

Insgesamt wurden über 97 Anbieter von Gärproduktaufbereitungsverfahren ausfindig gemacht. Darunter sind viele Hersteller von Separatoren sowie Pilotanlagen, die noch keine Anlagen im Praxismaßstab realisiert haben. Es wurden insgesamt 23 Hersteller angefragt und wir erhielten 12 Angebote. Tabelle 13 gibt eine Übersicht über die Angebote.

Tabelle 13: Übersicht bezüglich der eingegangenen Herstellerangebote

Technologie	**Angebot 500 kW**	**Angebot 2 MW**
Separation	1	-
Bandtrockner	2	1
Solares Verfahren	1	1
Stripverfahren	-	1
Vakuumverdampfung	2	2
Membranverfahren	-	1

Nach Zusendung der kaufmännischen und technischen Angebote durch die Hersteller haben wir einen Vergleich der ökonomischen Kennzahlen durchgeführt.

Die am Markt erhältlichen Verfahren sind sehr verschieden hinsichtlich der Investitionskosten sowie ihrer Komplexität. Abhängig vom Verfahren werden auch unterschiedliche Endprodukte hergestellt, deren monetärer Wert verschieden beurteilt werden kann. Eine Bewertung der zur Verfügung stehenden Verfahren ist daher sehr schwierig und muss jeweils unter den rechtlichen und regionalen Gegebenheiten differenziert betrachtet werden. Die Bewertung der relativen Vorzüglichkeit einzelner Verfahren erfolgt unter vereinheitlichten Annahmen, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

7.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Bezüglich der Kostenkalkulation und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde ein Modell für eine dynamische Investitionsrechnung erstellt, das auf verschiedene Technologien der Gärproduktaufbereitung anwendbar ist und mit dem Kapitalwert und dem internen Zinsfuß zwei in der Praxis verbreitete Kennzahlen generiert. Bezüglich der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind wir von diversen Annahmen ausgegangen, die in Tabelle 14 zusammengefasst sind.

Tabelle 14: Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Annahmen	**Werte**
Volllaststunden	8.000 h
Abschreibungszeitraum	15 Jahre
Auslastung im 1. Jahr	50%
EEG	2009
Inbetriebnahme der BGA	2011
Fremdfinanzierungsanteil	80% der Investitionssumme
Zinssatz Fremdfinanzierung	3%
Zinssatz Eigenkaptial	10%

Es gibt einige Einflussfaktoren, die die Wirtschaftlichkeit der Gärproduktaufbereitungsanlage besonders stark beeinflusse können:

- Wärmevergütung (KWK-Bonus)
- Transport- und Ausbringungskosten für die Gärprodukte
- Monetäre Bewertung der Gärprodukte (Düngeräquivalent oder andere)

Für die ökonomische Bewertung der Verfahren stehen verschiedene finanzielle Kennzahlen zur Verfügung. Wir haben den Barwert sowie den internen Zinsfuß als relevante Größen für unseren Verfahrensvergleich gewählt, da diese häufig angewendet werden und für Anlagenbetreiber, die eine Investition in Erwägung ziehen, eine hohe Aussagekraft haben. Die beiden Indikatoren sind nachfolgend kurz beschreiben.

7.2.1 Barwert / Kapitalwert

Geld ist zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedlich viel wert, da in der Regel immer eine Verzinsung stattfindet. Der Barwert gibt den Wert des Geldes zum Zeitpunkt null an und wird durch Abzinsung ermittelt. Dadurch können verschiedene Zahlungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten (z.B. über eine fünfzehnjährige Nutzungsdauer einer Investition) verglichen werden. Die Höhe des Barwertes ist dabei abhängig von dem Zinssatz, der sich wiederum aus einem risikofreien Zins und einer Risikoprämie zusammensetzt.

Summiert man die Barwerte aller Zahlungen einer Investition, erhält man den Kapitalwert. Ist dieser positiv, so gilt die Investition bei einem gegebenen Zinssatz als vorteilhaft. Bei einem negativen Kapitalwert ist von der Investition abzusehen.

7.2.2 Interner Zinsfuß

Der interne Zinsfuß ist der Zinssatz, bei dem der Kapitalwert einer Zahlungsreihe gleich null wird. Er gibt dabei den Zinssatz an, der maximal angenommen werden darf, wenn von der Investition nicht abgesehen werden soll. Der interne Zinsfuß kann grafisch ermittelt werden. Er markiert dabei den Punkt, an dem die Funktion des Kapitalwertes in Abhängigkeit des Zinssatzes (i) die Abszisse schneidet, i also gleich null ist. Daneben bietet sich das sogenannten Regula-falsi-Verfahren an, bei dem sich dem internen Zinsfuß mathematisch angenähert wird.

Die Formel hierfür lautet: $IZF = i_1 - C_{01} * (i_2 - i_1) / (C_{02} - C_{01})$

Die Zinssätze i_1 und i_2 müssen so gewählt werden, dass sich ein positiver und ein negativer Kapitalwert (C_0) ergibt.

Sowohl die Barwertmethode als auch die Interne-Zinsfuß-Methode sind Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung. Sie unterscheiden sich methodisch in der Wiederanlageprämisse: Bei der Barwertmethode ist die Prämisse, dass die kumulierten Überschüsse umgehend in der Höhe des angenommenen Zinssatzes angelegt werden, während beim interne Zinsfuß alle Zahlungsüberschüsse zum internen Zinsfuß wieder angelegt werden. Außerdem ist der interne Zinsfuß unabhängig von der absoluten Höhe der Investition, der Kapitalwert nicht. Für die Beurteilung einer Investition ist die Betrachtung beider Kennzahlen sinnvoll, da ein positiver interner Zinsfuß nicht die Höhe des Gewinns wiederspiegelt.

7.3 Auswertung

In der Eingabemaske des Excel Tools können die relevanten Kenngrößen aus den Angeboten eingegeben werden. Diese werden abhängig von den Angeboten individuell abgeändert. Die konstanten Parameter, wie z.B. die Menge an zu behandelnden rohen Gärprodukten, verändern sich innerhalb einer Variante hingegen nicht. Nachfolgend ist ein Screenshot der Excel-Eingabemaske dargestellt.

3	Position	Einheit	Betrag bzw. Betrag	Inflationierung [
4				
5	**Grunddaten**			
6	Anlagenleistung	to/h	5,3575	
7	Volllaststunden / Jahresbetriebsstunden	h/a	8.000	
8	Verarbeitungsmenge Rohgärrest	to/a	42.860	
9	Erzeugungsmenge Gärprodukt 1(ASL)	to/a	42.860	
10	Erzeugungsmenge Gärprodukt 2 (Bandtrockn	to/a		
11	Erzeugungsmenge Gärprodukt 3 (Konzentrat	to/a		
12	Erzeugungsmenge Gärprodukt 4 (Destillat)	to/a		
13	Auslastung erstes Betriebsjahr	%	50%	
14				
15	**KWK-Bonus-Berechnung**			
16	Stromeinspeisemenge	kWh/a	16.000.000	
17	Wärmeverbrauch pro Jahr	kWh/a	12.576.000	
18	Maximale Wärmebereitstellung pro Jahr	kWh/a	16.768.000	
19	Elektrische Leistung BHKW	kWel	2.000	
20	Thermische Leistung BHKW	kWth	2.096	
21	Stromkennzahl		0,954	
22	Elektrischer Wirkungsgrad laut Hersteller		38%	
23	Thermischer Wirkungsgrad laut Hersteller			
24	Jahresstunden	h/a	8.000	
25	KWK-Bonus pro kWh	Euro/kWh	0,03	
26	KWK-Bonus gesamt	Euro/a	128.611	
27				
28	**Erlösberechnung**			
29	Preis Gärprodukt 1	Euro/to	0,89	2,00%
30	Preis Gärprodukt 2 (Bandtrockner)	Euro/to		2,00%
31	Preis Gärprodukt 3	Euro/to		2,00%
32	Preis Gärprodukt 4	Euro/to		2,00%
33	Ausbringungskosten unbehandelter Gärrest	Euro/to	12,43	2,00%
34				
35				
36				
37	Investition	Euro	561.400,00	
38	Abschreibungsdauer	a	15	
39	Abschreibung	Euro/a	37.426,67	
40	Verbrauch Strom pro Volllaststunde	kWh/h	59,1	
41	Verbrauch Strom gesamt pro Jahr	kWh/a	472.896,00	
42	Strompreis	Euro/kWh	0,15	2,00%
43	Aufwand Strom gesamt pro Jahr	Euro/a	70.934,40	2,00%
44	Personalaufwand	Euro/a	6.000,00	2,00%
45	Aufwand Wartung/Instandhaltung	% der Investitionssumme	3,00%	2,00%
46	Verbrauch Hilfs- und Betriebsstoff 1	kg/to Output	0,00	
47	Preis Hilfs- und Betriebsstoff 1	Euro/kg	0,00	2,00%
48	Aufwand Hilfs- und Betriebsstoff 1	Euro/a	0,00	2,00%
49	Verbrauch Hilfs- und Betriebsstoff 2	kg/to Output	0	
50	Preis Hilfs- und Betriebsstoff 2	Euro/kg	0	2,00%
51	Aufwand Hilfs- und Betriebsstoff 2	Euro/a	0	2,00%
52			1	
53	Transport- und Ausbringungskosten	Euro/T	8,28	2,00%
54	Transport- und Ausbringungskosten	Euro	354984,1708	2,00%
55				
56	Fremdfinanzierungsanteil	% der investitionssumme	80%	
57	Fremdfinanzierungsssumme	Euro	449.120,00	
58	Zinssatz Fremdfinanzierung	%	3,00%	
59	Annuität		-37.621,25	

Abbildung 8: Screenshot der Excel-Eingabemaske (Foto: J. Dahlin)

Nach der vollständigen Eingabe der relevanten Größen werden die Finanzindikatoren automatisch, für eine Laufzeit von 15 Jahren, berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung und Bewertung sind im gemeinsamen Schlussbericht des GÄRWERT Projektes ausführlich, sowie hier in Tabelle 15 und Tabelle 16 im Überblick dargestellt. Die Differenzierung der Typen wurde nach der Anlagengröße, den Wärmekosten und den Erlösen vorgenommen. Eine Anlage mit 500 kW elektrischer Leistung, die noch über ungenutzte Wärme verfügt, aber die Lager- und Ausbringungskosten für die Gärprodukte komplett übernehmen muss und keine Vergütung vom Abnehmer erhält, wird z.B.

als Typ „500 kW; W+; E-„ bezeichnet. Mit der Differenzierung in 12 Typen können viele mögliche Nutzer einen Typ finden, der ihrer Anlage von den Bedingungen relativ nahe kommt, ohne gleichzeitig den Bericht zu kompliziert werden zu lassen.

Tabelle 15: Kapitalwerte betrachteter Aufbereitungsverfahren unter variierenden Bedingungen für eine 500 kW BGA

Wärmekosten (ja=-/nein=+)	-2,6 Cent	-2,6 Cent	-2,6 Cent	2,94 Cent	2,94 Cent	2,94 Cent
Erlöse[1] +: Abnehmer übernimmt Lager und Ausbringung, Vergütung für Nährstoffe N und P +/-: Abnehmer übernimmt Lagerkosten und Ausbringung, keine Nährstoffvergütung -: sämtliche Kosten beim Biogasanlagenbetreiber	+	+/-	-	+	+/-	-
Typ	500 W-; E+	500 W-; E+/-	500 W-; E-	500 W+; E+	500 W+; E+/-	500 W+; E-
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	Referenzszenario					
Separation (Pressschnecke)	+32.680 €	+19.287 €	-22.218 €	+32.680 €	19.287 €	-22.218 €
Bandtrockner (mit Presschnecke)	-388.184 €	-385.870 €	-328.951 €	+218.750 €	+220.382 €	+319.200 €
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	-221.055 €	-226.519 €	-162.008 €	+210.658 €	+206.804 €	+252.301 €
Stripverfahren (mit Pressschnecke	Für die Größenklasse 500 kW nicht betrachtet					
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke	-512.804 €	-490.427 €	-446.902 €	+279.994 €	+295.775 €	+326.472 €
Membranverfahren (mit Pressschnecke und Dekanter)	Für die Größenklasse 500 kW nicht betrachtet					

[1] Transportkosten werden immer vom Biogasanlagenbetreiber getragen

Tabelle 16: Barwerte betrachteter Aufbereitungsverfahren unter variierenden Bedingungen für eine 2000 kW BGA

Wärmekosten (ja=-/nein=+)	-2,6 Cent	-2,6 Cent	-2,6 Cent	2,94 Cent	2,94 Cent	2,94 Cent
Erlöse[2] +: Abnehmer übernimmt Lager und Ausbringung, Vergütung für Nährstoffe N und P +/-: Abnehmer übernimmt Lagerkosten und Ausbringung, keine Nährstoffvergütung -: sämtliche Kosten beim Biogasanlagenbetreiber	+	+/-	-	+	+/-	-
Typ	2.000 W-; E+	2.000 W-; E+/-	2.000 W-; E-	2.000 W+; E+	2.000 W+; E+/-	2.000 W+; E-
Rohgärrest (ohne Aufbereitung)	Referenzszenario					
Separation (Pressschnecke)	Für die Größenklasse 2000 kW nicht betrachtet					
Bandtrockner (mit Presschnecke)	-828.686 €	-819.433 €	-371.197 €	+1.352.948 €	+1.359.474 €	+1.675.593 €
Solares Verfahren (mit Pressschnecke)	-578.735 €	-600.593 €	-122.016 €	+1.030.375 €	+1.014.960 €	+1.352.495 €
Stripverfahren (mit Pressschnecke	-2.568.056 €	-2.475.685 €	-2.415.441 €	-1.440.576 €	-1.348.205 €	-1.287.961 €
Vakuumverdampfung (mit Pressschnecke	-1.829.339 €	-1.740.124 €	-1.379.711 €	+1.749.053 €	+1.811.972 €	+2.066.154 €
Membranverfahren (mit Pressschnecke und Dekanter)	-361.510 €	-277.358 €	+388.399 €	-361.510 €	-277.358 €	+388.399 €

8 Vergleich mit ursprünglichem Arbeitsplan

Die Bearbeitung dieses Teilvorhabens entspricht dem Stand der ursprünglichen Planung und übererfüllt diese sogar. Es wurden über die ursprüngliche Planung hinaus zahlreiche Interviews mit Anlagenbetreibern und Vermarktern von Gärprodukten sowie anschließend persönliche Interviews mit potenziellen Abnehmern im Privatgartenbereich durchgeführt. Die großzahlige Konsumentenbefragung hatte eine hohe Stichprobe von n=1.011 Privatgärtnern, die in diesem Umfang in Forschungsprojekten sonst kaum umgesetzt werden kann.

[2] Transportkosten werden immer vom Biogasanlagenbetreiber getragen

Beim Projektträger FNR wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes um sechs Monate beantragt und genehmigt. Zum einen weil der wissenschaftliche Mitarbeiter erst 3 Monate nach Projektbeginn eingestellt werden konnte und zum anderen weil aufgrund einer umsichtigen Ressourcenplanung Finanzmittel eingespart werden konnte.

Die im Projektantrag anvisierten Ziele sowie deren Umsetzung ist untenstehend in Tabelle 17 aufgeführt.

Tabelle 17: Vergleich von Zielen und Umsetzung

AP 1 Plan	AP1 Umsetzung
Übersicht über Bedeutung (Mengen) verschiedener Gärprodukte auf der Angebotsseite (unbehandelter Gärrest, Flüssigdünger, Presskuchen, Pellets etc.), Übersicht über erzielte Preise (soweit mitgeteilt)	Durch qualitative Interviews mit Vermarktern von Gärprodukten konnte die Bedeutung der verschiedenen Gärprodukte aufgezeigt werden. Eine Quantifizierung der Mengen war hier jedoch nicht möglich. Das Preisspektrum für unbehandelte sowie aufbereitete Gärprodukte wurde während der Interviews erfasst und die Ergebnisse im Artikel „Biogas digestate marketing: qualitative in-sights into the supply side“ veröffentlicht.
Mengenmäßige Aufschlüsselung der Distributionswege (direkt, Düngemittelhersteller, Gärrestebörse etc.)	Verschiedene Distributionswege für Gärprodukte konnten in der Landwirtschaft sowie im Gartenbau identifiziert, jedoch nicht quantifiziert werden.
Analyse der bestehenden Hindernisse für die erfolgreiche Vermarktung, differenziert nach Gärprodukten und Distributionswegen	Diverse hemmende sowie fördernde Faktoren konnten bezüglich einer erfolgreichen Vermarktung identifiziert werden.
Zusammenfassung Erfolgsfaktoren für die erfolgreiche Vermarktung	Faktoren für eine erfolgreiche Vermarktung sind im Artikel „Biogas digestate marketing: qualitative insights into the supply side“ im Journal Resources, Conservation & Recycling dargelegt
Übersicht Entscheidungskriterien beim Kauf von Gärprodukten	Entscheidungskriterien bezüglich des Einsatzes von Gärprodukten wurde in persönlichen Interviews mit BGA-Betreibern, Vermarktern und Abnehmern identifiziert.
Analyse Zahlungsbereitschaften	Die Zahlungsbereitschaft wurde in persönlichen Interviews mit Vermarktern und Abnehmern erfragt
AP 3 Plan	AP 3 Umsetzung
Kostenmodell für die einzelnen Wertschöpfungsstufen, integriert über die gesamte Wertschöpfungskette mit Inputmöglichkeiten für Sensitivitätstests	Ein Kostenmodell wurde erstellt und deckt die gesamte Wertschöpfungskette bis zur Pflanze ab. Außerdem können mit Hilfe des Modells Sensitivitäten aufgezeigt werden.
AP 6 Plan	AP 6 Umsetzung
Übersicht vorteilhafter Kombinationen zwischen Abnehmerart, Aufbereitungstechnologie und BGA-Typ aus ökonomischer und ökologischer Sicht	Eine Übersicht bezüglich vorteilhafter Kombinationen wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erarbeitet und ist im gemeinsamen Teil des Endberichts dargestellt.
Standard-Marketing-Strategien	Standard-Marketing-Strategien sind aufgrund der

	vielfältigen regionalen sowie Anlagenspezifischen Verschiedenheiten schwer zu verallgemeinern und übertragbar sondern sollten individuell angepasst werden. Grundsätzliche Erfolgsfaktoren sowie Hürden bei der Vermarktung wurden aufgezeigt und beschrieben.
Marketing-Toolkit	Die Erkenntnisse, insbesondere aus der quantitativen Befragung können relativ einfach in Marketing-Instrumente überführt werden, die Umsetzung und Anwendung ist in einem bereits beantragten Praxisprojekt vorgesehen
Erste Gespräche für neue institutionelle Arrangements (z.B. gemeinsame Vermarktung von Gärprodukten) geführt	Erste Gespräche mit interessierten Unternehmen sind erfolgt und die Umsetzung eines Pilotprojektes zur Vermarktung von Gärprodukten an Privatgärtner ist beantragt.
Weiterentwicklungsempfehlungen für Hersteller von Aufbereitungsanlagen	Bei der Vermarktung an Privatgärtner ist in Zukunft für Anlagenhersteller besonders eine Phosphorabreicherung der Gärprodukte ein interessanter Ansatzpunkt für technische Weiterentwicklungen

Von dritter Seite sind keine Ergebnisse bekannt geworden, welche für die Durchführung dieses Teilprojektes von Bedeutung gewesen wären. Es gibt einige Forschungsarbeiten und Publikationen, die als interessante Ergänzung betrachtet werden können, deren Fokus jedoch nicht explizit auf Gärprodukten lag. So wurden z.B. etliche Publikationen zu diversen Aufbereitungsverfahren publiziert, deren Fokus auf der ökologischen Bewertung der Verfahren liegt. Ergänzend interessant ist die Arbeit von Kröger et al. (2016) zu einigen Produktionsschritten nach der eigentlichen Aufbereitung.

9 Verwertungsplan

Das Projekt fand großen Zuspruch, sowohl von Seiten der Praxis als auch von Seiten der Wissenschaft. Trotz der kurzen Startphase gingen eine Vielzahl von Anfragen und Interessensbekundungen bezüglich der Ergebnisse ein. Während der Projektlaufzeit wurden insgesamt sieben Vorträge/Posterpräsentationen gehalten. Davon wurden 4 Vorträge auf Veranstaltungen mit dem Fokus auf Praktikern sowie drei auf zwei wissenschaftlichen Konferenzen gehalten. Dadurch konnten die Ergebnisse an ein breites Publikum kommuniziert werden. Die wissenschaftlichen Publikationen wurden in der globalen Wissenschaftsgemeinde bereits zahlreich heruntergeladen und die Ergebnisse mehrfach zitiert. Auch jetzt gehen noch Anfragen von Anlagenbetreibern und Technologieanbietern bei der HfWU ein. Weitere, an Praktiker gerichtete, Publikationen sind im BiogasJournal geplant.

Aufgrund der zu erwartenden Verschärfung der Nährstoffthematik u.a. durch die novellierte Düngeverordnung wurde bereits ein auf den Ergebnissen dieses Vorhabens aufbauendes Folgeprojekt beantragt. Dabei sollen in Zusammenarbeit mit interessierten Praxispartnern aus der Biogas- und Düngerbranche die Vermarktung von aufbereiteten Gärprodukten (z.B. Pellets) an Privatgärtner

umgesetzt und professionalisiert werden. Die HfWU beabsichtigt, das Projekt bei der erfolgreichen Annahme des Antrages durch wissenschaftliche Begleitforschung zu unterstützen.

Die im Rahmen des GÄRWERT Projektes (Teilvorhaben 1: FKZ 22402312) veröffentlichten Publikationen, Vorträge und Poster sind untenstehend detailliert aufgeführt.

Vorträge und Poster:

1. Herbes, C., Dahlin, J., Nelles, M.: Vermarktung von Biogas-Gärprodukten – die Perspektive der Anbieter, Vortrag bei der Tagung "Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen aus Biogasanlagen" am 10. und 11. März 2015 in Berlin.
2. Dahlin, J., Herbes, C. Nelles, M.: Marketing of biogas fermentation residues – The providers' perspective, Vortrag, RAMIRAN 2015 – 16th International Conference, Rural-Urban Symbiosis, 8th-10th September 2015, Hamburg University of Technology, Germany,
3. Herbes, C., Dahlin, J., Nelles, M: Vermarktung von Gärprodukten an Privathaushalte; Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven, Vortrag beim KTBL/FNR Kongress in Potsdam 22. bis 23. September 2015.
4. Dahlin, J.; Nelles, M.; Herbes, C.: Vermarktung von Gärprodukten an Privathaushalte, 10. Steinfurter Bioenergiefachtagung; 3. März 2016 in Steinfurt.
5. Dahlin, J.; Nelles, M.; Herbes, C.; Möglichkeiten bei der Vermarktung von Gärprodukten; GGG-Fachseminar Gärprodukte - quo vadis? 15. – 16. März 2016 in Kalkar.
6. Dahlin, J.; Nelles, M.; Halbherr V., Herbes, C.: Discrete choice experiment on biogas digestate-based fertilizer attributes; Poster Präsentation bei der Konferenz „Progress in Biogas IV“ 8-11 März, 2017, Universität Hohenheim, Stuttgart.
7. Dahlin, J.; Nelles, M.; Ramme, I.; Herbes, C.: Gardeners' perception of Biogas digestate based soil amendments; Poster Präsentation bei der Konferenz „Progress in Biogas IV“ 8-11 März, 2017, Universität Hohenheim, Stuttgart.

Publikationen:

1. Herbes, C., Dahlin, J., Nelles, M: Vermarktung von Biogas-Gärprodukten – die Perspektive der Anbieter, Tagungsband der Veranstaltung "Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen aus Biogasanlagen" am 10. und 11. März 2015 in Berlin. Medium: Gülzower Fachgespräche, e-book (nur Download) Erscheinungsjahr: 2015 Artikelnummer: 794, S. 204-214, ISBN: 978-3-942147-27-9 (03/2015).
   https://mediathek.fnr.de/band-51-pflanzenbauliche-verwertung-von-gaerrueckstaenden-aus-biogasanlagen.html
2. Dahlin, J., Herbes, C. Nelles, M.: Marketing of biogas fermentation residues – The providers' perspective, Abstract, RAMIRAN 2015 – 16th International Conference, Rural-Urban Symbiosis, 8th-10th September 2015, Hamburg University of Technology, Germany, S. 7, ISBN 978-3-941492-95-0.
   http://ramiran2015.de/wp-content/uploads/2016/01/RAMIRAN2015_Abstract-Book.pdf

3. Dahlin, J., Nelles, M., Herbes, C.,: Vermarktung von Gärprodukten an Privathaushalte; Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven, Beitrag, S. 307-315, ISBN 978-3-945088-07-4.
4. Dahlin, J.; Herbes, C.; Nelles, M. Biogas digestate marketing: Qualitative in-sights into the supply side. Resources, Conservation and Recycling 2015, 104, 152–161, DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.08.013. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.013
5. Dahlin, J.; Nelles, M.; Herbes, C. Biogas digestate management: Evaluating the attitudes and perceptions of German gardeners towards digestate-based soil amendments. Resources, Conservation and Recycling 2017, 118, 27–38, DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.11.020. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.11.020
6. Dahlin, J.; Halbherr, V.; Kurz, P.; Nelles, M.; Herbes, C. Marketing Green Fertilizers: Insights into Consumer Preferences. Sustainability 2016, 8, 1169, DOI: 10.3390/su8111169. http://www.mdpi.com/2071-1050/8/11/1169

10 Literaturverzeichnis

Alexander, Ron (2010): The Practical Guide to Compost Marketing and Sales. 2nd Edition.

Bach, Martin (2014): Berechnung von Stickstoff-Flächenbilanzen für die Landwirtschaft in Deutschland mit Regionalgliederung Kreise und kreisfreie Städte - Jahre 2003 bis 2011.: Abschlussbericht, Univ. Gießen.

Block, Ralf (2009): Ökologische und ökonomische Bewertung von Gärrestaufbereitungssystemen – auf der Basis von Praxisversuchen. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hg.): Gärrestaufbereitung für eine pflanzenbauliche Nutzung –Stand und F+E-Bedarf. Gülzow (Gülzower Fachgespräche, 30), S. 29–52.

Cooper, James; Lombardi, Rachel; Boardman, David; Carliell-Marquet, Cynthia (2011): The future distribution and production of global phosphate rock reserves. In: *Resources, Conservation and Recycling* 57, S. 78–86. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.09.009.

Dahlin, Johannes; Herbes, Carsten; Nelles, Michael (2015): Biogas digestate marketing. Qualitative insights into the supply side. In: *Resources, Conservation and Recycling* 104, S. 152–161. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.08.013.

Dawson, G. F.; Probert, E. J. (2007): A sustainable product needing a sustainable procurement commitment: the case of green waste in Wales. In: *Sust. Dev.* 15 (2), S. 69–82. DOI: 10.1002/sd.307.

Döhler, Helmut; Wulf, Sebastian (2009): Aktueller Stand bei der Gärrestaufbereitung. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hg.): Gärrestaufbereitung für eine pflanzenbauliche Nutzung –Stand und F+E-Bedarf. Gülzow (Gülzower Fachgespräche, 30), S. 15–28.

Eggerth, L. L.; Diaz, L. F.; Chang, M.T.F.; Iseppi, L. (2007): Compost science and technology. Marketing of Composts. Chapter 12. Boston, MA: Elsevier (Waste management series, 8).

Fischer, Eileen; Castilhos, Rodrigo B.; Fonseca, Marcelo Jacques (2014): The qualitative interview in marketing and consumer research: paradigmatic approaches and guideline. In: *REMark: Revista Brasileira de Marketing* 13 (4), S. 67–79.

Golkowska, K.; Vázquez-Rowe, I.; Lebuf, V.; Accoe, F.; Koster, D. (2014): Assessing the treatment costs and the fertilizing value of the output products in digestate treatment systems. In: *Water Sci. Technol.* 69 (3), S. 656–662. DOI: 10.2166/wst.2013.742.

Heffer, Patrick; Prud'homme, Michel (2015): Fertilizer Outlook 2015-2019. International Fertilizer Industry Association (IFA), zuletzt geprüft am 07.03.2016.

Janssen, Meike; Hamm, Ulrich (2014): Governmental and private certification labels for organic food. Consumer attitudes and preferences in Germany. In: *Food Policy* 49, S. 437–448. DOI: 10.1016/j.foodpol.2014.05.011.

Kröger, Rhena; Reckermann, Markus; Schaper, Christian; Theuvesen, Ludwig (2016): Gärreste als Gartendünger vermarkten? In: *Berichte über Landwirtschaft* 2016 (Band 94, Ausgabe 1), zuletzt geprüft am 11.07.2016.

Louviere, J.; Hensher, D. A.; Swait, J. D. (2000): Stated Choice Methodes. Analysis and Applications. In: *Cambridge University Press,* zuletzt geprüft am 05.02.2016.

Meyerding, S. G. (2016): Consumer preferences for food labels on tomatoes in Germany - A comparison of a quasi-experiment and two stated preference approaches. In: *Appetite* 103, S. 105–112. DOI: 10.1016/j.appet.2016.03.025.

Nakazi, Stefan; Anke Niebaum; Stefan Hartmann; Sebastian Wulf und Helmut Döhler (2009): Wärmenutzungskonzepte für Biogasanlagen. In: *Landtechnik* (5/2009), S. 326–329, zuletzt geprüft am 15.06.2017.

Probert, E. J.; Dawson, G. F.; Cockrill, A. (2005): Evaluating preferences within the composting industry in Wales using a conjoint analysis approach. In: *Resources, Conservation and Recycling* 45 (2), S. 128–141. DOI: 10.1016/j.resconrec.2005.03.001.

Quintero, Rocío Rodríguez; Garbarino, Elena; Saveyn, Hans; Wolf, Oliver (2015): Revision of the EU Ecolabel Criteria for Soil Improvers and Growing Media: Publications Office of the European Union (2015), zuletzt geprüft am 01.12.2015.

Saveyn, Hans; Eder, Peter (Hg.) (2014): End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals

Schüsseler, Petra (2009): Gärrest für eine Pflanzenbauliche Nutzung - Stand und F+E Bedarf; Gülzower Fachgespräche, Band 30. Aktueller Stand bei der Gärrestaufbereitung,, S. 160–165, zuletzt geprüft am 05.03.2014.

statista (2017): Anzahl der Personen in Deutschland, die einen Garten besitzen, von 2013 bis 2016 (in Millionen), zuletzt geprüft am 16.05.2017.

Tabi, Andrea; Hille, Stefanie Lena; Wüstenhagen, Rolf (2014): What makes people seal the green power deal? — Customer segmentation based on choice experiment in Germany. In: *Ecological Economics* 107, S. 206–215. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2014.09.004.

Thøgersen, John; Nielsen, Kristian S. (2016): A better carbon footprint label. In: *Journal of Cleaner Production. DOI:* 10.1016/j.jclepro.2016.03.098.

Train, Kenneth (2009): Discrete Choice Methods with Simulation. In: *CambridgeUniversity Press,* zuletzt geprüft am 18.03.2016.

Walan, Petter; Davidsson, Simon; Johansson, Sheshti; Höök, Mikael (2014): Phosphate rock production and depletion: Regional disaggregated modeling and global implications. In: *Resources, Conservation and Recycling* 93, S. 178–187. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.10.011.

Zentralverband Gartenbau (2015): Branche. Online verfügbar unter www.g-net.de/zierpflanzenbau.html, zuletzt geprüft am 16.05.2017.

11 Danksagung

Die Forschungsarbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes GÄRWERT (FKZ 22402312) durchgeführt. Die Förderung des Projektes erfolgte durch finanzielle Unterstützung des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe. Für die Förderung bedanken wir uns herzlich.

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Verbundvorhaben: GÄRWERT- GÄRprodukte ökologisch optimiert und WERTorientiert aufbereiten und vermarkten; Teilvorhaben 2: Großtechnische Messdatenerfassung und -evaluation

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität Berlin Fachgebiet Verfahrenstechnik

Förderkennzeichen:

22402312

Laufzeit:

01.10.2013 bis **31.03.2017**

Monat der Erstellung:

05/2017

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Zuwendungsempfänger und ausführende Stelle:

Technische Universität Berlin

Fachgebiet Verfahrenstechnik

FH 6-1, Raum 615

Fraunhoferstr. 33-36

10587 Berlin

Zuwendungsgeber:

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)

Hofplatz 1

18276 Gülzow-Prüzen

Kooperationspartner:

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen

Institute for International Research on Sustainable Management and Renewable Energy (ISR)

Neckarsteige 6-10

72622 Nürtingen

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)

Bartningstraße 49

64289 Darmstadt

Universität Hohenheim

Institut für Kulturpflanzenwissenschaften

Fachgebiet Düngung und Bodenstoffhaushalt

Fruwirthstr. 20

70593 Stuttgart

Bearbeitung:

Maximilian Fechter
Matthias Kraume

Inhalt

Aufkonzentration 6
Separation 7
Flockung 10
Weiterführende Behandlungsverfahren 11
Behandlung der Feststoffe 11
Vakuumverdampfung 12
Membranverfahren: Ultrafiltration und Umkehrosmose 13
Strippung 14
Definitionen 15
Energiekennzahl 17
Weiterführende Aufbereitungsverfahren 17
Sonderfall Separation 17
Aufnahme der Messwerte 18
Bilanzierung 18
Abscheidegrade / Rückhaltegrade 19
Methodik Fallbeispiele 20
Vorgehensweise 20
Rechenbeispiel 20
Separation 23
Berechnungsgrundlagen 24
Messdaten 24
Theoretische Betrachtung 26
Konvektive Trocknungsverfahren 27
Berechnungsgrundlagen 27
Messdaten 27
Fallstudie TU Berlin 28
Theoretische Betrachtung weiterer Betriebszustände 29
Datenvergleich 30
Solare Unterstützung 32
Vakuumverdampfung 33
Berechnungsgrundlagen 33
Messdaten 34
Theoretische Betrachtung 35
Fallstudie 38
Datenvergleich 39
Strippung 40
Berechnungsgrundlagen 40
Messdaten 40
Theoretische Betrachtung 41
Fallstudie 43
Datenvergleich 44
Membranverfahren 46
Berechnungsgrundlagen 46
Messdaten 47

Fallstudie TU Berlin 49
Theoretische Betrachtung 50
Datenvergleich 54
ANHANG 57
Literaturverzeichnis 58

I. Ziele

In dem Arbeitspaket 2: Großtechnische Messdatenerfassung und -evaluation unterschiedlicher Gärrestaufbereitungsverfahren, bearbeitet von der TU Berlin, Fakultät III, Fachgebiet Verfahrenstechnik waren folgende Ziele gesteckt:

- Identifikation der marktgängigen Aufbereitungsverfahren für Gärreste und deren Hersteller
- Detaillierte Untersuchung der relevantesten Gärrestaufbereitungsverfahren hinsichtlich
  - Entwicklungsgrad,
  - Praxisrelevanz,
  - Bestehende Probleme des Verfahrens,
  - Spektrum der verwendeten Substrate,
  - Spektrum der anfallenden Gärrestprodukte,
  - Zugänglichkeit für Messungen
  - sowie Reproduzierbarkeit der Messdaten.
- Durchführung und Auswertung der Befragungen von Anlagenherstellern und -betreibern,
- Aufnahme einiger Messdaten zur Validierung der Ergebnisse aus den Befragungen
- Aufstellung von Modellen bzw. Fallstudien zu den betrachteten Verfahren.

1. Aufgabenstellung

Die Aufgabe bestand in einer Literaturrecherche zur Identifikation der marktgängigen Aufbereitungsverfahren für Gärreste sowie der Auswahl der relevantesten zur näheren Untersuchung. Diese bestand darin, zunächst die Anlagenhersteller dieser Verfahren zum Funktionsprinzip, dem Aufbereitungspotential und den Anforderungen der Verfahren an Energiebereitstellung und Personal zu befragen. Im Anschluss sollten großtechnische Biogasanlagen mit den entsprechenden Gärrestaufbereitungsverfahren besucht und deren Anlagenbetreiber interviewt werden. Anschließend forderte die Aufgabenstellung die Aufnahme einiger stichprobenartiger Messwerte zur Validierung der gesammelten Erkenntnisse. Diese Messwerte sollten anhand einer Auswertungsroutine evaluiert werden, hieraus folgend datenbankbasierte Fallbeispiele berechnet und dargestellt. Weiterhin sollte anhand dieser Informationen ein Modell zur Generierung von Aufbereitungsverfahrensempfehlungen aufgestellt werden.

2. Stand der Technik

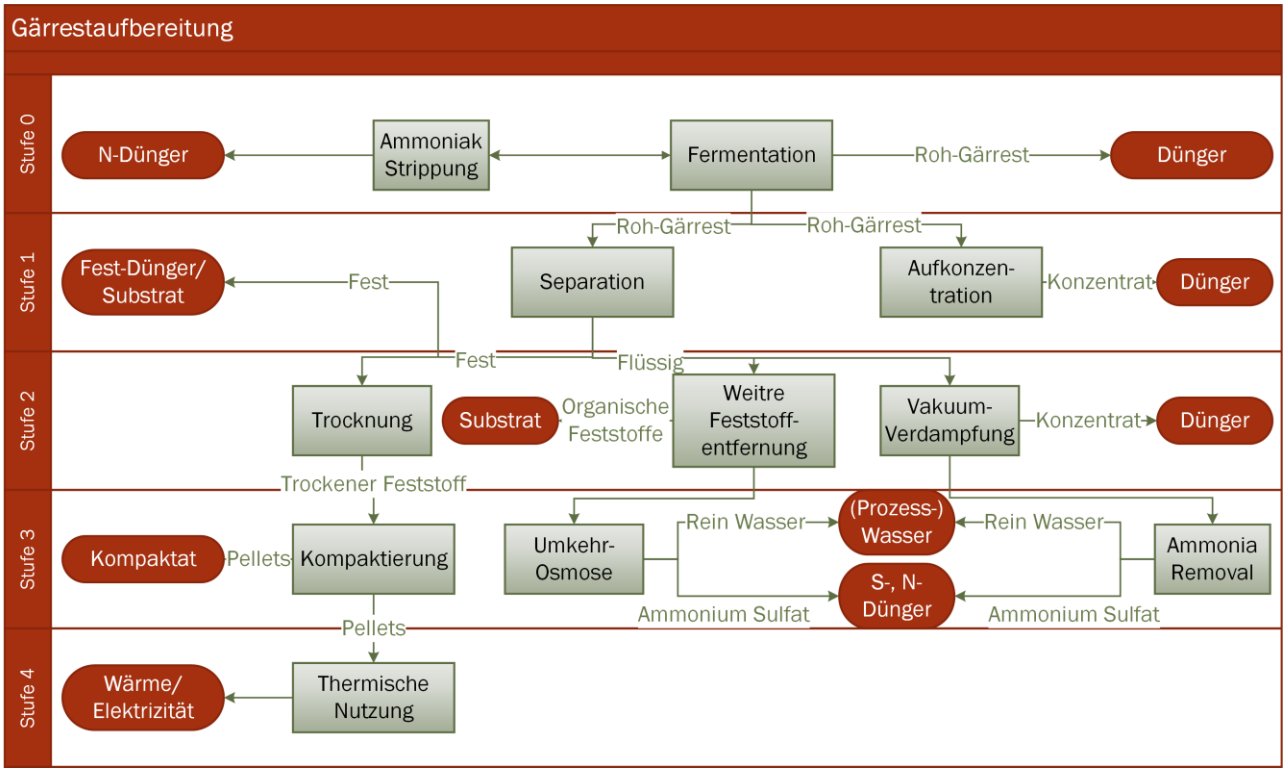


Abbildung 1 Zusammenfassung der relevantesten Verfahren in der Gärrestaufbereitung

Abbildung 1 zeigt die für die Gärrestaufbereitung relevantesten Verfahren, diese werden auch in Fallstudien genauer betrachtet. Im folgenden Text erfolgt die Beschreibung der Arbeitsweise dieser Verfahren. Die allgemeine Vorgehensweise bei der Gärrestaufbereitung kann in mehrere Schritte aufgeteilt werden. In der Regel besteht der erste Schritt in einer Feststoffabtrennung. Hierbei werden mittels Schneckenpresse Partikel größer 0,5-1 mm entfernt, was den Gesamtmassenstrom um etwa 10 % verringert. Weiterführende Feststoffabscheidung kann durch Dekanterzentrifugen, Bandfilterpressen, Schwingsiebe, Ultrafiltration und/oder Flotation erzielt werden. Feststoffseparation, die mittels dieser Verfahren durchgeführt wird, erfordert zumeist eine vorgeschaltete Flockung. Die Nachteile einer Flockung liegen in den Kosten für die Flockungshilfsmittel sowie die Grenzwerte für und Anforderungen an synthetische Flockungshilfsmittel in der Düngemittelverordnung.

Handelt es sich bei dem ersten Schritt in der Gärrestbehandlung nicht um eine Separation, stellt die Aufkonzentration durch Wasserverdunstung das Alternativverfahren dar. Diese Technik benötigt keine vorgeschaltete Separation und halbiert das Gärrestvolumen. Ein Feststoffgehalt im flüssigen Gärrest mesophil arbeitender Biogasreaktoren von maximal 15 % kann hiermit erreicht werden, da ab dieser Konzentration das Substrat seine Fließfähigkeit verliert. Nach dem Datenblatt einer Mississippi Trocknungsanlage von Aggro Energien erreicht dieses Verfahren Verdunstungseffizienzen von 0,6-1,0 L/kWh. (Meiners 2014) Abbildung 2 zeigt die zu erwartenden Massenströmungen dieses ersten Aufbereitungsschritts.

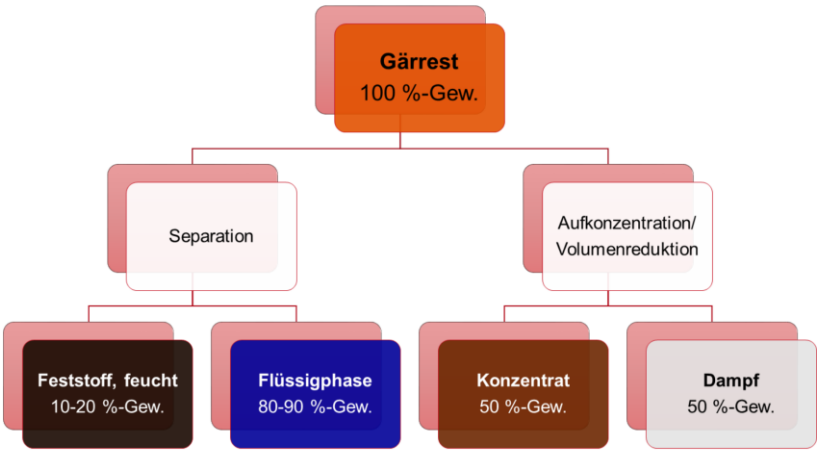


Abbildung 2 Grundlegende Vorgehensweise in der Gärrestbehandlung. Die Separation reduziert den Massenstrom um 10-20 % durch Feststoffentfernung. Die Aufkonzentration erreicht eine noch größere Massenreduktion, wobei dies sehr Wärmeenergieintensiv ist. Die Separation wird meist als Vorbehandlung für weiterführende Aufbereitungsverfahren eingesetzt.

Aufkonzentration

Das Aufkonzentrationsverfahren nutzt die Abwärme des BHKW-Kühlwasserkreislaufs, der an einen Wasser-Luft-Wärmetauscher angeschlossen wird. Die Installation des Trockners erfolgt entweder zwischen dem Nachfermenter und dem Gärrestlager oder parallel zum Gärrestlager, wie in Abbildung 3 dargestellt. Flüssiger Gärrest wird in den Trockner gepumpt und durch einen Luftstrom getrocknet. Dieser wird der Umgebung entnommen und mit der BHKW-Abwärme auf 60-80 °C erhitzt. Die Luft verdunstet Wasser aus dem Gärrest und entzieht diesem gleichzeitig Ammoniak. Dieses wird in einem nachgeschalteten Abluftwäscher wieder mittels Schwefelsäure abgeschieden.

Die technische Umsetzung einer solchen Anlage erfolgt mit einem Tank, der den Gärrest enthält; eine Trommel, ein Filterband oder eine große Scheibe sind so montiert, dass sie zum Teil in den Gärrest eintauchen und diesen in einem dünnen Film in den Trocknungsluftstrom heben. Aufgrund der verhältnismäßig niedrigen Temperaturen in der Trocknungsluft ist eine große Oberfläche erforderlich an der der Stoff- und Wärmeaustausch stattfinden kann, damit eine möglichst effiziente Wasserabsorption erzielt wird. Am Trockneraustritt sollte die Luft eine möglichst hohe relative Feuchte erreichen. Eine weitere Möglichkeit solch ein Verfahren zu realisieren, besteht in der Nutzung eines Bandtrockners mit Feststoffrückvermischung. Hierbei wird ein Teil des bereits getrockneten Feststoffs wieder an den Trockneranfang gefördert und mit flüssigem Gärrest besprüht. Die Trocknung verläuft analog zu der bereits beschriebenen Verfahrensweise. Das Produkt dieses Prozesses ist jedoch nicht pumpfähig.

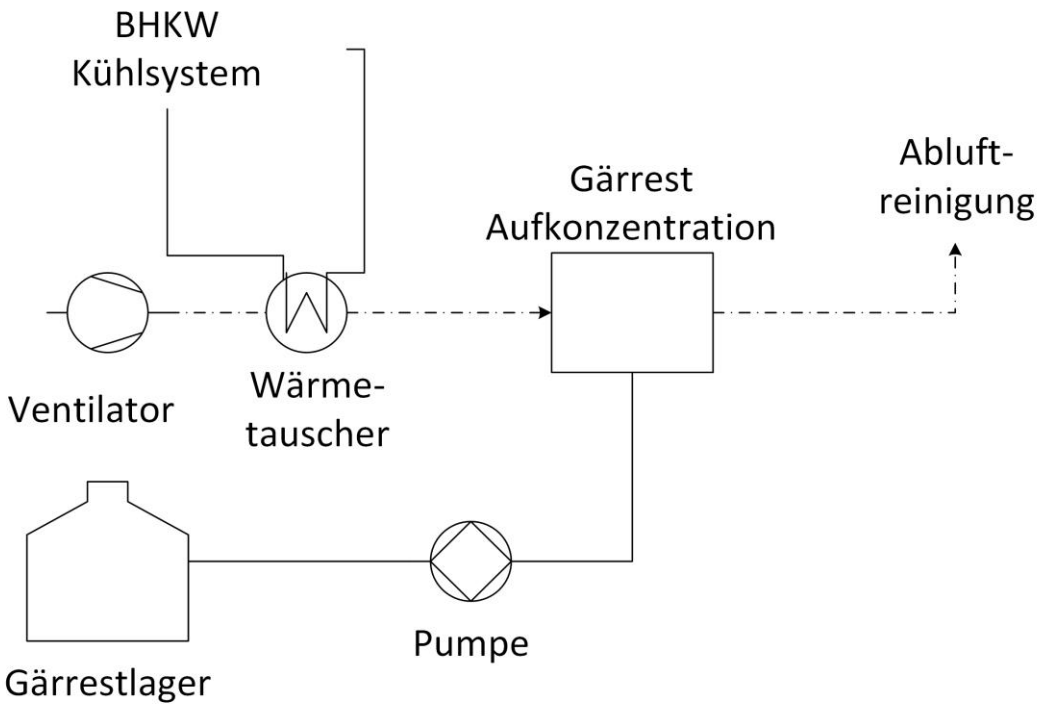


Abbildung 3 Gärresttrockner als Aufkonzentrierer in Parallelschaltung zum Gärrestlager

Separation

Hauptziel der Separation besteht in einer scharfen Trennung der festen und flüssigen Phase. Jede Phase für sich sollte einen möglichst hohen Feststoffanteil haben bzw. möglichst partikelarm sein. Beide Eigenschaften gleichzeitig in einem Prozessschritt zu erreichen ist unmöglich, allerdings kann mit der richtigen Kombination aus Separationsverfahren ein Feststoff mit über 35 % Trockenmasse und eine Flüssigphase mit weniger als 2 % Trockenrückstand erhalten werden. Im Allgemeinen kann beobachtet werden, dass Phosphate eher der festen Phase anhaften, während Stickstoff – zumeist in Form von gelöstem Ammonium – in der Flüssigphase verbleiben (Fuchs et al. 2010). Die Feststoffaffinität des Phosphors, der bei den im Gärrest herrschenden Bedingungen eigentlich als gelöstes Phosphat vorliegen müsste, ist durch die Phosphatbindung in den Zellen der Mikroorganismen zu erklären.

Schneckenpresse

Der erste Schritt in der Gärrestseparation erfolgt für gewöhnlich mittels Schneckenpresse, was auf ihren geringen Energiebedarf von rund 0,45 kWh pro Kubikmeter Gärrest und den geringen Wartungsaufwand zurückzuführen ist. Die Produkte der Schneckenpresse sind ein Feststoff mit einem Trockenstoffgehalt von 25-35 % und eine um 30-50 % Trockenmasse reduzierte Flüssigphase, abhängig vom Feststoffgehalt des rohen Gärrests und dessen Partikelgrößenverteilung. Feststoff empfindliche Anschlussverfahren erfordern eine Nachbehandlung der Flüssigphase. Dies setzt in der Regel den Einsatz von Flockungshilfsmitteln voraus. Alle beschriebenen Trennverfahren sind in Abbildung 4 zu finden. Für weitere Informationen bezüglich der Funktionsweise einer Flockung, siehe Abschnitt *Flockung*.

In der Schneckenpresse wird Gärrest in eine Siebtrommel gleitet, in der sich eine Förderschnecke dreht. Die Siebschlitzweite variiert zwischen 0,5 und 1,0 mm. Partikel kleiner als die Schlitzweite passieren das Sieb, während die größeren in der Trommel zurückbleiben und von der Förderschnecke Richtung Ausgang geschoben werden. Währenddessen komprimiert die Förderschnecke den Feststoff und presst weiteres Wasser aus. Paddel am Feststoffausgang sorgen für ein verbessertes Anstauverhalten des Feststoffs, sie werden dazu genutzt den Pressdruck und somit den Trockenstoffgehalt der festen Phase einzustellen. In Abbildung 4 (a) ist eine Schneckenpresse dargestellt. Für eine weitere Feststoffabtrennung in der Flüssigphase können Kantenspaltfilter in das System integriert werden. Diese funktionieren wie eine vertikal fördernde Schneckenpresse, nur dass hier feinere Siebtrommeln zum Einsatz kommen und keine Kompression der Feststoffe stattfindet.

Dekanterzentrifuge

Die Bauweise einer Dekanterzentrifuge ist in Abbildung 4 (b) dargestellt. Das Trennprinzip der Dekanterzentrifuge basiert auf Massenträgheit sowie dem Dichteunterschied zwischen den Partikeln und der Flüssigkeit. Der Dekanter besteht aus einer schnell rotierenden Förderschnecke und einer etwas langsamer drehenden Manteltrommel, was zu einer langsamen relativen Drehbewegung zwischen Trommel und Förderschnecke führt. Partikeln höherer Dichte als Wasser, sammeln sich an der Oberfläche der Manteltrommel und werden von der Förderschnecke in Richtung Ausgang gedrückt. Die Flüssigkeit läuft durch den Zwischenraum zwischen Förderschnecke und Manteltrommel, um den Dekanter am Flüssigkeitsausgang zu verlassen. Ein Überlaufwehr verhindert, den Austritt von Partikeln an dieser Stelle. Da das Wirkprinzip der Zentrifuge auf einem Dichteunterschied basiert, lassen sich feste Stoffe mit gleicher oder geringerer Dichte als Wasser nicht oder nur schlecht abscheiden. Der Trennprozess lässt sich durch Variieren der Drehgeschwindigkeit von Manteltrommel und Förderschnecke, deren Relativgeschwindigkeit, die Position des Überlaufwehrs sowie den Massenstrom durch die Zentrifuge einstellen. Im Allgemeinen produzieren Dekanter eine relativ partikelarme Flüssigphase, allerdings ist der Wassergehalt der Feststoffphase verhältnismäßig hoch. Verglichen mit der Schneckenpresse weist der Dekanter eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Fehlfunktionen und einen größeren elektrischen Strombedarf auf. Dieser beträgt zwischen 3 und 5 kWh/m³ behandelten Gärrest. (Fuchs et al. 2010)

Bandfilterpresse

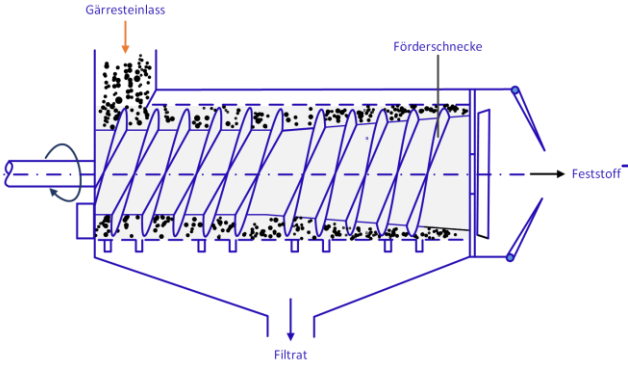
Abbildung 4 (c) zeigt das Funktionsprinzip einer Bandfilterpresse. Der Gärrest wird auf das Filterband geleitet und gelangt in die sogenannte Seihzone. Hier findet eine statische Vorentwässerung des Schlamms bedingt das Abfließen des Oberflächenwassers statt. Bei Bedarf erfolgt dies auch vakuumunterstützt. Anschließend wird der Schlamm zwischen zwei Bandfiltern kleiförmig verdichtet und durchläuft mehrere Umlenkrollen. Die Druckerhöhung und das Walken des Schlamms zwischen den Bandfiltern entfernt weitere Flüssigkeit aus dem Feststoff. Am Ende der Presszone teilen sich die Bänder, der entwässerte Feststoff wird abgeschabt und die Filterbänder von Feststoffrückständen gereinigt. Die Einstellparameter der Separation belaufen sich auf den Pressdruck, die Bandlaufgeschwindigkeit, die Anzahl der Umlenkungen und die Beschaffenheit des Filterbandes. Generell hat die feste Phase einen hohen Trockenstoffgehalt, die Qualität der Flüssigphase ist davon abhängig, welches Filterband zum Einsatz kommt. Eine vorhergehende Flockung ist im Regelfall unerlässlich. Der Energiebedarf beläuft sich auf rund 1,5-2 kWh/m³ behandeltem Gärschlamm. (Fuchs et al. 2010)

Flotation

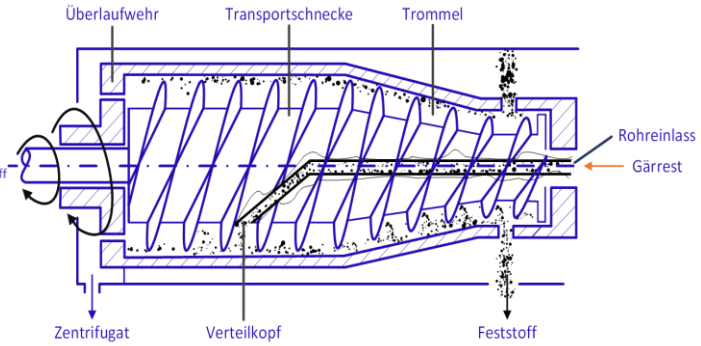
Die Flotation nutzt den Effekt der Blasenbildung und -anhaftung an der Oberfläche von Feststoffpartikeln und somit den Dichteunterschied zwischen Wasser und Partikel-Blase-Agglomerat. Abbildung 4 (d) zeigt das Funktionsschema. Luft wird im flüssigen Gärrest dispergiert bzw. unter Druck gelöst. Die luftangereicherte Flüssigkeit gelangt durch ein Drosselungsventil in das Flotationsbecken. Die in der Flüssigkeit gelöste Luft ändert ihren Aggregatszustand zu gasförmig und Luftblasen entstehen an der Partikeloberfläche. Die Partikel-Blasen-Agglomerate steigen bedingt durch den Dichteunterschied nach oben auf und sammeln sich an der Oberfläche. Hier bildet sich der Flotatschlamm, der leicht abgeschieden werden kann. Um eine noch reinere Flüssigphase zu erhalten, kann ein Teilstrom zurückgeführt werden. Der Vorteil einer Flotation besteht in der sehr reinen, nahezu partikelfreien Flüssigfraktion. Der Flotatschlamm hat allerdings noch immer einen sehr hohen Wasseranteil. Diese Technologie kommt nur bei Flüssigkeiten zum Einsatz, die bereits einen geringen Feststoffgehalt aufweisen. Folglich ist eine Vorabscheidung von Feststoffen notwendig, für gewöhnlich erfolgt ebenfalls eine Flockung. Der Energiebedarf einer Flotation beläuft sich auf ca. 0,2 kWh/m³ behandelter Flüssigkeit. (Fuchs et al. 2010)

Schwingsieb

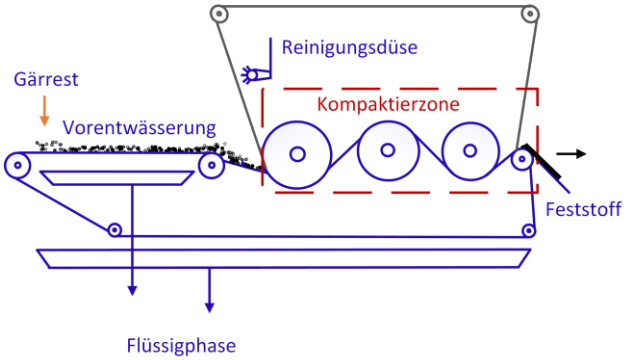
Für die Abscheidung sehr feiner Partikeln aus dem Zentrat eines Dekanters oder einer Schneckenpresse kommen Schwingsiebe zum Einsatz. Abbildung 4 (e) zeigt dessen Aufbau. Der Gärrest wird auf das Sieb geleitet, Flüssigkeit und kleine Partikeln durchfließen das Sieb, während größere Partikeln zurück gehalten und durch die Vibration zum Feststoffausgang befördert werden. Die typischen Siebweiten bewegen sich zwischen 150 und 250 µm (Fuchs et al. 2010).



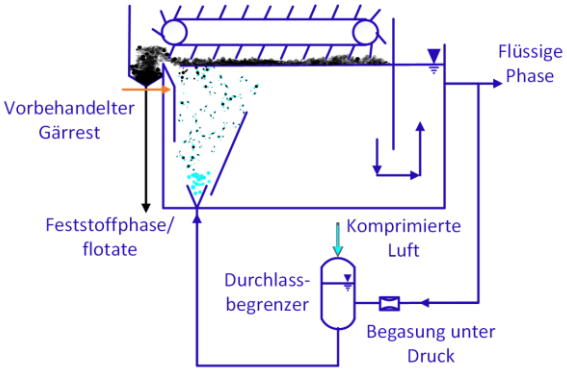
(a) Schneckenpresse



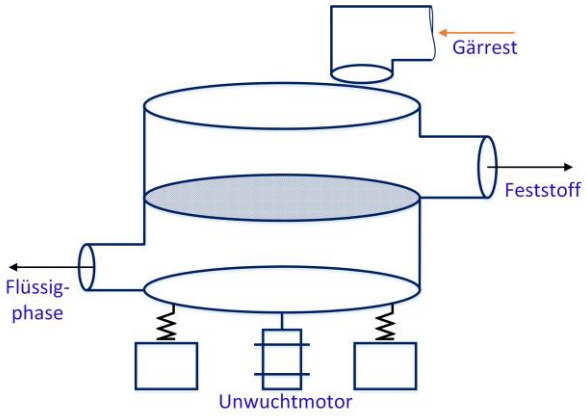
(b) Dekanterzentrifuge



(c) Bandfilterpresse



(d) Flotation



(e) Schwingsieb

Abbildung 4 Anlagen und Apparate die bei der Separation und weiteren Feststoffpartikelabscheidung zum Einsatz kommen.

Flockung

Zum Erreichen einer verbesserten Feststoffabtrennung, kommt in vielen Prozessen eine Flockung zum Einsatz. Die Partikeln im Gärrest stoßen sich aufgrund ihrer Ladung gegenseitig ab und agglomerieren nicht zu größeren Partikeln, die leichter zu entfernen sind. Ein Flockungsverfahren wird wichtig, wenn eine partikelfreie Flüssigphase für Membranverfahren benötigt wird. Umkehrosmose-Membranen sind sehr feststoffempfindlich, weshalb eine Vorbehandlung mittels Ultrafiltration von Nöten ist. Diese hat bei hohen Feststoffkonzentrationen einen sehr hohen elektrischen Energiebedarf. Dieser kann durch eine gut funktionierende Flockung gesenkt werden, allerdings fallen hierdurch zusätzliche Kosten für Flockungs- und Flockungshilfsmittel an.

Die Flockung von Gärrest erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird ein wasserlösliches Metallsalz wie beispielsweise Eisen-III-Chlorid dosiert. Dieses bewirkt die Bildung von Mikroflocken, da die positiv geladenen Kationen des Metallsalzes die suspendierten, negativ geladenen Partikeln elektrostatisch anziehen. Dieser Vorgang ist in Abbildung 5 links verdeutlicht. Aufgrund ihrer Größe, sind die so gebildeten Mikroflocken noch zu klein, um sie separieren zu können. Daher erfolgt in einem zweiten Schritt die Zugabe eines Flockungshilfsmittels. Dieses ist ein Polymer mit funktionalen Gruppen, deren Ladung negativ ist. Hier können die Mikroflocken andocken, um eine leicht abscheidbare Makroflocke zu bilden. Siehe hierzu Abbildung 5 rechts. Für weiterführende Informationen wird u. a. auf (Schwarz et al. 2006) verwiesen.

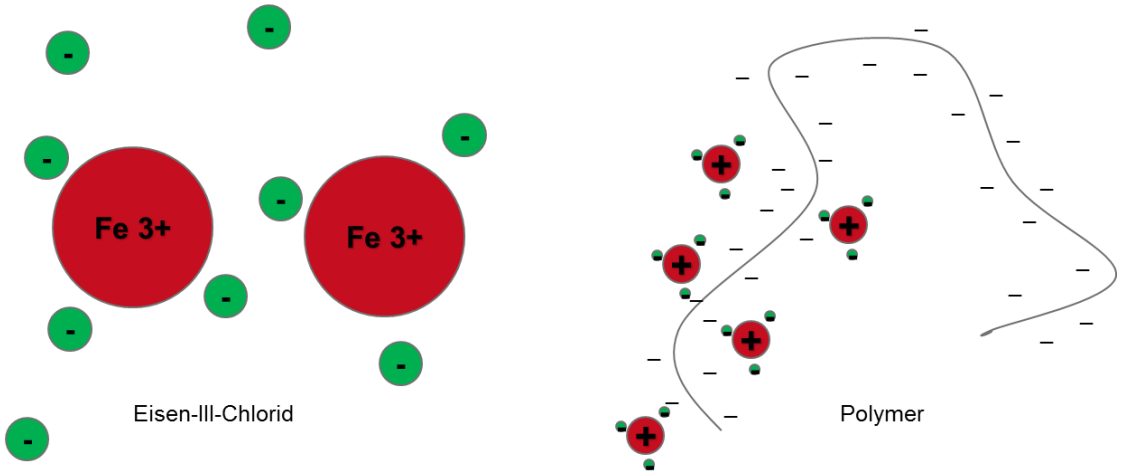


Abbildung 5 Funktionsweise einer Flockung

Weiterführende Behandlungsverfahren

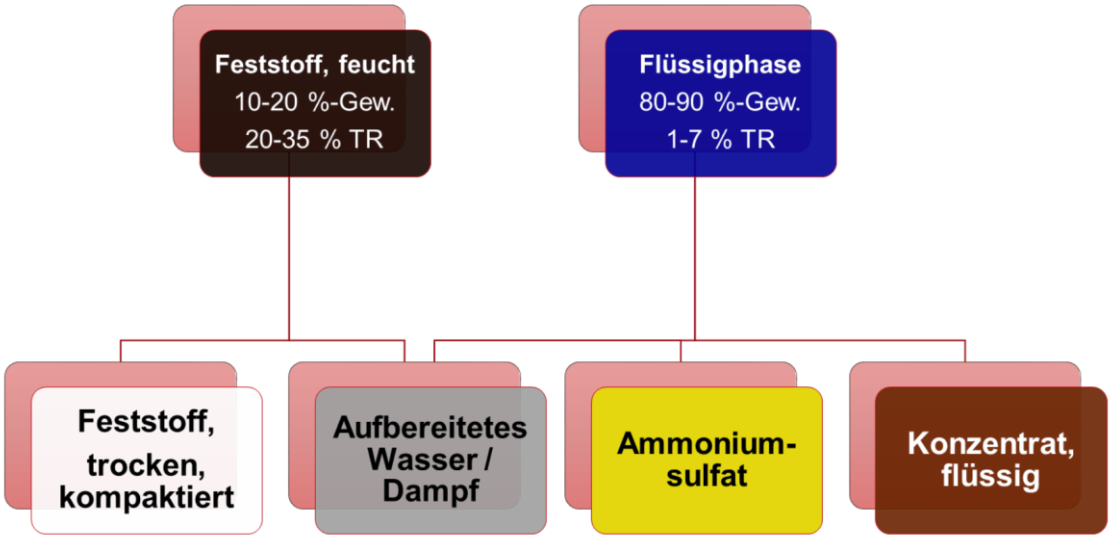


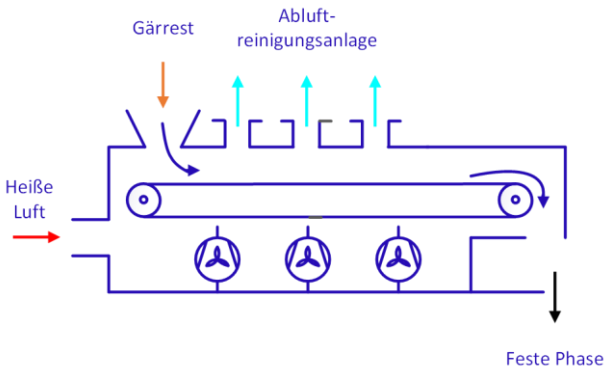
Abbildung 6 Gärrestprodukte nach weiterführender Aufbereitung

Nach der Separation werden eine Feststoffphase mit 25-35 % Trockensubstanzgehalt und eine Flüssigphase mit einem Feststoffanteil von 1-8 % erhalten. Beide können unabhängig voneinander weiter aufbereitet werden, um einen höheren Feststoffgehalt zu erzielen, Pflanzennährstoffe zu gewinnen sowie sauberes, einleitfähiges Wasser zu erzeugen. Abbildung 6 zeigt die zu erwartenden Produkte der weiterführenden Aufbereitung schematisch.

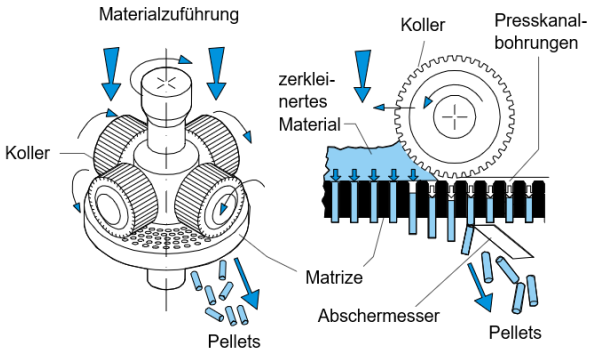
Behandlung der Feststoffe

Die Ziele bei der weiterführenden Behandlung der Feststoffe sind hauptsächlich eine weitere Reduktion des Wassergehalts und die Kompaktierung. Da den zur Trocknung und Kompaktierung eingesetzten Maschinen jeweils das gleiche Arbeitsprinzip zu Grunde liegt, wird dieses anhand von zwei Beispielen dargestellt. Für die Trocknung wird der Bandtrockner herangezogen, andere Aufbauten wie der Trommeltrockner oder Schub-Wende-Trockner etc. folgen denselben physikalischen Grundlagen, lediglich der Transport der zu trocknenden Feststoffe durch den Prozess ist unterschiedlich. Das Trocknen der Feststoffe ist nur sinnvoll, wenn ausreichend BHKW-Abwärme bereitsteht. Für eine Pelletierung wird allerdings ein Trockenstoffgehalt von 86-90 % benötigt, daher ist in diesem Fall eine Feststofftrocknung unausweichlich. Die Trocknung der festen Phase mittels warmer Luft verläuft analog zur Aufkonzentration. Durch den Einsatz von Wasserdampf an Stelle von Luft, kann durch verbesserte Energierückgewinnung ein höherer Wirkungsgrad erzielt werden (Seefeldt et al. 2009). Allerdings ist die Dampftrocknung in der Gärrestaufbereitung kein Standardverfahren und ist kostenintensiv in der Anschaffung.

Getrockneter Gärrest hat eine Schüttdichte von 250-350 kg/m³, demgegenüber stehen Gärrestpellets mit 700-750 kg/m³. Dies ist ein großer Vorteil wenn die Pellets als Dünger verkauft werden sollen, da dies die Handhabbarkeit aufgrund des geringeren Volumens und der verminderten Staubbildung verbessert. Im Allgemeinen funktioniert die Kompaktierung indem die Feststoffe unter hohem Druck durch eine Matrize gepresst werden. Um dies zu erreichen kommt entweder eine Förderschnecke zum Einsatz – wie bei einem Extruder – oder Walzen, sogenannte Koller, wie bei der Pelletierung. In den Presskanalbohrungen der Matrize wird das Material homogen verdichtet. Die hierbei auftretenden hohen Drücke und Temperaturen haben zur Folge, dass das Lignin und die Zellulose einen dünnen, glänzenden Film auf der Pelletoberfläche erzeugen. In den Abbildung 7 (a) und (b) sind jeweils ein Bandtrockner und ein Pelletierer dargestellt. Der Energieaufwand einer Kompaktierung hängt in erster Linie von dem zu kompaktierenden Material ab und unterliegt Schwankungen aufgrund der Diversität der Gärreste. In persönlichen Gesprächen mit Anlagenherstellern und aus eigenen Messungen wurde ein Bereich zwischen 30 und 50 kWh/t ermittelt.



(a) Bandtrockner



(b) Pelletierer aus (Kaltschmitt und Streicher 2009) als Beispiel für die Kompaktierung Fester Gärreste

Abbildung 7 Beispielanlagen für weiterführende Feststoffbehandlung

Vakuumverdampfung

Der Flüssigphase kann nach der Separation durch Vakuumverdampfung weiteres Wasser entzogen werden. Dies geschieht unter Nutzung der BHKW-Abwärme bei 40-75 °C, abhängig von dem im Kessel vorherrschenden Druck. Zusätzlich reduziert die niedrige Verdampfungstemperatur den Wärmebedarf für das Aufheizen der Flüssigkeit. In Abbildung 8 ist das Fließbild eines einstufigen Vakuumverdampfers dargestellt, anhand dessen die Arbeitsweise erklärt wird. Flüssiger Gärrest fließt in den Verdampferkessel und wird über einen Wärmetauscher mit BHKW-Abwärme erwärmt. Das angelegte Vakuum reduziert die Verdampfungstemperatur auf ca. 60 °C. Dies hat zur Folge, dass Wasser, Kohlenstoffdioxid, Ammoniak und andere gelöste Gase die Flüssigphase verlassen. Das Dampfgemisch wird aus dem Verdampfer abgezogen und vor der Kondensation von Ammoniak befreit. Dies geschieht in einem Brüdenwäscher unter Einsatz von Schwefelsäure. Bei der Reaktion von Schwefelsäure und Ammoniak wird das Ammoniakgas in gelöstes Ammoniumsulfat umgewandelt und chargenweise aus dem Wäscher abgeführt. Der austretende Dampf ist weitestgehend frei von Ammoniak und wird kondensiert. Das hierbei entstehende Wasser ist meist einleitfähig, wird aber in den meisten Fällen genutzt, um die bei der Kondensation anfallenden Wärme in einem Verdunstungskühler abzuführen. Der Energiebedarf eines Vakuumverdampfers liegt bei ca. 13 kWh_{el} pro behandeltem Kubikmeter Gärrest, während bei einstufigen Systemen etwa 1,4 Liter Wasser mit einer Kilowattstunde Wärmeenergie entfernt werden können (MKR Metzger GmbH).

Wird die Verdampfung mehrstufig ausgeführt, kann unter Verwendung mehrerer Druckstufen die zur Verdampfung benötigte Wärme mehrmals genutzt werden. Es ergeben sich verschiedene Verdampfungstemperaturen, weshalb der Dampf der wärmsten Stufe mit dem Gärrest der nächst kälteren Stufe kondensiert werden kann, während sich jener erwärmt und verdampft. Kommerzielle Systeme nutzen bis zu vier Verdampfungsstufen und erreichen damit einen hohen thermischen Wirkungsgrad. Die Verdampfungsleistung dieser Systeme kann über 3 L/kWh_{th} entfernten Wassers liegen.

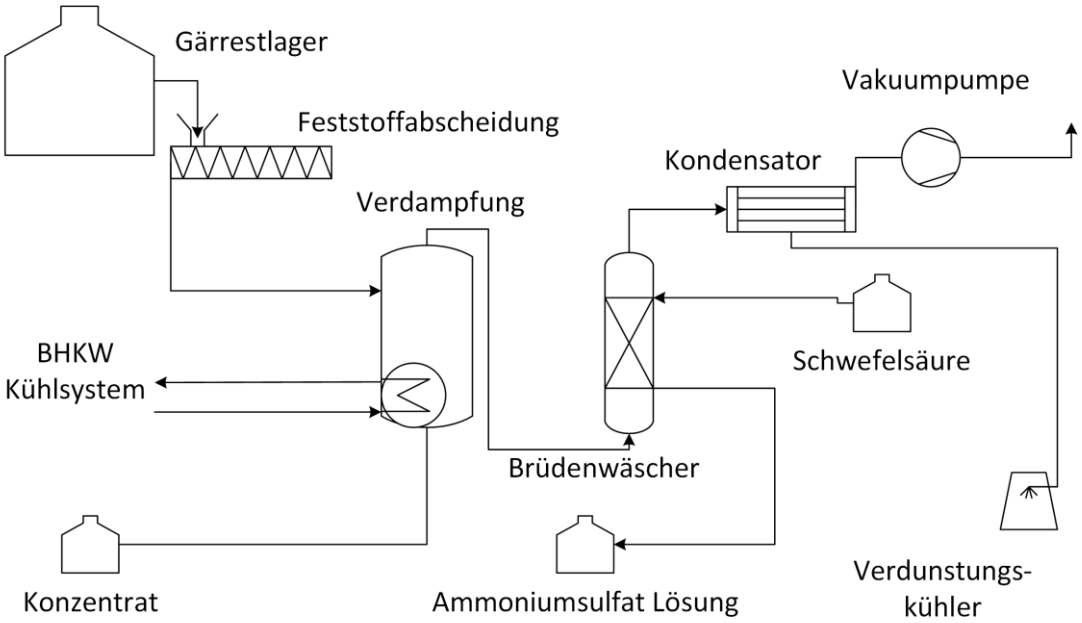


Abbildung 8 Fließbild einer einstufigen Vakuumverdampfung

Membranverfahren: Ultrafiltration und Umkehrosmose

Die Membranbehandlung des flüssigen Gärrests ist die empfindlichste aller beschriebenen Behandlungsverfahren. Obwohl die Ultrafiltration für eine Feststoffabtrennung ausgelegt ist, kann diese nur mit Feststoffgehalten von maximal 25 mg/m³ arbeiten, dies entspricht in etwa einem TR von 2,5 % (Berghof Membrane Technology GmbH & Co. KG). Weiterhin steigt mit dem Feststoffgehalt auch der Energiebedarf der Ultrafiltration stark an, da hierdurch die Viskosität der Flüssigkeit und somit auch der Druckverlust über das Membranmodul zunehmen. Daher ist der Ultrafiltration eine gut funktionierende Feststoffabtrennung vorzuschalten. Neben dem Energieaufwand nimmt auch die Verschmutzungsrate der Membranmodule mit steigender Feststoffkonzentration zu, was in kleineren Reinigungsintervallen und damit einem größeren Betriebsmittelverbrauch resultiert. Die zuverlässige Feststoffentfernung ist die zentrale Aufgabe der Ultrafiltration, da ohne sie die Umkehrosmose-Membranmodule sofort verstopfen.

Abbildung 9 zeigt ein Verschaltungsbeispiel für eine Membranaufbereitung der flüssigen Gärreste. Zunächst werden alle Feststoffpartikel mittels Ultrafiltration abgeschieden. Im Anschluss wird das Retentat zurück in den Fermenter oder das Gärrestlager geführt und das Permeat zur Umkehrosmose geleitet. Diese arbeitet in zwei Schritten. Im ersten erfolgt die Abscheidung der meisten gelösten Bestandteile, nur Ammoniak wird besonders schlecht abgeschieden. Daher wird vor der zweiten Stufe Schwefelsäure hinzugegeben, um den Ammoniak in Ammoniumsulfat umzuwandeln, was im zweiten Schritt besser abgeschieden werden kann. Das Retentat der zweiten Stufe wird wieder vor die erste geführt. Das Retentat der ersten Stufe kann als Düngekonzentrat genutzt werden. Das von der zweiten Stufe erzeugte Permeat ist reines Wasser. Die Einleitfähigkeit hängt von den Umgebungsbedingungen und den zuständigen Behörden ab. In etwas aufwändigeren Verfahren kann das Wasser zusätzlich über einen Ionenaustauscher geführt werden, um eine noch höhere Reinheit zu herhalten. Dem Retentat der ersten Umkehrosmose-Stufe wird in manchen Fällen nochmals in einer Konzentrationsstufe weitere Flüssigkeit entzogen.

Die Betriebskosten eines solchen Membranverfahrens werden maßgeblich durch den hohen elektrischen Energiebedarf bestimmt. Dieser beträgt in etwa 21 kWh pro behandeltem Kubikmeter Gärrest. Hierbei ist der Strombedarf der Separationsstufen mit enthalten. Die Ultrafiltration trägt den größten Anteil am Energieverbrauch (Brüß 2014).

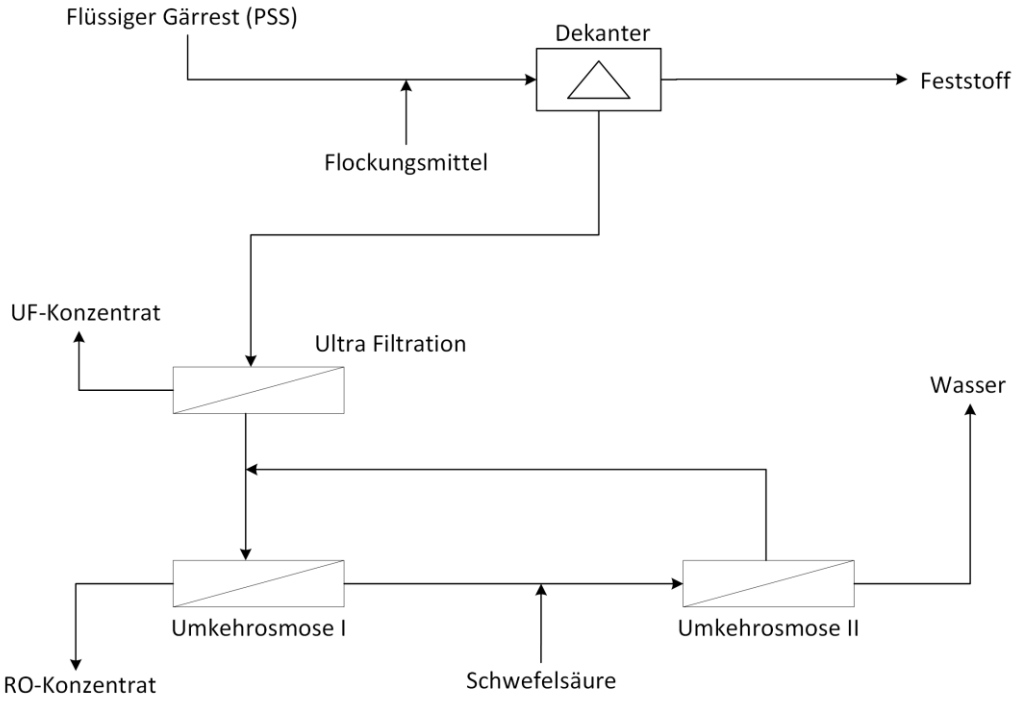


Abbildung 9 Verschaltung eines Membranaufbereitungsverfahrens

Strippung

Die Gärreststrippung wird eingesetzt um Ammonium bzw. Ammoniak aus dem Fermentationsprozess auszuschleusen. Hierbei bedarf es einer Feststoffseparation, die durch einen Schneckenseparator realisiert werden kann. Anders als bei den Aufbereitungsverfahren Vakuumverdampfung und Membranbehandlung, wird mit diesem Verfahren kein einleitfähiges Wasser gewonnen, sondern ausschließlich Ammonium entfernt. In Abbildung 10 ist das Verfahrensfließbild einer Strippanlage dargestellt.

Nach Verlassen des Fermenters werden aus dem Gärrest grobe Feststoffpartikel in einem Separator entfernt. Anschließend wird die Flüssigphase auf 80-90°C erhitzt und bedarfsweise mit einem gut löslichen alkalischen Mineral versetzt, um den pH-Wert anzuheben. Dies verschiebt das chemische Ammonium/Ammoniak-Gleichgewicht auf die Seite des Ammoniaks und fördert dessen Bestreben in die Gasphase zu wechseln. Danach gelangt der vorbehandelte Gärrest in eine Stripkolonne die bei leichtem Unterdruck betrieben wird. Hier treibt ein Strippgas, meist Wasserdampf, den Ammoniak aus der Flüssigphase. Danach wird der Stickstoffreduzierte Gärrest wieder zurück in den Fermenter geführt, während das beladene Strippgas regeneriert werden muss. Hierbei kommt ein Brüdenwäscher wie bei der Vakuumverdampfung zum Einsatz. Das Ammonium wird mittels Schwefelsäure unter der Bildung von Ammoniumsulfat entfernt. Alternativ kann zur Regeneration des Strippgases auch REA-Gips wie bei dem ANA-Strip Verfahren eingesetzt werden.

Die Vorteile eines Strippverfahrens liegen in der höheren Flexibilität bei der Substratauswahl für den Fermenter. Durch die Ammoniakentfernung im Fermentationsprozess ist es möglich auch große Mengen stark stickstoffhaltiger Substrate wie Hühnertrockenkot einzusetzen, ohne dass eine biologische Hemmung einsetzt. Weiterhin führt die zeitweise Temperaturerhöhung des Substrates auf über 70 °C zu einem weiteren Aufschluss der Organik, was zu einer gesteigerten Biogasausbeute führt. Der Energiebedarf einer solchen Anlage liegt bei etwa 90 kWh thermischer und 7 kWh elektrischer Energie pro behandeltem Kubikmeter Gärrest (GNS - Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung mbH).

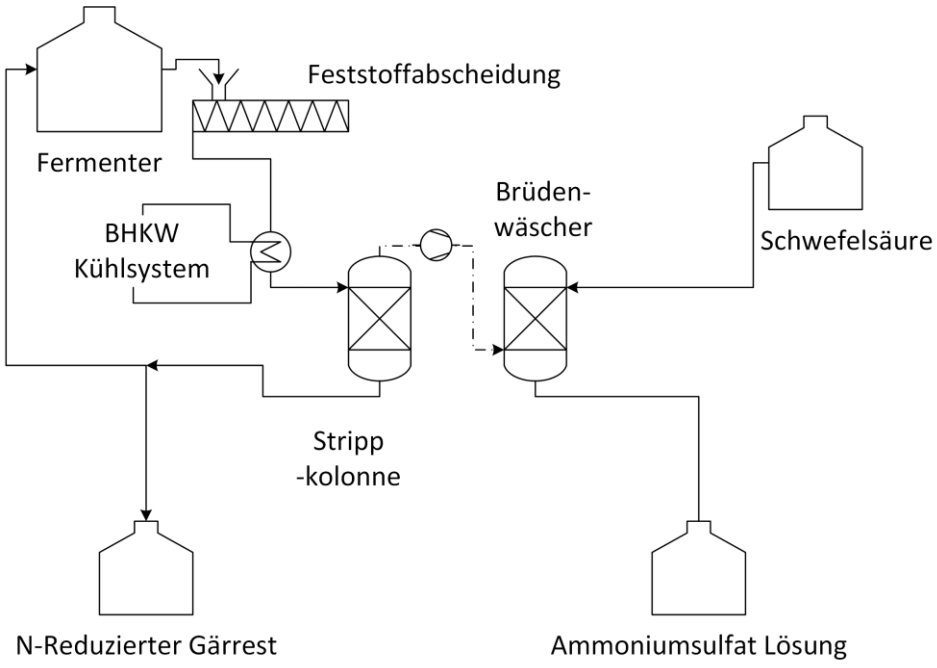


Abbildung 10 Fließschema einer Gärrest-Strippung parallel zur Fermentation

3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die TU Berlin arbeitete während des Projektes eng mit seinen Projektpartnern aus Nürtingen, Hohenheim und dem KTBL zusammen. Weiterer Dank geht selbstverständlich an alle Anlagenbetreiber und -hersteller, die sich Zeit für die Forschung genommen und uns stets im Sinne der Wissenschaft unterstützt haben. Weitere Zusammenarbeit bestand mit der Hochschule Osnabrück und einem verwandten Forschungsprojekt, in dem die Beschaffenheit von Gärresten intensiv untersucht wird. (Gienau 2016)

II. Ergebnisse

1. Methodik

Den für die Evaluation der Gärrestaufbereitungsverfahren benötigten Daten liegen Herstellerangebote zu Grunde. Hieraus konnten spezifische Energiebedarfe abgeleitet werden, diese wurden an realen Anlagen in Stichproben nachgemessen sowie in einer theoretischen Betrachtung nachgerechnet und auf Plausibilität geprüft. Weiterhin wurden an den ausgewählten großtechnischen Anlagen regelmäßig Gärrestproben von allen Produkten und Zwischenprodukten genommen und analysiert. Durch Bilanzierung der Stoffströme über die einzelnen Verfahrensschritte, erfolgte die Ermittlung von Abscheidegraden. Mit deren Hilfe war es möglich, die Prozesse anhand eines einheitlichen Modellgärrests für die Leistungsklassen 500 kW und 2.000 kW zu modellieren und Energie- und Prozessmittelverbräuche zu bestimmen. Weitere Informationen, bspw. bezüglich der Betriebssicherheit und des Prozessmittelverbrauchs, stammen aus Gesprächen mit Anlagenbetreibern und -herstellern.

Die Bilanzgrenzen wurden um den jeweilig betrachteten Verfahrensschritt gezogen. Im Detail bedeutet dies, eine Bestimmung des eingehenden Massenstroms und der ausgehenden Massenströme direkt vor und hinter dem Verfahrensschritt. Ebenso erfolgte die Bilanzierung der Energieströme, die der Verfahrensschritt benötigt, um den Eingangsstrom zu behandeln. Durch diese Vorgehensweise, Zerstückelung des Verfahrens in einzelne Verfahrensschritte, war es möglich, die teils unterschiedlich dimensionierten Anlagenkomponenten rechnerisch aufeinander abzustimmen.

Definitionen

Da in den folgenden Abschnitten viele Abkürzungen und Fachbegriffe mit scharfen Definitionsgrenzen genutzt werden um Sachverhalte erklären zu können, sind diese in Tabelle 1 aufgeführt und deren Bedeutung sowie Definition dargelegt.

Tabelle 1 Abkürzungen und Definitionen

Abkürzung	Name	Erklärung	Einheit
ASL	Ammoniumsulfatlösung	Wasser mit einem gelöstem Ammoniumsulfat	-
BFP	Bandfilterpresse	Fest-Flüssig-Trennverfahren das auf einem Endlos-Siebband Feststoffe zurück hält, vorentwässert und anschließend zwischen einem weiteren Siebband nachentwässert und kompaktiert.	-
BHKW	Blockheizkraftwerk	Energiewandler, der sowohl elektrischen Strom als auch Wärme erzeugt	-
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	Sauerstoffmenge, die benötigt wird um alle Bestandteile einer Probe zu oxidieren.	mg/l, kg
DZ	Dekanterzentrifuge	Kreuzstromseparator der mittels Schwerefeld Feststofffraktionen abtrennt.	-
FHM	Flockungshilfsmittel	Polymer, das suspendierte Feststoffpartikel bindet und dadurch größere Flocken bildet	-
FM	Frischmasse	Masse einer Substanz im Ausgangszustand	kg
K2O	Kaliumoxid	Messgröße für den Kaliumgehalt einer Bodenprobe	kg, ppm, mol
MAP	Magnesium-Ammonium-Phosphat	Schwerlösliches Salz, das durch Fällung von gelöstem Ammonium und Phosphaten unter zugabe von löslichem Magnisium gewonnen werden kann.	-
$\dot{m}$	Massenstrom	Massenstrom an einer bestimmten Stelle im Prozess	kg/h
N	Nitrogen	engl. Stickstoff, Elementkürzel im Periodensystem der Elemente	kg, ppm, mol
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe	Hiermit sind hauptsächlich Energiepflanzen, wie Mais oder Zuckerrüben gemeint	-
NH4-N	Ammoniumstickstoff	Stickstoffmenge, die in Form von Ammonium vorliegt	kg, ppm, mol
P2O5	Diphosphorpentoxid	Messgröße für den Phoshprgehalt einer Bodenprobe	kg, ppm, mol
PSS	Presschnecke	Kreuzstromseparator der mittels Spaltsieb grobe Feststofffraktionen abtrennt.	-
RO	Reverse Osmosis	engl. Umkehrosmose	-
S	Schwefel	Schwefel, Elementkürzel im Periodensystem der Elemente	kg, ppm, mol
TM	Trockenmasse	Masse des wasserfreien Rests, der nach Trocknen einer Probe bei 105°C bis zur Gewichtskonztanz übrig bleibt	kg
TR	Trockenrückstand	Trockenmasse bezogen auf die Frischmasse	%FM
TS	Trockensubstanz	Masse der sedementierbaren Feststoffe in einer Probe, also die Trockenmasse ohne Salze, bezogen auf das Probenvolumen	mg/l
UF	Ultrafiltration	Filtration mit einem Abscheidedurchmesser zwischen 100 und 2 nm	-
VV	Vakuumverdampfer	Aufkonzentrierender Apparat, der durch Anlagen eines Unterdrucks Flüssigkeiten bei Temeraturen unterhalb ihres Siedepunktes verdampft.	-

Energiekennzahl

Bei der Energiekennzahl handelt es sich um ein Instrument zum Vergleich unterschiedlicher Verfahren hinsichtlich ihrer Energieeffizienz. Es wird zwischen weiterführenden Aufbereitungsverfahren und der Separation unterschieden, da bei der Separation aus physikalischen Gründen ein alternatives Referenzverfahren herangezogen werden muss. Generell drückt diese Zahl aus, ob das betrachtete Verfahren effizienter oder ineffizienter als das Referenzverfahren ist. Dabei sprechen Werte größer 1 für eine höhere Effizienz, Werte kleiner 1 für eine geringere.

Weiterführende Aufbereitungsverfahren

Die eigens für die energetische Bewertung der Verfahren entwickelte energetische Leistungskennzahl errechnet sich nach folgender Formel:

$$\varepsilon = \frac{\text{theoretischer Nutzen}}{\text{realer Aufwand}} = \frac{q_{\text{ideal}}}{q + \frac{w}{\eta}}$$

mit

q_{ideal}	:	Benötigte Wärme bei idealer Betrachtung
q	:	Vom Verfahren benötigte Wärme
w	:	Vom Verfahren benötigte elektrische Energie
η	:	Wirkungsgrad des BHKW: 35 %.

Hierbei beschreibt q_{ideal} die unter optimalen Bedingungen theoretisch vom Prozess benötigte Wärmeenergie, um das Prozessziel zu erreichen. Im Falle der aufkonzentrierenden Verfahren, somit allen außer der Strippung, wird als q_{ideal} für das extrahierte Wasser die spezifische Verdampfungsenthalpie von Wasser bei 100 °C herangezogen. Diese entspricht 627 kWh/t. Im Falle der Strippung kommt noch die benötigte Wärmemenge für das Erhitzen des Gärrests auf 90 °C hinzu, da es sich bei diesem Verfahren nicht um ein aufkonzentrierendes Verfahren handelt und somit der Hauptaufwand in der Erwärmung des Gärrests auf die Prozesstemperatur liegt. Bei allen anderen Verfahren wird hierauf verzichtet, da das Aufwärmen vernachlässigbar ist. Das Referenzverfahren für den theoretischen Nutzen entspricht daher einer Verdampfung bei Umgebungsdruck mittels Wärmeenergie. Im Nenner steht die Summe der vom Prozess benötigten Energien in Form von Wärme q und der Arbeit bzw. elektrische Energie w. Da die elektrische Energie zuvor aus Wärme gewonnen werden muss, erfolgt eine Gewichtung der Energien. Die elektrische Energie wird durch den elektrischen Wirkungsgrad des BHKWs geteilt, der mit 35 % angenommen wurde. Die energetische Leistungskennzahl ist kein Wirkungsgrad, da sie prinzipiell Werte zwischen null und unendlich annehmen kann und ist mit der Leistungszahl einer Wärmepumpe bzw. eines Kälteaggregats zu vergleichen. Werte unter eins drücken aus, dass das Verfahren weniger effizient ist als die Referenz, Werte über eins drücken eine höhere Effizienz aus. Der Nutzen bei der Betrachtung des unbehandelten Gärrests ist null und somit auch die thermische Leistungskennzahl.

Sonderfall Separation

Im Falle der Separation ergeben sich nach dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Verfahren sehr hohe Kennzahlen, da es sich hierbei um eine mechanische Vorentwässerung handelt. Die theoretische Betrachtung der mechanischen Separation, für die Bestimmung eines geeigneten Referenzverfahrens, gestaltet sich als schwierig, da kein energetisch logischer Nutzen definiert werden kann. Um für reine Separationsaufgaben dennoch eine sinnvolle Energiekennzahl zu erhalten, wurde die Pressschnecke als Referenzverfahren herangezogen. Dies ist durch die Einsatzhäufigkeit der Pressschnecke an landwirtschaftlichen Biogasanlagen und in Aufbereitungsverfahren begründet.

In diesem Fall entspricht der Nutzen dem Energieaufwand, den eine Pressschnecke hat, um eine Tonne Feststoff bezogen auf die Trockenmasse abzuscheiden. Der Aufwand wird durch den spezifischen Energiebedarf ($P_{s,TM}$) des betrachteten Verfahrens dargestellt. Dieser setzt sich aus der benötigten Wärmeenergie

und der um den BHKW-Wirkungsgrad bereinigten elektrischen Energie zusammen. Dies wird auf die Trockenmasse des abseparierten Feststoffs bezogen.

Die Energiekennzahl (ε) für die Separation errechnet sich im Anschluss aus dem *Nutzen*: spezifischer Energiebedarf der Pressschnecke und dem *Aufwand*: spezifischer Energieaufwand des betrachteten Separationsverfahrens. Im Falle eines Pressschneckenseparators ist dies folglich 1.

$$P_{s,TM} = \frac{q + \frac{w}{\eta}}{TM_{\text{Feststoff}}}$$

$$\varepsilon = \frac{\text{spez. Energiebedarf Pressschnecke}}{\text{spez. Energiebedarf d. Verfahrens}} = \frac{P_{\text{s, TM, PSS}}}{P_{s,\ TM}}$$

mit

$TM_{\text{Feststoff}}$	:	Trockenmasse des Feststoffs
$P_{s,TM}$	:	Spezifischer Energiebedarf bezogen auf die Trockenmasse des separierten Feststoffs
$P_{s,TM,PSS}$	:	Spezifischer Energiebedarf der Pressschnecke

Der spezifische Energiebedarf berücksichtigt hier ebenfalls thermische Energie sowie den BHKW-Wirkungsgrad, obwohl es sich bei der Separation um einen mechanischen Trennschritt handelt. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass auch Entwässerungsverfahren existieren, die ebenfalls thermische Energie nutzen, um einen höheren Trockenstoffgehalt im Produkt zu erhalten. Nicht einbezogen wird bei der Kennzahl der eventuelle Einsatz von Flockungshilfsmitteln bei anderen Verfahren, wie zum Beispiel einer Dekanterzentrifuge.

Aufnahme der Messwerte

An den großtechnischen Gärrestaufbereitungsanlagen wurden unterschiedliche Messwerte aufgenommen. Hierzu zählen die Gärrestproben aller an der Anlage anfallenden Eingangs- und Produktströme sowie in den meisten Fällen ebenfalls die der Zwischenprodukte. Die Beprobung seitens der TU Berlin erfolgte einmalig bei jedem Anlagenbesuch, die Projektpartner aus Hohenheim analysierten zudem ebenfalls die Stoffströme, wenn Proben zur Düngung von Gewächsversuchen bezogen wurden. Weitere Messgrößen waren Massenströme und Energieströme. Diese wurden hauptsächlich durch Auslesen der vor Ort verbauten Messtechnik gewonnen, da keine mobil einsetzbaren Massenstrommessgeräte für Flüssigkeiten mit einem volumetrischen Feststoffanteil größer 5 % existieren. Wärmeströme wurden hauptsächlich aus den geeichten Wärmemengenzählern abgelesen. Das Vorhaben über ein Ultraschalldurchflussmessgerät und Oberflächenthermometer Wärmetauscher zu bilanzieren, scheiterte zumeist an der Zugänglichkeit der entsprechenden Rohrleitungen. In den Fällen, in denen die Installation möglich war, zeigte diese Methode große Abweichungen zu den durch den geeichten Wärmemengenzähler ermittelten Wärmeströme auf und widersprachen auch der eigenen Messtechnik bei der Bilanzierung eines Wasser-Luft-Wärmetauschers.

Die an den Anlagen genommenen Proben wurden extern zur Analyse der Inhaltsstoffe verschickt. Die Probenahme erfolgte nach eindeutiger Klärung der realen Umsetzung des Verfahrensfließbildes und endgültigen Verständnis des Prozessflusses. Es wurde darauf geachtet, dass Stoffströme nachverfolgbar und in etwa gemäß dem Stofffluss beprobt wurden. Weiterhin war zu beachten, dass keine Verdünnungseffekte durch Nichtberücksichtigen der Prozessschritt-Reihenfolge oder der Schaltzeiten bestimmter Regelkreise auftreten. Als Beispiel hierfür kann der Vakuumverdampfer aufgeführt werden, dessen Konzentrat verdünnt wird, wenn die Stromaufwärts liegende Pressschnecke zuerst beprobt wird. Erfolgt die Probenahme im Verdampfer direkt im Anschluss ohne, dass auf den Abpumpzyklus gewartet wird, ist mit einem Verdünnungseffekt zu rechnen und die Probe spiegelt nicht den Soll-Betriebszustand wider.

Bilanzierung

Anhand der Analyseergebnisse und der Vorgabe eines Massenstroms konnte die Bilanzierung der Gärrestaufbereitungsanlagen auch rein probenbasiert erfolgen. Dies diente hauptsächlich zur Bestimmung von Betriebsstoffmengen, insbesondere Schwefelsäure. Aber auch Produktverhältnisse und Abscheidegrade ließen sich hierdurch auf Plausibilität überprüfen.

Das Vorgehen bestand darin eine Einzelkomponente, bspw. eine Pressschnecke, mit Angabe des Eingangsmassenstroms ($\dot{m}_1$) und den Feststoffgehalten (TR_1, TR_2, TR_3) die Ausgangsströme ($\dot{m}_2$, $\dot{m}_3$) zu bilanzieren. (siehe Abbildung 11)

Aus der Bilanz ergeben sich die Formeln:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 * \left(\frac{TR_1 - TR_3}{TR_2 - TR_3}\right)$$

und

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 - \dot{m}_2.$$

Auf der anderen Seite konnte durch die Bilanzierung der einzelnen Stoffströme auf Grundlage der gemessenen Massenströme an den großtechnischen Anlagen der Fehler einer solchen Analyse für jede einzelne Komponente i quantifiziert werden. Die Bilanz der Einzelkomponenten

$$\dot{m}_1 c_{1,i} = \dot{m}_2 c_{2,i} + \dot{m}_3 c_{3,i}$$

muss auf beiden Seiten gleich groß sein, wenn keine Stoffspeicherung oder -erzeugung im Bilanzraum erfolgt. c_i steht dabei für die Konzentration einer bestimmten Komponente. Durch Umstellen der Formel können auch fehlende Konzentrationen berechnet werden, wenn alle Massenströme und Konzentrationen in den anderen bilanzierten Strömen bekannt sind.

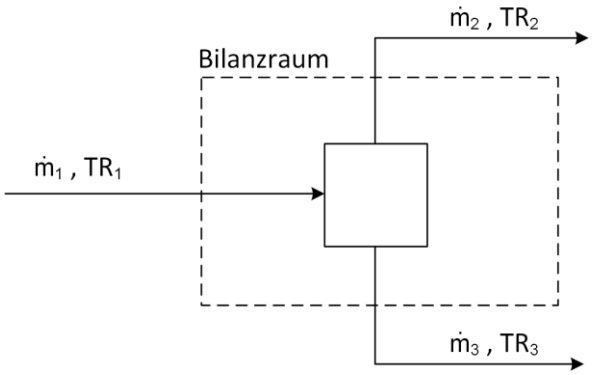


Abbildung 11 Bilanzraum um einen Verfahrensschritt, gezeigt sind Massenströme und Feststoffgehalte.

Abscheidegrade / Rückhaltegrade

Aus der Anlagenbilanzierung lassen sich die Abscheide- bzw. Rückhaltegrade der einzelnen Gärrestinhaltsstoffe für einzelne Verfahrensschritte bestimmen. Der Rückhaltegrad ϕ_R ist so definiert, dass er durch Multiplikation mit dem Eingangsmassenstrom der Komponente i den Ausgangsmassenstrom dieser Komponente als Ergebnis liefert. Umgekehrt bedeutet dies, dass er aus den Messungen mit folgender Formel berechnet wurde.

$$\phi_{R,i} = \frac{\dot{m}_{2,i}}{\dot{m}_{1,i}}$$

Naturgemäß nimmt der Rückhaltegrad Werte zwischen 0 und 1 an. Die Summe der Abscheidegrade der ausgehenden Ströme muss 1 ergeben. Insgesamt wurden durch die Mittelung aller auf diese Art gewonnen stoff- und apparatespezifischen Rückhaltegrade, Abscheideverhalten von elf Stoffkomponenten in elf Apparaten bestimmt. Die ermittelten Rückhaltegrade können im Anhang in Tabelle 33 eingesehen werden.

Methodik Fallbeispiele

Da an den vermessenen Anlagen unterschiedliche Bedingungen herrschten, wurde ein Modellgärrest festgelegt, damit alle Verfahren anhand von Fallstudien verglichen werden können. Die Zusammensetzung ist in Tabelle 2 aufgeführt. Dieser Modellgärrest diente ebenfalls als Vorlage, wenn Angebote von Herstellern angefordert wurden. Die jährlich anfallenden Gärrestmengen orientierten sich an NaWaRo-Biogasanlagen der Größenklassen 500 kW_{el} sowie 2 MW_{el} und wurden auf 10.715 bzw. 42.860 Tonnen pro Jahr festgelegt. Diese Mengen gilt es mit dem jeweils betrachteten Verfahren so weit wie möglich aufzubereiten.

Vorgehensweise

Die einzelnen betrachteten Behandlungsprozesse wurden für die Modellierung durch Aneinanderreihen ihrer Verfahrensteilschritte zusammengebaut. Anschließend erfolgte die Aufspaltung des Modellgärrests durch Anwendung der aus den Messungen erhaltenen prozessschrittspezifischen Rückhaltegrade. Hierdurch wird das Trennverhalten jedes einzelnen Verfahrensschritts simuliert. Da diese Vorgehensweise nicht auf alle Trennschritte und Einzelkomponenten anwendbar war, ohne dass Fehler entstanden oder unrealistische Werte das Ergebnis waren, wurden gewisse Randbedingungen vorausgesetzt und in manchen Fällen auf eine Stoffbilanz zurückgegriffen. Tabelle 3 führt die fixierten bzw. bilanziell ermittelten Werte auf.

Tabelle 2 Zusammensetzung des rohen Modellgärrest, der zum Vergleich aller Verfahren dient

Komponente	Wert	Einheit
TR	7,9	% FM
N	6,0	kg/t FM
NH4-N	3,9	kg/t FM
P2O5	2,5	kg/t FM
K2O	9,3	kg/t FM
S	0,4	kg/t FM

Tabelle 3 Zusammenfassung der in den Fallbeispielen fixierten Größen und Anmerkung, ob vom Rückhaltegrad basierten Berechungsverfahren abgewichen wurde

Produkt	TR	Bemerkung
Pressschnecke Fest	30%	
Dekanter Fest	25%	
Ultrafiltrationskonzentrat	3%	
ASL aus Brüdenwäscher	35%	N-Bilanz
ASL Strippung	30%	N-Bilanz
ASL aus Abluftreinigung	17%	N-Bilanz
Schwefelsäure Dosierung	-	N-Bilanz

Die Stickstoffbilanz (N-Bilanz) wurde immer dann herangezogen, wenn durch thermische Einwirkung eine Ammoniumreduktion im behandelten Stoffstrom erfolgte oder für den Fall, dass Schwefelsäure (über)stöchiometrisch dosiert werden musste, um Ammoniak als Ammonium zu binden.

Rechenbeispiel

Um die vorgenommene Bilanzierung besser verständlich zu machen, ist an dieser Stelle ein Berechnungsbeispiel anhand eines Vakuumverdampfers mit vorgeschalteter Pressschnecke aufgeführt. Der Bilanzraum um den Separator und alle dazugehörigen Massenströme sind Abbildung 11 zu entnehmen. Der Massenstrom der abgeschiedenen Feststoffphase M_2 und der Flüssigphasenmassenstrom $\dot{m}_3$ nach der Separation berechnen sich dann aus den Trockenmassenströmen $T\dot{M}_{1,2,3}$ wie folgt:

$$T\dot{M}_2 = \phi_{R,TM}\, TM_1$$

$$T\dot{M}_3 = \left(1 - \phi_{R,TM}\right) T\dot{M}_1 = T\dot{M}_1 - T\dot{M}_2$$

Mit der Vorgabe des Trockenrückstands der Feststoffphase TR_2, lässt sich der Feststoffmassenstrom $\dot{m}_2$ bestimmen

$$\dot{m}_2 = \frac{T\dot{M}_2}{TR_2}$$

und hieraus der Massenstrom der Flüssigphase

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 - \dot{m}_2.$$

Die Konzentrationen der übrigen Komponenten N, P, K, S ergeben sich aus

$$c_{2i} = \frac{\Phi_{R,i}\dot{m}_{1,i}}{\dot{m}_{2,i}}$$

bzw.

$$c_{3,i} = \frac{\dot{m}_{1,i} - \dot{m}_{2,i}}{\dot{m}_3}.$$

Die Bilanzierung der Dekanterzentrifuge und der Ultrafiltration erfolgen analog zu dieser Rechnung.

Die anschließende Behandlung der Flüssigphase erfolgt in einem Vakuumverdampfer, der Bilanzraum erstreckt sich dabei von dem Verdampfer selbst über den Brüdenwäscher zur Ammoniakentfernung in der Dampfphase bis hin zum Kondensator, in dem der Wasserdampf wieder verflüssigt wird. Abbildung 12 Bilanzraum um einen Vakuumverdampfer mit angeschlossenem Brüdenwäscher und Kondensatorzeigt die Bilanzierung des Vakuumverdampfers mit besonderem Fokus auf die Stickstoffkomponente.

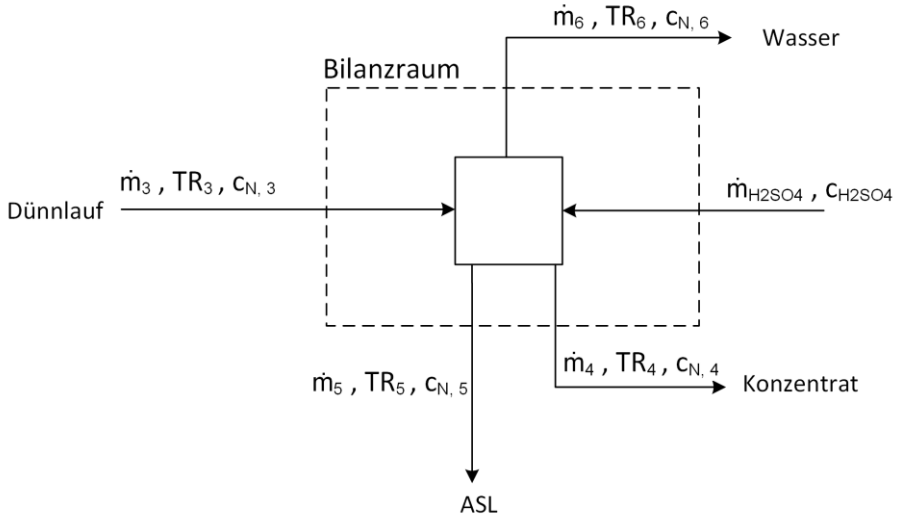


Abbildung 12 Bilanzraum um einen Vakuumverdampfer mit angeschlossenem Brüdenwäscher und Kondensator

Die Menge des Konzentrats wird aus dem Rückhaltegrad für den Massenstrom gewonnen, dasselbe gilt für alle weiteren im Konzentrat vorhanden Komponenten. Um den Massenstrom der Ammoniumsulfatlösung bestimmen zu können, muss zunächst der Trockenmassenstrom durch den Verdampfer bilanziert werden. Da dieser maßgeblich aus Ammoniumsulfat besteht, geschieht dies über eine Stickstoffbilanz; genauer über eine Ammoniumstickstoffbilanz.

$$\dot{m}_{\text{NH4-N, 5}} = \dot{m}_{\text{NH4-N, 3}} - \dot{m}_{\text{NH4-N, 4}}$$

Aus den Stoffanalysen ist bekannt, dass die Schwefelsäure leicht überstöchiometrisch dosiert wird. Daher ergibt sich der Schwefelsäurebedarf aus dem Stickstoffmassenstrom in Verbindung mit dem Faktor F_{stoech} für die Überdosierung. Dies erfolgte über die Bilanzierung des Schwefels.

$$\dot{m}_{\text{S, 5}} = F_{\text{stoech}}\, \dot{m}_{\text{NH4-N, 5}}\, \frac{32}{2 * 14}$$

Der letzte Term entspricht dabei dem Massenverhältnis in dem Schwefel und Stickstoff in Ammoniumsulfat vorliegen. Der gesamte Trockenmassenstrom besteht ausschließlich aus Ammoniumsulfat (AS) und berechnet sich daher aus der Summe von Stickstoff- und Schwefelmassenstrom bezogen auf ihren Massenanteil in Ammoniumsulfat $x_{AS,\,N}$ und $x_{AS,\,S}$.

$$\dot{TM}_5 = \dot{m}_{AS,5} = \frac{\dot{m}_{\text{NH4-N},5}}{x_{AS,N}} + \frac{\dot{m}_{S,5}}{x_{AS,S}}$$

Aus TM_5 und der Vorgabe einer 35 %igen ASL (TR_5 = 35 %) berechnet sich wiederum der Gesamtmassenstrom der ASL.

$$\dot{m}_5 = \frac{\dot{TM}_5}{TR_5}$$

Der Schwefelsäuremassenstrom wird über eine analoge Berechnung ermittelt.

$$\dot{m}_{H2SO4} = \frac{\dot{m}_{S,5}}{x_{AS,S}\,TR_{H2SO4}}$$

Damit verbleibt nur noch der Wassermassenstrom als einziger unbekannt und lässt sich somit leicht über eine Gesamtmassenbilanz bestimmen.

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{H2SO4} - \dot{m}_4 - \dot{m}_5$$

In der Bilanz um den Vakuumverdampfer und über alle anderen wasserausschleusenden Verfahren wurde die Annahme getroffen, dass das abgeschiedene Wasser rein ist und keine Stickstoff oder Schwefelwasserstoffrückstände enthält. Aus den Probenanalysen ging hervor, dass dies ausreichend genau ist, da die Belastung des ausgeschleusten Wassers im Verhältnis zu allen anderen Strömen verschwindend gering ist. Bei der ASL Produktion in konvektiven Trocknungsverfahren, insbesondere Abluftwäschern, wurde von einer 90 %igen Ammoniakreduktion in der Abluft ausgegangen.

Diese Art der Bilanzierung führt aufgrund der verwendeten Messverfahren zu einem Überschuss an Feststoff, bzw. einem Defizit in der Wasserbilanz um den Brüdenwäscher. Die Erklärung hierfür ist, dass das im Gärrest vorliegende Ammonium bei der Messung des TR bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz als Ammoniak ausgast und nicht gemessen wird. Sobald das Ammonium allerdings als Ammoniumsulfat gebunden wird, ist es stabil und bleibt als Feststoff bei der Messung des TR einer Ammoniumsulfatlösung zurück.

2. Erzielte Ergebnisse

Separation

Die Separation der Feststoffe stellt in der Gärrestaufbereitung das zentrale Problem dar. Die grobe Feststofffraktion mit Partikelgrößen über 0,5 mm, also der Teil, der mittels dem üblichen Pressschneckenseparator abgeschieden wird, entspricht nach eigenen Messungen an NawaRo-Biogasanlagen nur ca. einem Drittel des Gesamtfeststoffgehalts. Aufgrund der negativen Ladung der kleineren Feststoffpartikel, stoßen sich diese gegenseitig ab. (Heviánková et al. 2015) Angesichts dieser Tatsache erfolgt auch keine Sedimentation bei längeren Standzeiten in einem Gärrest, dessen Grobfraktion entfernt wurde.

Um die Partikelverteilung unterhalb von 0,5 mm näher zu beleuchten wird die Analogie zu einem wissenschaftlichen Artikel gezogen. (Masse et al. 2005) Hier werden die Partikelgrößenverteilung und die Zusammensetzung der einzelnen Fraktionen von anaerob fermentierter Schweinegülle betrachtet. Da der Gärrest aus einer Schweinegüllefermentation einen sehr niedrigen Feststoffgehalt von unter 3 % und einen geringen Anteil von Feststoffen > 1 mm aufweist, bietet es sich an, diese direkt mit der Flüssigphase eines NawaRo-Gärrests nach Pressschneckenseparation zu vergleichen. Die Aufteilung der einzelnen Fraktionen ist Abbildung 13 zu entnehmen. Interessant für die Partikelanalyse der Feststoffe ist *AD manure* unter *(a) based on TS analysis,* da hier nicht der Anteil leicht flüchtiger flüssiger Stoffe berücksichtigt wird, sondern ausschließlich die in der Flüssigkeit vorhandenen partikulären Feststoffe. Hier ist erkennbar, dass rund 80 % der in der Flüssigphase vorhanden Partikel einen Durchmesser kleiner 10 µm aufweisen. Daher ist es selbst mit einem feinmaschigen Kantenspaltfilter von 25 µm Siebfeinheit nicht möglich, signifikante Mengen feinpartikulären Feststoff abzutrennen.

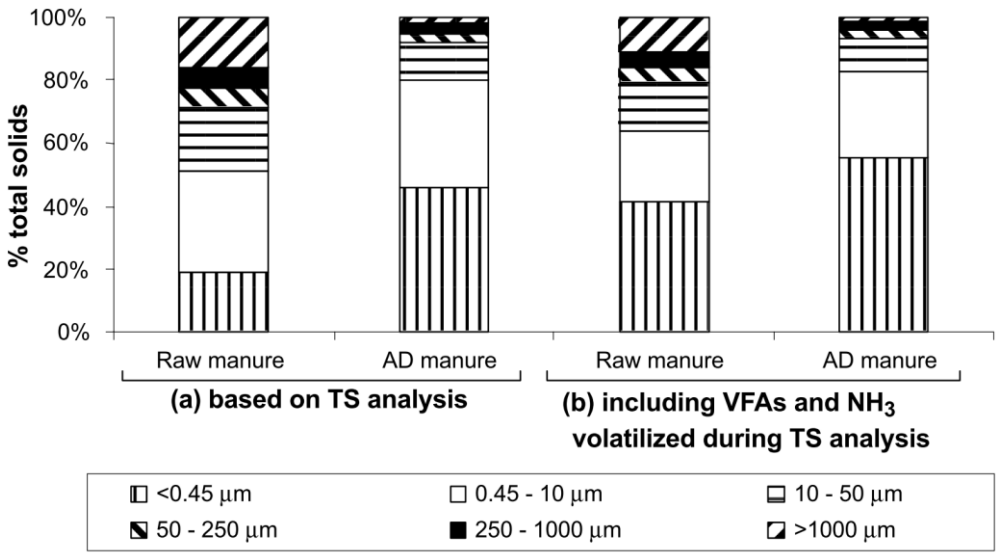


Abbildung 13 Partikelgrößenverteilung in anaerob vergorener Schweinegülle (Masse et al. 2005)

Abhilfe kann nur über chemische Additive geschaffen werden. Dabei werden wie im Abschnitt *Flockung* beschrieben kleine Flocken an geladenen Partikeln angelagert, um Makroflocken zu bilden. Aus eigenen Versuchsreihen ist bekannt, dass auch dieses Vorgehen viele Tests erfordert, um für ein bestimmtes Substrat ein passendes Flockungshilfsmittel zu finden. Übertragbar auf Substrate anderer Biogasanlagen ist dies ebenfalls nur in seltenen Fällen, eine individuelle Ermittlung des passenden Flockungshilfsmittels daher unabdingbar. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen auch (Schwarz et al. 2006). In dieser Untersuchung wurden verschiedene Flockungshilfsmittel auf ihre Flockungseffizienz verglichen. Hier gelang die Flockenbildung in einem Substrat mit durchschnittlicher Partikelgröße von 320 nm, negativer Partikelladung bei einem pH-Wert von 9 erfolgreich. Die durchschnittliche Partikelgröße des verwendeten Substrats liegt somit in dem Bereich der schlecht trennbaren Partikelfraktion. Kritisch ist die Feststoffabtrennung insbesondere deshalb, da in den kleinen Partikelfraktionen der Großteil des partikulären chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) liegt und weiterführende Aufbereitungsverfahren wie die Umkehrosmose nur mit partikelfreien Flüssigkeiten betrieben werden können. Weiterhin führt die Feststofffracht zu erhöhter Viskosität und damit größeren Druckverlusten in Wärmetauschern oder in einer Ultrafiltration, was sich negativ auf den elektrischen Strombedarf auswirkt. Die für die Feststoffabtrennung zur Verfügung stehenden Technologien wurden bereits im ersten Kapitel vorgestellt. Die am häufigsten zum Einsatz kommende Maschine ist der Pressschneckenseparator. Hierfür konnte der in Literatur und von Herstellern angegebene Energiebedarf von rund 0,5 kWh pro Tonne Gärrest in Messungen bestätigt werden. Weiterhin wurden Abscheidegrade der einzelnen Stofffraktionen

ermittelt ebenso wie Energiebedarfsmessungen eines Dekanters und einer Bandfilterpresse. Letztere Verfahren wurden beide mit einer vorgeschalteten Flockung betrieben.

Berechnungsgrundlagen

Für die Ermittlung der Abscheidegrade und die Bilanzierung der Stoffströme wird auf den Methodenteil verwiesen. Eine theoretische Betrachtung des erwarteten mechanischen Aufwands ist schwer möglich. Hierfür fehlen Untersuchungen bezüglich der mechanischen Eigenschaften von Gärresten. In Gesprächen mit Anlagenbetreibern konnte eruiert werden, dass die Eigenschaften nicht denen von Maissilage gleicher Feststoffkonzentration entsprechen und signifikant höhere Reibungs- und Abriebskräfte hervorrufen. Dies hat zur Folge, dass mechanisch beanspruchte Bauteile und Motoren von Förder-, Entwässerungs- und Kompaktierungsmaschinen stärker ausgelegt werden müssen und mit einem höheren Energiebedarf als bei der Maissilageverarbeitung zu rechnen ist.

Messdaten

Pressschnecke

Die Messdatenerhebung einer Schneckenpresse gestaltete sich komplizierter als angenommen. Zwar ist eine Pressschnecke an beinahe jeder der vermessenen Biogasanlagen vorhanden, allerdings ist der elektrische Anschluss dieser meist mit anderen Maschinen in einem Schaltschrank zusammengefasst. Da es aufgrund der geometrischen Eigenschaften des Strommessgerätes nur möglich war an dem Hauptanschluss eines Schaltschrankes zu messen und der direkte Anschluss des Messgerätes an die Elektrik der Pressschnecke eine Neuverkabelung bedeutet hätte, musste zumeist auf eine gesonderte Elektrizitätsbedarfsmessung verzichtet werden. Nur an einer Pilotanlage bestand die Möglichkeit aufgrund des modularen Anlagenaufbaus sowohl die Stoffströme, als auch den elektrischen Strombedarf gesondert zu ermitteln. Hier konnte ein spezifischer Elektrizitätsbedarf von 0,54 kWh pro behandelter Tonne Gärrest ermittelt werden. Dieser deckt sich mit Hersteller- und Literaturangaben. In Gesprächen mit Anlagenbetreibern größerer Aufbereitungsverfahren, wurde dieser Wert ebenfalls bestätigt und als vernachlässigbar gering gegenüber anderen Stromverbrauchern bezeichnet. An allen anderen Anlagen mit Pressschneckenseparator wurden Abscheidegrade durch Stoffstrombilanzen gemäß dem im Methodikteil beschriebenen Vorgehen ermittelt. Die Ergebnisse der Stoffstromaufteilung sind in Tabelle 4 aufgeführt. Dargestellt sind hier die prozentualen Stoffstromanteile des Feedstroms, die im Feststoff wiedergefunden werden. Da Gärrest ein sehr inhomogenes Stoffgemisch ist und sich von Biogasanlage zu Biogasanlage stark unterscheidet, auch wenn diese mit den gleichen Substraten gefüttert werden, sind die relativen Standardabweichungen der Abscheidegrade sehr hoch. Dies zeigt, dass pauschale Aussagen bezüglich der Stoffstromaufteilung und damit auch dem Energiebedarf großen Schwankungen unterliegen. Es ist festzuhalten, dass alle hier aufgeführten Messergebnisse von NawaRo-Biogasanlagen stammen. Aus technischer Sicht liegt der Fokus auf dem Abscheidegrad der Trockenmasse TM. Im Schnitt wird hiervon ein Drittel abgeschieden. Dieser schwankt allerdings zwischen 10 und 57 %. Laut eines Herstellers werden Pressschneckenseparatoren darauf ausgelegt 50 % der Trockenmasse abzuscheiden. Da die Technik bisher aber hauptsächlich bei der Gülleseparation zum Einsatz kommt und die Partikelgröße durch anaerobe Vergärung abnimmt (Masse et al. 2005) ist ein Durchschnittswert unter 50 % nicht verwunderlich.

Tabelle 4 Abscheidegrade eines Presschneckenseparators, Stoffstromanteile in der Feststofffraktion

PSS fest / Messung	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**Rel. St.Aw.**	**Mittelwert**
Massenstrom	24%	9%	5%	12%	22%	2%	64%	12%
TM	57%	35%	15%	30%	50%	10%	52%	33%
Wasser	20%	7%	4%	10%	19%	2%	67%	10%
N-Gesamt	27%	14%	6%	7%	22%	3%	66%	13%
NH4-N	17%	7%	6%	5%	16%	2%	64%	9%
P-Gesamt (P2O5)	31%	18%	10%	23%	38%	9%	49%	22%
K-Gesamt (K2O)	22%	9%	5%	9%	22%	2%	68%	12%
Schwefel	37%	24%	8%	25%	37%	5%	55%	23%

Dekanter

Die Feststoffabtrennung mittels Dekanter kann als weiterführendes Separationsverfahren angesehen werden, da diesem meist eine Pressschnecke vorgeschaltet ist, um für eine Vorabscheidung des Feststoffs zu sorgen. Dies begründet sich nicht nur in dem geringen Energiebedarf der Pressschnecke, sondern auch dadurch, dass Dekanter in der Regel flockungsunterstützt arbeiten. So führt eine Feststoffreduktion stromaufwärts zu einem geringeren Flockungs-(hilfs-)mittelbedarf, da diese proportional zum Feststoffgehalt der zu trennenden Suspension dosiert werden.

Die Größenordnung der Flockungshilfsmittel-Zugabe bewegt sich zwischen 4 und 5 kg Flockungshilfmittel pro Tonne Trockenmasse im Gärreststrom. Aufgrund der geringen Konzentrationen der Flockungspolymerlösung von 0,2 bis 0,5 % hat dies einen Anstieg von 4 bis 10 % des zu behandelnden Massenstroms zur Folge, je nach Flockbarkeit des Gärrests. Eine Energiebedarfsmessung an einem Dekanter ergab einen Wert von 2,6 kWh pro Tonne behandeltem Eingangsmassenstrom, was geringfügig unter der Literaturangabe von (Fuchs et al. 2010) zwischen 3 und 5 kWh/m³ behandelten Gärrest liegt. Dieser Dekanter kam zwar an einer Forschungsanlage zum Einsatz, es handelt sich hierbei allerdings um eine großtechnische Maschine, die über drei Kubikmeter pro Stunde behandeln kann.

Tabelle 5 zeigt die Messergebnisse der Abscheidegrade einer Dekanter-Zentrifuge mit Flockung. Es ist klar zu erkennen, dass eine starke Reduktion der vorhandenen Feststoffmenge erfolgt. Ebenfalls werden große Anteile des Phosphors und des Schwefels entfernt, was auf ein größtenteils partikuläres Vorliegen dieser Stoffe schließen lässt. Kalium hingegen hat nur einen kleinen Abscheidegrad und liegt damit hauptsächlich in gelöster Form vor. Ebenso Stickstoff, wobei hier immer auf das Verhältnis von Ammonium zu Gesamtstickstoff geachtet werden muss, da der Ammoniumstickstoff gelöst vorliegt. Der erzielte Feststoffgehalt im Dekanterzentrat schwankte zwischen 1,2 und 1,5 %.

Tabelle 5 Abscheidegrade einer Dekanterzentrifuge, prozentuale Stoffstromanteile in der Feststofffraktion

Dekanter fest	**Messung**
Massenstrom	14%
TM	74%
Wasser	11%
N-Gesamt	30%
NH4-N	18%
P-Gesamt (P2O5)	81%
K-Gesamt	15%
Schwefel	91%

Bandfilterpresse

Bei dem Einsatz von Bandfilterpressen an Biogasanlagen zur Feststoffabtrennung handelt es sich ebenfalls wie beim Dekanter um eine weiterführende Trenntechnik, da auch hier eine Flockung benötigt wird. Dies hat

dieselben Konsequenzen wie bei der Dekanterzentrifuge. Es werden Zusatzstoffe benötigt, was die Anlagenbelastung bedingt durch Flockmittelzugabe erhöht. Im Fall der Bandfilterpresse liegt diese jedoch über der Dekanter-Zentrifuge. Es wurde ein Flockungshilfsmittelbedarf von 15 kg/t Trockenmasse ermittelt, was eine Erhöhung des Gärrestmassenstroms um 18 bis 30 % zur Folge hat. Dies ist abhängig von der maximal erreichbaren Flockungshilfsmittelkonzentration in der Lösung. Diese Erkenntnis deckt sich mit der Aussage von (Fuchs et al. 2010), dass der Flockmittelbedarf einer Bandfilterpresse den eines Dekanters um das zwei bis dreifache übersteigt.

Die Anlagenkapazität der Bandfilterpresse belief sich auf rund fünf Kubikmeter pro Stunde, der gemessene Energiebedarf pro Tonne Eingangsmaterial ergab 0,58 kWh. Im Vergleich zur Literatur ist dieser Wert sehr viel geringer, dieser wird von (Fuchs et al. 2010) mit 1,5 bis 2 kWh/m³ angegeben.

Die in Tabelle 6 aufgeführten Abscheidegrade sind gut mit denen des Dekanters vergleichbar, bzw. liegen leicht darüber, allerdings kann dies aufgrund der Schwankungen in den Analyseergebnissen nicht als signifikant angesehen werden. Auch die Abscheidegrade der Bandfilterpresse zeigen erhöhte Werte für die Abtrennung von Phosphor und Schwefel in die Feststoffphase, während Kalium und Ammonium hauptsächlich in der Flüssigphase verbleiben. Als besonders effizient wird die gemessene Feststoffabtrennung der Bandfilterpresse angesehen. Nicht nur gelang es einen Anteil von weit über 80 % der Trockenmasse abzuscheiden, das Filtrat wies zudem mit einem Trockenrückstand von durchschnittlich 1 % sehr geringe Feststoffgehalte auf. Diese Eigenschaft ist für Folgeverfahren, wie Ultrafiltration und Umkehrosmoseanlagen sehr wichtig. Zu berücksichtigen hierbei ist das Messverfahren für Trocken-rückstand, da hier nicht nur Feststoffpartikel in die Messung eingehen, sondern auch die bei der Trocknung zurückbleibenden Salze. Der Anteil des partikulär in der Flüssigkeit vorliegenden Trockenstoffanteils ist also geringer. Für anschließende Verfahren ist hauptsächlich Partikelfreiheit wichtig.

Tabelle 6 Abscheidegrade einer Bandfilterpresse, prozentuale Stoffstromanteile in der Feststofffraktion

BFP fest	**Messung 1**
Massenstrom	18%
TM	87%
Wasser	14%
N-Gesamt	56%
NH4-N	23%
P-Ges. (P2O5)	98%
K-Ges. (K2O)	29%
Schwefel	93%

Theoretische Betrachtung

Wie bereits im Abschnitt *Berechnungsgrundlagen* beschrieben, wird von einer theoretischen Betrachtung des Trennaufwandes für die Abscheidung einer bestimmten Menge Feststoff aufgrund von Datenmangel abgesehen. Als Referenz für den Energiebedarf eines Feststofftrennverfahrens wird daher die Pressschnecke herangezogen, da es sich hierbei um das einfachste und am meisten verbreitete Verfahren handelt.

Datenvergleich

Tabelle 7 zeigt die aus technischer Sicht wichtigsten Ergebnisse der betrachteten Trennverfahren Pressschnecke, Dekanter-Zentrifuge und Bandfilterpresse. Zudem können hier die Ergebnisse direkt mit den Angaben aus (Fuchs et al. 2010) verglichen werden. Aufgezeigt werden die Werte für den spezifischen Energiebedarf pro Tonne Gärrest am Eingang der Separation, der Feststoffabscheidegrad, der Flockungshilfsmittelbedarf, der in Messungen ermittelte Feststoffgehalt der Flüssigphase und die spezifische Arbeit, bezogen auf den Abscheidegrad von Feststoff. Wie bei einem so inhomogenen Gemisch wie Gärrest nicht anders zu erwarten, unterscheiden sich die Abscheidegrade stark zwischen Messung und Literatur, der Energiebedarf ist weitestgehend kongruent zur Literatur. Nur der Energiebedarf von Bandfilterpressen wurde in der eigenen Messung deutlich unterboten. Hier spielen allerdings auch viele Faktoren bei der Feineinstellung der Flockung, Bandgeschwindigkeit, Filterfeinheit, Pressdruck und Anzahl der Umlenkungen in der Pressstrecke mit in die Gleichung. Eindeutig ist allerdings, dass sowohl Dekanter, als auch Bandfilterpresse einen höheren Abscheidegrad aufweisen als die Pressschnecke und geringere Feststoffgehalte im Zentrat bzw. Filtrat erzielen, was unter anderem auch an der Flockung liegt.

Tabelle 7 Ergebnistabelle der Messungen und Literaturangaben für Trennverfahren in der Gärrestaufbereitung. Gezeigt wird die spezifische Arbeit pro Tonne Eingangsmaterial, der Feststoffabscheidegrad, der Bedarf an Flockungshilfsmittel,

der gemessene TR der Flüssigphase und die spezifische Arbeit geteilt durch den Feststoffabscheidegrad als vergleichsmaß für den Aufwand der Feststoffabtrennung.

	W_s [kWh/t_{Input}]	Abscheidegrad TM	FHM [kg/t_{TM}]	TR_L	$W_{S,TM}$ [kWh/t]
Messungen					
PSS	0,54	33%	0	5,3%	1,65
DK	2,56	74%	4	1,4%	3,45
BFP	0,58	87%	15	1,0%	0,67
Fuchs et. al. 2010					
PSS	0,4-0,5	48%	-	-	0,94
DK	3-5	58%	-	-	6,90
BFP	1,5-2	k. A.	-	-	-

Konvektive Trocknungsverfahren

Da den Verfahren Aufkonzentration und Feststofftrocknung dasselbe Prinzip der konvektiven Luft-trocknung zugrunde liegt, werden die Grundlagen hier gemeinsam abgehandelt. Diese Verfahren funktionieren durch das Erwärmen der Umgebungsluft, welche über das zu trocknende Gut geführt wird, hierbei verdunstet das Wasser und die beladene Luft wird wieder in die Umgebung geblasen. Die für die Verdunstung benötigte Wärmeenergie stammt hierbei ausschließlich aus der Trocknungsluft.

Berechnungsgrundlagen

Für die Auswertung der Messdaten wurde ein Tabellenberechnungsprogramm erstellt, mit dem die Zustände der feuchten Luft aus den gemessenen Daten: Temperatur, relative Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und Zeit ermittelt werden können. Zu den berechneten Daten zählen Wasserbeladung, Dichte, Dampfdruck, Sättigungsdampfdruck und Enthalpie sowie die Massenströme von Luft und Wasser. Anhand dieser Daten erfolgt eine Bilanzierung der Massen- und Energieströme. Hieraus ergab sich eine durchschnittliche Verdunstungsleistung von 0,6 L/kWh bei der Vermessung eines Aufkonzentrationsverfahrens.

Messdaten

Im Detail können die drei sich bei der Trocknung ergebenden Zustände der feuchten Luft in einem Mollier-Diagramm dargestellt werden. Dies erfolgte für die Durchschnittswerte der Anlagenvermessung. Das hier betrachtete Verfahren ist eine Aufkonzentration, der Aufstellungsort befindet sich in der Nähe von Bremen. Abbildung 14 stellt die gemessenen Zustände in Blau dar. Die Umgebungsluft wird mit durchschnittlich 22 Grad Celsius und einer relativen Luftfeuchte von 67 % angesaugt, siehe Punkt 0. In einem Flüssig-Gas-Kreuzstromwärmetauscher erfolgt der Wärmeaustausch zwischen Umgebungsluft und BHKW-Kühlwasser. Die Wasserbeladung der Luft bleibt hierbei konstant, die relative Luftfeuchte sinkt allerdings aufgrund des Temperaturanstieges. Es ergibt sich Punkt 1 im Mollier-Diagramm, basierend auf den durchschnittlichen Messwerten T=58 °C und φ= 9 %. Die aufgenommene Wärmeleistung entspricht rund 340 kW bei einem Luftmassenstrom von 34.000 kg/h. Der Zustand der Abluft wird durch Punkt 2 beschrieben. Hier beträgt die Temperatur noch 42 Grad Celsius und die relative Luftfeuchte 30 %. Die Verlängerung der blauen Linie in Rot zeigt das noch vorhandene Potential der Luft. Auf der x-Achse lässt sich ablesen, dass hier noch weitere sechs Gramm Wasser pro Kilogramm Luft absorbiert werden können, bis eine relative Luftfeuchte von 90 % erreicht wird. Dies entspricht in etwa einer Verdoppelung der Wasseraufnahme. Damit besteht die Möglichkeit unter den gegebenen Umständen eine Verdunstungsleistung von 1,17 L/kWh zu erzielen.

Mithilfe der spezifischen Verdampfungswärme von Wasser bei 100 °C, Δh_{LV} = 0,627 kWh/kg, lässt sich die Effizienz für die Verdunstung berechnen indem die erreichte Verdunstungsmenge pro Kilowattstunde durch die maximal mögliche Verdunstungsleistung von 1,60 L/kWh geteilt wird. Dies ergibt die Werte für die thermische Energiekennzahl in Höhe von 0,38 bzw. 0,74.

Das Erreichen einer bestimmten Luftfeuchte am Trocknerausgang hängt von mehreren Faktoren ab, so zum Beispiel Gutsoberfläche, Überströmungsgeschwindigkeit und Kontaktzeit. Sollen alle drei Faktoren in einem Trockner kombiniert werden, resultiert dies in einer großen Bauform mit entsprechend hohen Investitionskosten. Anlagenhersteller versuchen daher einen optimalen Kompromiss aus Baugröße bzw. Investitionskosten und Wärmeeffizienz zu erreichen.

Fallstudie TU Berlin

In der Fallstudie der TU Berlin wurde ein Bandtrocknerverfahren mit Feststoffrückvermischung betrachtet. Hierbei wird ein Teil des getrockneten Feststoffs zurück zum Trocknereingang befördert um auch flüssigen Gärrest aufnehmen zu können. Dadurch wird es möglich mehr Wasser zu verdampfen, als in der Feststoffphase allein enthalten ist. Die Wärmeleistung des Bandtrockners betrug rund 340 kW; diese Zahl basiert auf Angebots- und Messdaten. Bei dieser Wärmeleistung ist auf Basis eigener Berechnungen anzumerken, dass in kalten Wintermonaten ein Wärmeengpass entstehen kann, wenn der Trockner ausschließlich Abwärme aus dem Kühlwasserkreislauf des BHKW bezieht. (Thiering und Bahrs 2011; MAN)

Der Behandlungsprozess besteht hierbei aus einer Vorseparation mittels Pressschnecke und anschließender Trocknung der Feststoffphase unter Beimengung eines Teilstroms der Flüssigphase auf einen Trockenstoffgehalt von 86 %. Letzterer ist wichtig für einen eventuell nachfolgenden Pelletierschritt. Insgesamt ermöglicht dieses Aufbereitungsverfahren eine Reduktion der jährlich anfallenden Gärrestmenge um 23 %. Im Falle einer Abluftbehandlung werden weiterhin 87 t einer 17 %igen ASL produziert. Die Energiekennzahl beläuft sich unter Einbeziehung thermischer sowie elektrischer Energie auf 0,42. Eine Zusammenfassung aller Ergebnisse ist in Tabelle 9 zu finden.

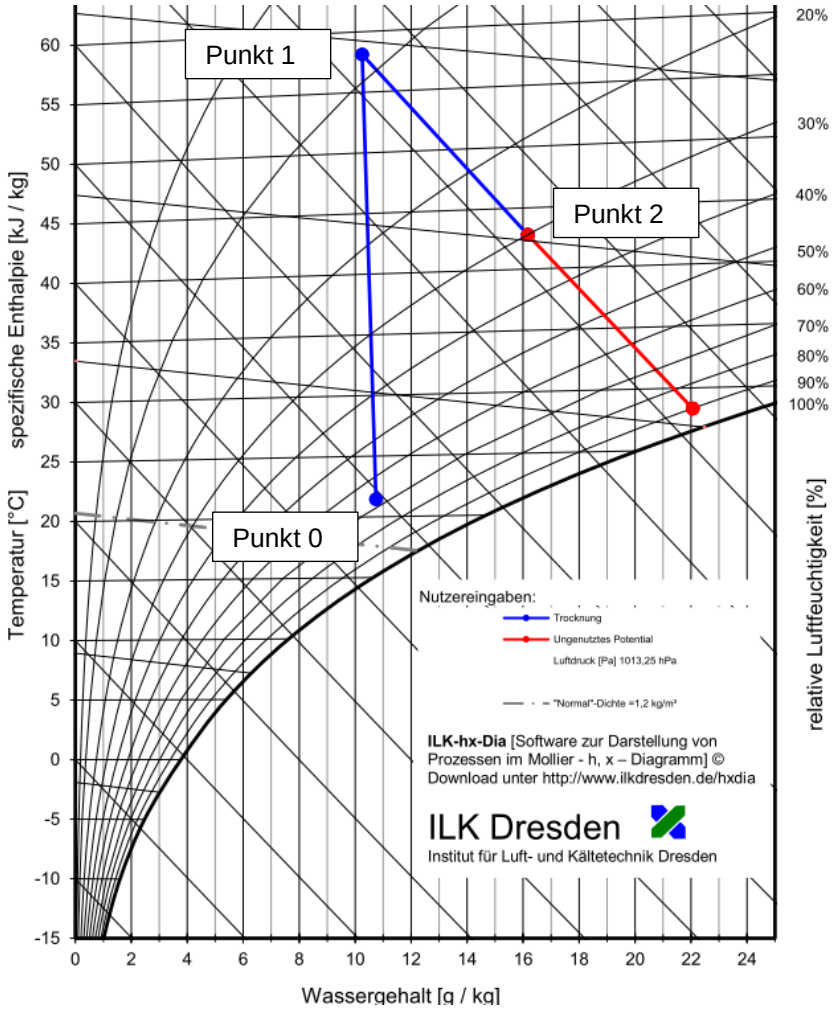


Abbildung 14 Zustände der feuchten Luft im Mollier-Diagramm für die Vermessung einer Trocknungsanlage

Theoretische Betrachtung weiterer Betriebszustände

Da sich die Messung auf einen verhältnismäßig kurzen Zeitraum beschränkte und dadurch nur die Betriebszustände zur gemessenen Jahreszeit beschreibt, werden hier weitere mögliche Betriebszustände beschrieben. Die Umgebungsbedingungen basieren auf Jahresmittelwerten aus (Recknagel et al. 2007). Die Wasserabreicherung im feuchten Gärrest erfolgt isenthalp, der hierbei entstehende Fehler im Vergleich zur Berechnung über die verlängerte Nebelisotherme und der damit verbundene Enthalpiezuwachs der Luft beträgt unter 1 % bezogen auf den Wassergehalt und wird daher vernachlässigt.

Die Umgebungsbedingungen beziehen sich auf den Standort Bremerhaven, hier beträgt die Jahresdurchschnittstemperatur 9 °C und der Wassergehalt 6,2 g/kg (Recknagel et al. 2007). Ausgehend von diesen Daten können drei mögliche Zustände der Trocknungsluft in Punkt 1 betrachtet werden, diese sind ausschließlich durch die Temperatur hinter dem Wärmetauscher bestimmt. Der Wassergehalt ändert sich nicht. Die drei Betriebszustände leiten sich teils aus der Messung her. Diese sind die durchschnittlich erreichte Temperatur von 58 °C und die im fünf Minuten Mittel Maximaltemperatur von 64 °C. Der letzte diskutierte Betriebszustand liegt bei 70 °C und entspricht der luftseitigen Austrittstemperatur aus einem Gegenstrom-Wärmetauscher bei einer Temperaturdifferenz zum Kühlwasserkreislauf des BHKW von 10 K.

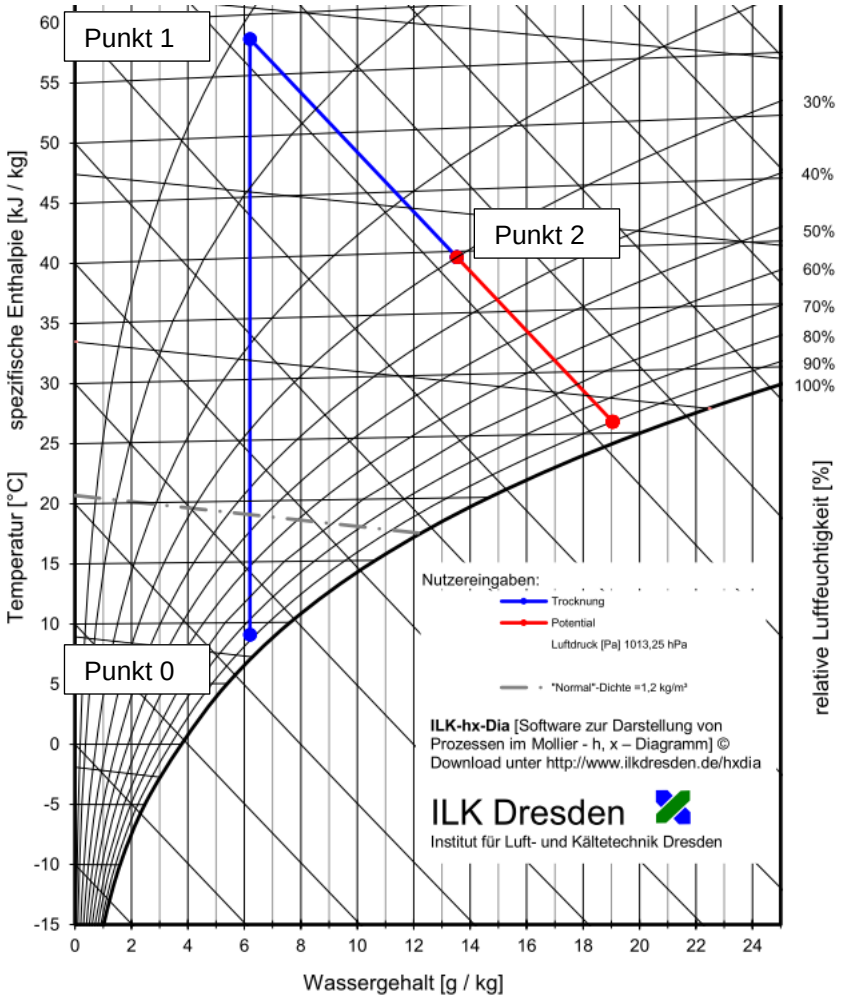


Abbildung 15 Betriebszustand 1: Jahresmittelbedingungen und Trocknungsluft bei 58°C

Um Betriebszustand 1 mit 58 °C in der Trocknungsluft auch bei Jahresdurchschnittsbedingungen erreichen zu können, muss bei gleichbleibender Wärmeleistung in Höhe von 334 kW der Luftmassenstrom auf 24.000 kg/h gesenkt werden. Die Verdampfungsleistung beträgt dann 0,53 bzw. 0,92 L/kWh, bei einer relativen Feuchte der Ausgangsluft von 30 bzw. 90 %. Die thermische Energiekennzahl ergibt sich zu 0,33 bzw. 0,59; Darstellung des Betriebszustandes siehe Abbildung 15.

Der Betriebszustand 2 definiert sich über die Temperatur des Luftstroms hinter dem Wärmetauscher in Höhe von 64 °C. Zum Erreichen dieses Betriebszustandes bedarf es einer weiteren Senkung des Luftdurchsatzes auf 20.000 kg/h bei einer in etwa konstanten Wärmeleistung von 343 kW. Die erreichten Verdunstungsmen-

gen betragen 0,57 bzw. 0,94 L/kWh. Dies entspricht thermischen Energiekennzahlen von 0,36 bis 0,56. Abbildung 16 zeigt die Zustände der feuchten Luft im Mollier-Diagramm.

Damit in Betriebszustand 3 70 °C hinter dem Wärmetauscher erreicht werden können, muss die Eintrittsluftmenge bei einer Wärmeleistung von rund 330 kW auf 19.000 kg/h gesenkt werden. Weiterhin wird bei Nutzung von BHKW-Abwärme aus dem Kühlwasserkreislauf ein Gegenstromwärmetauscher notwendig, damit ein treibendes Temperaturgefälle von 10 K gewährleistet werden kann. Die Eintrittstemperatur des Kühlwassers in den Wärmetauscher muss dann mindestens 80 °C betragen. Die in diesem Betriebszustand erreichbaren Verdunstungsmengen sind bei den relativen Luftfeuchtigkeiten der Austrittsluft in Höhe von 30 und 90 % 0,61 bzw. 0,95 L/kWh. Die daraus resultierende thermische Energiekennzahl liegt bei 0,38 bzw. 0,60. Der Betriebszustand 3 ist in Abbildung 17 dargestellt.

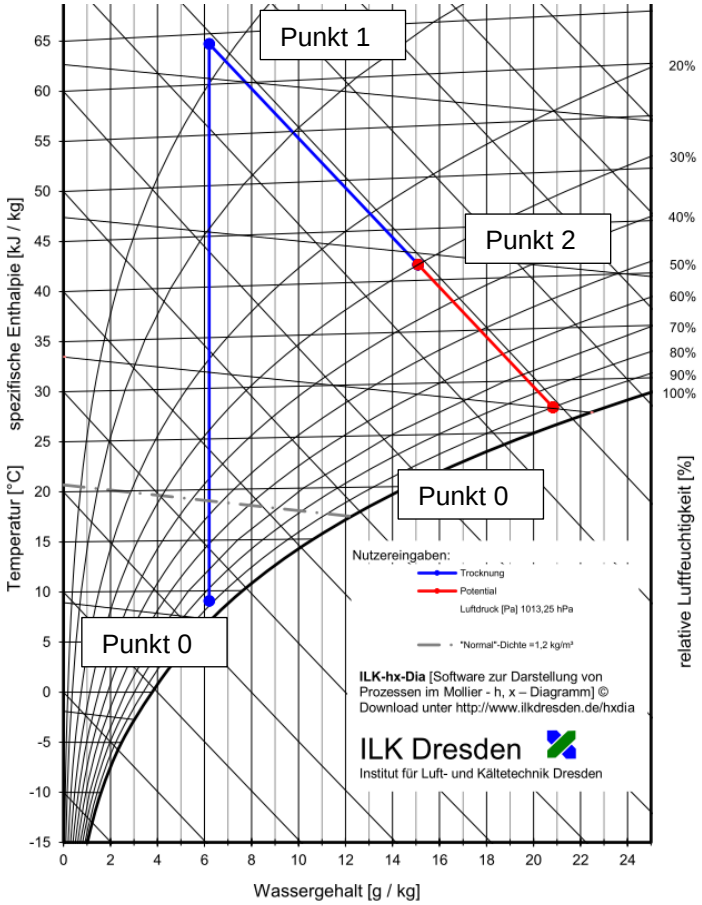


Abbildung 16 Betriebszustand 2: Jahresmittelbedingungen und Trocknungsluft bei 64°C

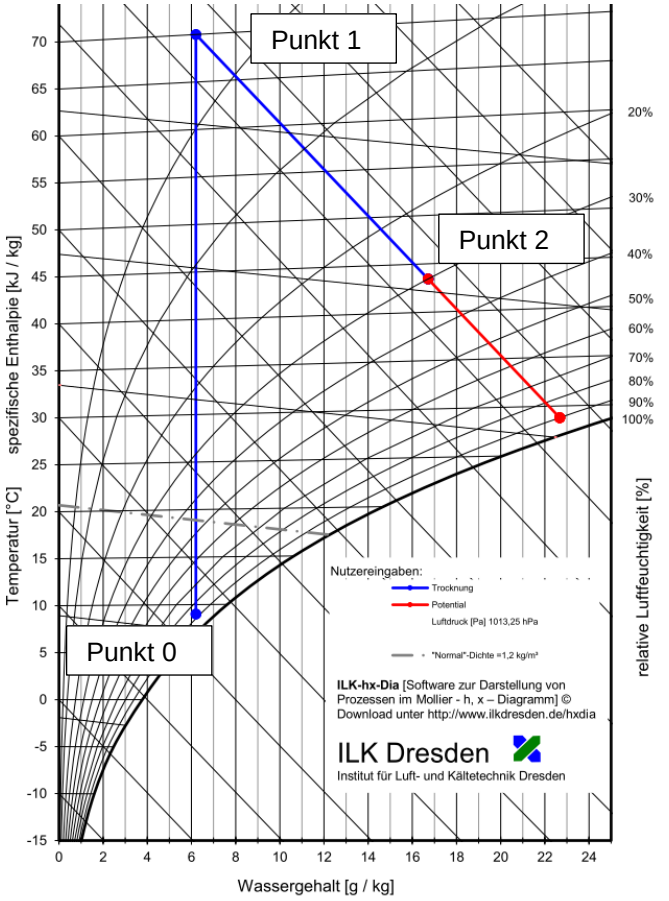


Abbildung 17 Betriebszustand 3: Jahresmittelbedingungen und Trocknungsluft bei 70 °C

Datenvergleich

Beim Vergleich der wärmeenergiespezifischen Verdunstungsleistungen mit Literaturwerten aus (Krischer und Kast 1978) zeigt sich, dass die gemessenen und theoretisch betrachteten Werte innerhalb des hier aufgeführten Wertebereiches liegen. Hier sind Werte für sehr effiziente Trocknungsverfahren zwischen 0,9 und 1,0 Kilogramm verdunstetes Wasser pro Kilowattstunde zu finden. Weiterhin heißt es, dass der Wärmeaufwand durchaus dreimal so groß sein kann wie die eigentlich benötigte Wärmemenge und das nicht ungewöhnlich sei. Dies entspräche einer spezifischen Verdunstungsmenge von rund 0,5 kg/kWh.

Eine andere Betrachtungsweise liefert (Fuchs et al. 2010). Auf Seite 85 wird von einer Kontakttrocknung ausgegangen, sprich das Trocknungsgut wird direkt erhitzt, die Verdunstung erfolgt bei Gutstemperaturen zwischen 65 und 95 °C. Es erfolgt eine Betrachtung der benötigten Wärmemenge zur Erwärmung des Wassers und des enthaltenen Feststoffes, der Verdampfungswärme und der Wärmeverluste des Trockners (siehe Tabelle 8 für Einzelheiten). In Summe werden hier spezifische Verdunstungsmengen von

0,9 und 1,2 L/kWh aufgezeigt, was thermischen Energiekennzahlen zwischen 0,56 und 0,74 entspricht. Diese sind allerdings bei rein konvektiver Trocknung nach eigener Analyse nur schwer zu erreichen.

Tabelle 8 Energiebedarf für die Trocknung nach (Fuchs et al. 2010)

Bedarf	**Energiemenge [kWh/Tonne Wasser verdampft]**
Aufheizen des Wassers	70-95
Aufheizen Feststoff	10-20
Verdampfungsenthalpie	630-650
Verlust Trockner, Energieumwandlung	100-350
Gesamt	850-1.100

Die Ergebnisse der Messung, Berechnungen, Herstellerangabe und Fallstudie sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Die Messung zeigt im Vergleich zu den übrigen Ergebnissen die kleinste Energiekennzahl auf, was hauptsächlich auf die mäßige thermische Verdampfungseffizienz zurückzuführen ist. Allerdings handelte es sich hierbei um eine sehr kompakte Anlage. Die theoretische Betrachtung zeigt auf, dass auch größere Verdunstungseffizienzen, respektive geringere spezifische thermische Energieeinträge, möglich sind. Das Angebot des Herstellers verspricht Werte, die zwischen den in der theoretischen Betrachtung aufgeführten Minimal- und Maximalwerte liegen. Die maximal erreichte relative Luftfeuchte liegt im Fall des Herstellerangebots bei 51 %, die Temperatur der Trocknungsluft hinter dem Wärmetauscher liegt bei 80 °C, was mit reinem BHKW-Kühlwasserabwärme-Betrieb nur schwer zu erreichen ist. Da in der theoretischen Betrachtung der Betriebszustände gezeigt werden konnte, dass die thermische Verdampfungseffizienz von hohen Temperaturen der Trocknungsluft in Punkt 1 und hohen relativen Luftfeuchtigkeiten in Punkt 2 positiv beeinflusst wird, ist im Realbetrieb wahrscheinlich mit einem etwas höheren Energiebedarf zu rechnen. Daher liegt die TU-Fallstudie, die auf der Mittelung verschiedener Herstellerangaben und eigenen Berechnungen bezüglich realistischer Betriebszustände beruht, auch bei geringfügig niedrigeren Werten für die Energiekennzahl. Dass die Energieeinträge bezogen auf den Kubikmeter Rohgärrest hinter der Biogasanlage sich hier gleichen, ist Zufall und mit den Annahmen bezüglich des Abscheidegrades der Pressschnecke zu begründen.

Tabelle 9 Ergebnisse der Messungen, Berechnungen und Herstellerangaben für konvektive Trocknungsverfahren

	Thermischer Energiebedarf		**Elektrischer Energiebedarf**		**Energiekennzahl ε**			**Red. Wasser**
	[kWh/t Gärrest BGA]	**[kWh/t Wasser red.]**	**[kWh/t Gärrest BGA]**	**[kWh/t Wasser red.]**	**th.**	**el.**	**ges.**	**[%]**
Messung	739	1.678	13	24	0,37	5,21	0,36	19%
Betriebszustand 1								
min.	-	1.897	-	-	0,33	-	-	-
max.	-	1.082	-	-	0,58	-	-	-
Betriebszustand 2								
min.	-	1.755	-	-	0,36	-	-	-
max.	-	1.067	-	-	0,59	-	-	-
Betriebszustand 3								
min.	-	1.647	-	-	0,38	-	-	-
max.	-	1.051	-	-	0,60	-	-	-
Herstellerangebot	293	1.191	15	63	0,53	3,50	0,46	25%
Fuchs et al. (2010)	-	962	-	-	0,65	-	-	-
TU Berlin Fallstudie	293	1.290	15	68	0,49	3,23	0,42	23%

Solare Unterstützung

Unter Nutzung eines eigens erstellten Berechnungsprogramms zur Ermittlung des solaren Energieeintrags in ein Glashaus wurde das Wäremeeinsparpotential eines solarunterstützten Trocknungsverfahrens betrachtet. Die hierfür verwendeten Daten basieren auf (Recknagel et al. 2007; VDI 2078), die Dimensionierung ist aus einem Herstellerangebot abgeleitet. Dieses sieht ein doppelt verglastes Glashaus mit den Abmessungen Länge mal Breite mal Höhe von 80x13x4m vor. Die hiermit erreichbare jährliche solare Wärmemenge liegt bei rund 884 MWh am Standort Stötten, was unter Einbeziehung der Verdunstungseffizienzen einer Steigerung der Verdunstungsmenge von 28 % gegenüber einem klassischen Bandtrockner an einer 500 kW_{el} Biogasanlage darstellt. Bezogen auf die installierte Dachfläche des Glashauses kann mit 99 W/m^2 gerechnet werden.

Vakuumverdampfung

Die Vakuumverdampfung macht sich die sinkende Siedetemperatur von Wasser bei Unterdruck zu Nutze. Hierdurch ist es möglich, einen Wärmestrom auf mehreren Temperaturstufen zu nutzen, durch Kondensation wird Wärme in der Stufe mit niedrigerem Druck zurückgewonnen, was eine gesteigerte Wärmeenergieeffizienz zur Folge hat. Im folgenden Text werden die Berechnungsgrundlagen, Messungen und eigenen Berechnungen zur Bewertung dieser Technologie beschrieben.

Berechnungsgrundlagen

Grundlegend für Messung und Berechnung ist die Wärmestromgleichung, mit der die Enthalpie jedes Stoffstroms berechnet wird.

$$\dot{H}_i = \dot{m}_i c_{p,i} \vartheta_i$$

$\dot{H}_i$ steht dabei für den Enthalpiestrom des Stroms i mit dem Massenstrom $\dot{m}_i$ der spezifischen Wärmekapazität $c_{p,i}$ und der Temperatur ϑ_i. Aus der Bilanz um einen Wärmetauscher ergibt sich der übergehende Wärmestrom $\dot{Q}$. Es wird angenommen, dass alle spezifischen Wärmekapazitäten von Flüssigphasen identisch und gleich der von Wasser sind. Weiterhin bleiben Strahlungsverluste vorerst unberücksichtigt.

$$\dot{Q} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 = \dot{m}_1 c_p (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

Mit dem übergehenden Wärmestrom $\dot{Q}$ kann beispielsweise die Ausgangstemperatur ϑ_4 des Stoffstroms auf der anderen Seite berechnet werden.

$$\vartheta_4 = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} c_p} + \vartheta_3$$

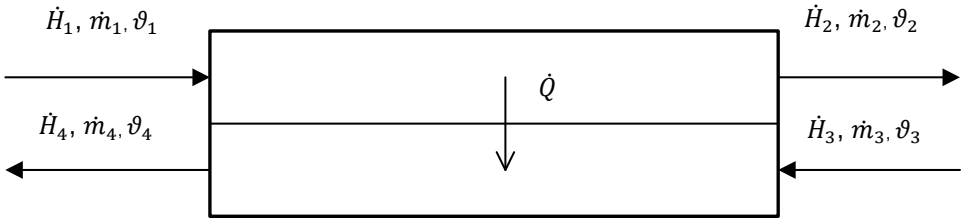


Abbildung 18 Bilanzierung eines Wärmetauschers

Im Falle einer Verdampfung oder Kondensation wird zusätzlich die spezifische Verdampfungsenthalpie von Wasser relevant. Diese ist von der Verdampfungstemperatur ϑ_{LV} abhängig und somit in jeder Druckstufe einer Vakuumverdampfung leicht unterschiedlich. Der mit einer Verdampfung oder Kondensation verbundene Wärmestrom $\dot{Q}_{LV}$ berechnet sich mittels des verdampfenden/kondensierenden Massenstroms $\dot{m}$ und der spezifischen Verdampfungsenthalpie $\Delta h_{LV}(\vartheta_{LV})$.

$$\dot{Q}_{LV} = \dot{m} \Delta h_{LV}(\vartheta_{LV})$$

Da der elektrische Energieverbrauch maßgeblich vom Druckverlust in der Anlage und dieser durch die nicht vorliegende Baugeometrie der einzelnen Vakuumverdampfermodelle bestimmt wird, lässt sich der elektrische Energieverbrauch nicht theoretisch abschätzen, weshalb keine Druckverlustrechnungen durchgeführt

wurden. Allerdings liegen für den Vakuumverdampfer sehr viele Informationen unterschiedlicher Hersteller vor, welche sich mit den Messungen und Betreiberaussagen decken.

Messdaten

Vermessen wurden ein einstufiger und ein zweistufiger Vakuumverdampfer unterschiedlicher Hersteller, jeweils an einer 500 kW_{el} NawaRo-Biogasanlage. Das Vorgehen zur Aufnahme der Messwerte war an beiden Anlagen identisch. Die Bilanzierung der Massenströme erfolgte über das Auslesen der vorhandenen Durchflussmessgeräte kombiniert mit der Auswertung der Probenanalysen. Der Elektrizitätsbedarf wurde mithilfe des fachgebietseigenen induktiven Strommessgeräts am Hauptschaltschrank bestimmt, während der benötigte Wärmestrom am Wärmemengenzähler der Anlage abgelesen wurde. Das Ergebnis dieser Messungen waren die Abscheide- bzw. Rückhaltegrade der Verfahrensschritte sowie die spezifischen Energiebedarfe, wie in Tabelle 10 Zusammenfassung der Messergebisse einer einstufigen Vakuumverfampferanlage undTabelle 11 aufgeführt. Diese zeigen den prozentualen Massenstrom am Ausgang des jeweiligen Verfahrensschritts, aufgeführt ist immer die Flüssigphase, bzw. im Vakuumverdampfer (VV) die prozentuale Menge Wasser, die produziert wurde. Die übrige Menge, die kein Wasser ist, sind die pflanzennährstoffhaltigen Produkte des Verfahrens: abseparierter Feststoff, Ammoniumsulfatlösung (ASL) und ein Konzentrat des Flüssiggärrests.

Eine Ammoniumsulfatlösung wird nicht von allen Vakuumverdampferanlagen hergestellt, die es auf dem Markt gibt. Allerdings erfolgte die Produktion an den beiden vermessenen Vakuumverdampfern. Die Ammoniumsulfatlösung fällt bei der Behandlung des Dampfstroms nach der Verdampfung an. Dieser ist stark ammoniakhaltig, da Ammonium bei erhöhten Temperaturen und niedrigen Drücken aus dem Gärrest ausgetrieben wird. Die Reinigung erfolgt durch einen Schwefelsäurewäscher, in dem die Ammoniumsulfat-lösung im Kreislauf gefahren und mit Schwefelsäure angereichert wird, bevor sie in einem Gegenstrom-wäscher im Wasserdampf verregnet wird. Hat diese Ammoniumsulfatlösung eine bestimmte Beladung erreicht, wird diese ausgeschleust und in den dafür vorgesehenen Lagertank gepumpt. Die gemessenen Ammoniumsulfatkonzentrationen beliefen sich bei der einstufigen Anlage auf 32 bis 35 %, wie vom Hersteller angegeben. Die Probenanalyse der zweistufigen Anlage ergab nur eine 25 %ige Lösung. Grund hierfür ist allerdings die Probenahme, die direkt aus dem ASL-Kreislauf erfolgte, da eine Probenahme aus dem Lagertank nicht möglich war. Prinzipiell ist es also technisch einwandfrei möglich, mit diesem Verfahren eine 35 %ige Ammoniumsulfatlösung herzustellen, weshalb dies auch als Zielgröße für die ASL-Produktion im später beschriebenen Fallbeispiel genutzt wurde.

Tabelle 10 Zusammenfassung der Messergebisse einer einstufigen Vakuumverfampferanlage

		Energiebedarf thermisch		Energiebedarf elektrisch	
	Massen-strom	**[kWh/t Gärrest Ausgang BGA]**	**[kWh/t Wasser Ausgang]**	**[kWh/t Gärrest Ausgang BGA]**	**[kWh/t Wasser Ausgang]**
BGA	100%	0,00	0,00	0,00	0,00
PSS	78%	-	-	0,5	1,1
VV	45%	292	648	6,7	15
	Summe:	292	648	7	16

Tabelle 11 Zusammenfassung der Messergebnisse einer zweistufigen Vakuumverdampferanlage

		Energiebedarf thermisch		Energiebedarf elektrisch	
	Massen-strom	**[kWh/t Gärrest Ausgang BGA]**	**[kWh/t Wasser Ausgang]**	**[kWh/t Gärrest Ausgang BGA]**	**[kWh/t Wasser Ausgang]**
BGA	100%	0,00	0,00	0,00	0,00
PSS	88%	-	-	0,5	1,1
VV	46%	207	449	6,3	13,6
	Summe:	207	449	7	15

Der Trockenstoffgehalt des hergestellten Konzentrats belief sich an beiden Anlagen auf rund 15 %. Höhere Feststoffgehalte sind prinzipiell auch möglich, allerdings sind hiermit Einbußen in der Energieeffizienz einhergehend. Laut Hersteller können Feststoffgehalte von 25 % erreicht werden, damit verbunden sind allerdings größere Druckverluste in den Wärmetauschern aufgrund der höheren Viskosität. Ebenfalls wird der Wärmeübergang negativ beeinflusst, es werden höhere treibende Temperaturdifferenzen in den Wärmetauschern benötigt. Generell ist die höhere Aufkonzentration nur in mehrstufigen Anlagen interessant, da die Wärmemenge eines einstufigen Verdampfersystems in der Regel nicht ausreicht, um den gesamten anfallenden Gärreststrom auf 15 % aufzukonzentrieren. Dies liegt daran, dass Vakuumverdampfer an den Kühlwasserkreislauf des BHKWs angeschlossen werden, der nur einen Teil der gesamten Wärmeleistung aufweist. Abgaswärme wird bei diesem Verfahren nicht genutzt.

Unter der Voraussetzung, dass die BHKW-Abwärme ausreichend ist, kann das vermessene einstufige Verfahren 45 % des gesamt anfallen Gärrests reduzieren. Bei einer jährlichen Gärrestmenge von 10.715 t und einer Betriebsstundenzahl von 8.000 h müssen hierfür 452 kW thermische Leistung bereitgestellt werden. Das zweistufige Verfahren benötigt für die Reduktion des Gesamtgärrets um 46 % nur 291 kW thermischer Leistung.

Weiterhin ging aus den Probenanalysen hervor, dass die Gesamtmenge Ammonium im Konzentrat gegenüber der im Verdampfer-Eingang um 71 % in dem einstufigen und 93 % in dem zweistufigen Verfahren reduziert werden konnte.

Theoretische Betrachtung

Die theoretische Betrachtung der Vakuumverdampfer beleuchtet den Wärmeenergiebedarf am Beispiel realer Verfahren. Der elektrische Energiebedarf wird in diesem Abschnitt nicht berücksichtigt, da dieser von den anlageninternen Druckverlusten, somit von der Baugeometrie, und der Leistung der Vakuumpumpen abhängt. Da die detaillierte Konstruktion der Vakuumverdampfer unbekannt ist, war eine Druckverlustberechnung nicht möglich. Die Leistung der Vakuumpumpe ist abhängig von dem benötigten Unterdruck und der Menge nicht kondensierender Gase im Gärrest. Daher kann festgehalten werden, dass mit sinkenden Verdampfungstemperaturen mit steigendem Stromverbrauch zu rechnen ist. Ebenso ist ein steigender Elektrizitätsbedarf bei einer höheren Anzahl von Verdampferstufen zu erwarten.

Abbildung 19 zeigt am Beispiel einer vereinfachten dreistufigen Verdampferanlage, an welchen Stellen Wärmeenergie zurückgewonnen wird. BHKW-Abwärme sorgt in der ersten Stufe für die Erhitzung des Gärrests auf Verdampfungstemperatur und für die Verdampfung eines Teils des Wassers. Die Kondensation des Dampfstroms aus Stufe 1 stellt in der nächsten Stufe die Verdampfungswärme bereit. Unter wärmeverlustfreien Bedingungen hat dies eine einheitliche Verdampfungsleistung der einzelnen Verdampfungsstufen zur Folge. Aus dem Kondensatstrom kann Wärme für die Erhitzung des eingehenden Gärrests zurückgewonnen werden, bis dieser auf eine Temperatur abgekühlt ist, die um die im Wärmetauscher minimal erreichbare Temperaturdifferenz zwischen warmem und kaltem Strom höher liegt als die des eingehenden Gärrests. Letztere Verschaltung ist der Übersichtlichkeit halber in Abbildung 19 nicht dargestellt. Ebenso wurde auf die Darstellung von Brüdenwäschern verzichtet, da diese in die theoretische Wärmebedarfsrechnung nicht einflossen.

Die Verschaltung der Modellanlage ist konzentratgestuft, unter der Voraussetzung, dass mehr als eine Verdampfungsstufe betrachtet wurde. Im Falle des in Abbildung 19 dargestellten Prozesses bedeutet dies, dass der Gärrest zunächst auf das Temperaturniveau in Stufe 1 erwärmt und dort ein Teil des Wassers verdampft wird. Im Anschluss fließt der teilaufkonzentrierte Gärrest in die nächste Stufe. Das Temperaturniveau ist hier geringer, weshalb die im Konzentrat der Stufe 1 gespeicherte Wärmeenergie $Q = m_{\text{Konzentrat Stufe 1}} * c_p * (\vartheta_{\text{Stufe 1}} - \vartheta_{\text{Stufe 2}})$ zurückgewonnen wird und in der folgenden Stufe zur Verfügung steht.

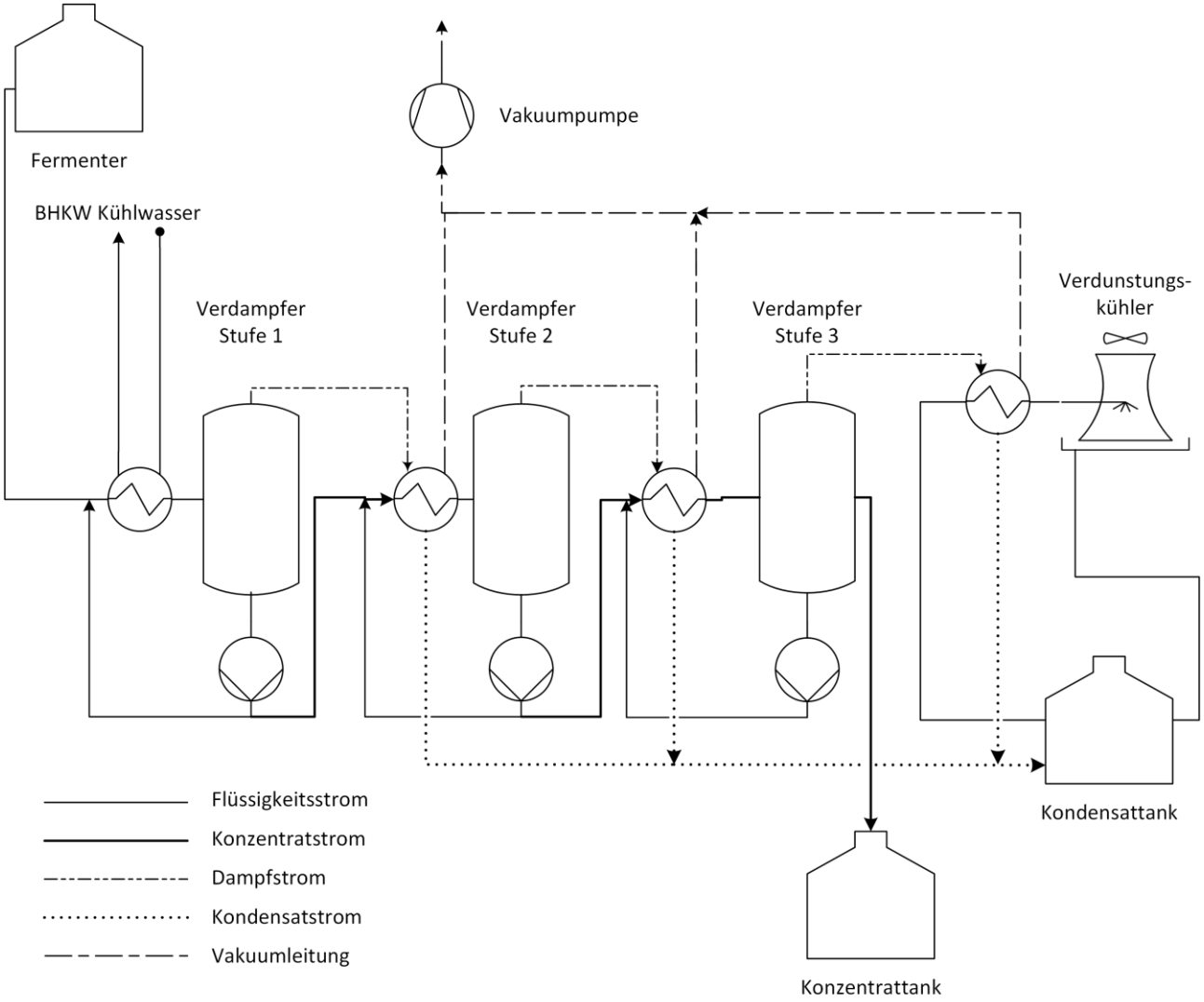


Abbildung 19 Fließschema eines dreistufigen Vakuumverdampfers als Beispiel für die theoretische Berechnung des Wärmebedarfs von Vakuumverdampfern

Da das Konzentrat der letzten Stufe einen verhältnismäßig hohen Feststoffgehalt aufweist, zähflüssiger ist und damit sehr zu Verkrustung neigt, wird zumeist auf eine Wärmerückgewinnung aus dem Konzentrat mittels Wärmetauscher verzichtet. Um die Kondensationswärme der letzten Verdampfungsstufe abzuführen, wird an Vakuumverdampfern in der Regel auf einen Verdunstungskühler zurückgegriffen. In diesem wird je nach Anlagentyp ein Teil oder der gesamte Kondensatstrom in die Umgebung verdunstet. Die hierfür benötigte Verdunstungswärme, wird aus dem Kondensator der letzten Verdampferstufe gewonnen. Bis zu zweistufigen Anlagen ist es laut Hersteller möglich, den gesamten Kondensatstrom so zu verdunsten und damit auf eine Einleitung des Wassers zu verzichten.

In der Realität existieren diverse Verschaltungsmöglichkeiten, nicht alle Vakuumverdampfer werden auf dieselbe Art betrieben. So existieren beispielsweise auch Kreuzstrom- und Gegenstromverdampfer bei denen entweder keine Konzentratstufung erfolgt oder der Gärreststrom entgegen dem Wärmestrom geführt wird. Daher erfolgt zunächst eine Betrachtung des Verdampfungspotentials anhand des Modellverfahrens, im Anschluss werden Anpassungen vorgenommen, die die Modelle der Realität näherbringen. Allgemeine Annahmen der Berechnung sind in den Tabelle 12 und 9 aufgeführt.

Tabelle 14 führt die Ergebnisse der Berechnungen auf. Dabei wird auf die Kenngrößen spezifischer Wärmebedarf für die Verdampfung eines Kilogramm Wassers und die thermische Energiekennzahl eingegangen. Weiterhin führt die Tabelle die benötigten thermischen Leistungen auf, die das entsprechende Verfahren benötigt, wenn an einer 500 bzw. 2.000 kW_{el} NawaRo-Biogasanlage der anfallende Gärrest aufbereitet werden soll. Die Gärrestmengen entsprechen dabei denen in den Fallbeispielen. Unter *vollständige Wärmerückgewinnung* wurde der Wärmebedarf am Beispiel der betrachteten Modellverdampfung ermittelt. Hier werden alle Wärmeströme bis auf den des Konzentratstroms der letzten Stufe unter Berücksichtigung der minimal erreichbaren Temperaturdifferenz im Wärmetauscher von 10 K zurückgewonnen. Strahlungsverluste bleiben unberücksichtigt.

Tabelle 12 Temperaturen und Dampfdrücke des theoretischen Vakuumverdampfungsverfahrens unter Betrachtung von bis zu fünf Stufen

	Referenz	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Verdampfungstemp. [°C]	100	75	65	55	45	35
Dampfdruck [bar]	1,013	0,386	0,250	0,158	0,096	0,056
Verdampfungswärme [kWh/kg]	0,627	0,645	0,652	0,658	0,665	0,672

Tabelle 13 Annahmen und Bedingungen für die Berechnung des Vakuumverdampferverfahrens

Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
t_a	8000	h/a	Betriebsstunden
Gärrest			
ϑ_{GR}	25	°C	Temperatur d. Gärrests
$m_{PSS, L}$	91	%	Flüssig nach Pressschnecke bezogen auf Gesamtgärrest
$m_{VV, K}$	39	%	Konzentrat nach Verdampfer bezogen auf Gesamtgärrest
$m_{VV, W}$	50	%	Wasser nach Verdampfer bezogen auf Gesamtgärrest
Wärmetauscher			
$\Delta T_{min.}$	10	K	Minimale Temperaturdifferenz

Tabelle 14 Ergebnisse der Wärmebedarfsrechnung an den Modell-Vakuumverdampfungsverfahren

Verdampferstufen-Anzahl	**Spezifische Wärme**	**Energiekennzahl**	**Theoretische Wärmeleistung für die Aufbereitung an einer**	
	q_s [kWh/kg$_{H2O}$]	**ε_{th}**	**500kW BGA $\dot{Q}_{500}$ [kW]**	**2000kW BGA $\dot{Q}_{2000}$ [kW]**
Vollständige Wärmerückgewinnung				
Stufe 1	0,705	0,89	469	1.874
Stufe 2	0,375	1,67	249	996
Stufe 3	0,244	2,57	162	648
Stufe 4	0,176	3,56	117	467
Selektive Wärmerückgewinnung				
Stufe 1	0,705	0,89	469	1.874
Stufe 2	0,390	1,61	259	1.038
Stufe 3	0,273	2,30	181	726
Stufe 4	0,227	2,76	151	604

Da die Werte unter *vollständige Wärmerückgewinnung* die realen Wärmebedarfswerte noch stark unterschätzen, wurden Anpassungen im Modell-Verfahren vorgenommen, um diese besser mit den Herstellerangeboten und Messungen vergleichen zu können. Unter *selektive Wärmerückgewinnung* stehen die Berechnungsergebnisse, die sich durch Nichtnutzung einzelner Wärmeströme ergeben; einzige Ausnahme stellt das einstufige Verfahren dar, weil hier Modellbedingt bereits die geringste Wärmerekuperation stattfindet. Im zwei- und dreistufigen Verfahren wurde auf die Wärmerückgewinnung aus den Konzensatströmen verzich-

tet, da es sich bei den betrachteten Anlagen nicht um konzentratgestufte Verfahren handelte. Dagegen verzichtet die vierstufige Verdampferanlage auf die Wärmerückgewinnung aus den Kondensatströmen. Unter diesen Annahmen lassen sich die in den Messungen und Herstellerangeboten betrachteten Verfahren mit den berechneten Werten gut vergleichen. Die dabei auftretenden Differenzen lassen auf Strahlungsverluste der Anlagen und Spielräume der Hersteller bei der Angebotserstellung schließen. Die Abweichungen zwischen theoretischer Betrachtung und Herstellerangeboten bzw. Messungen belaufen sich auf 1 bis 18 %. Ein Vergleich aller Ergebnisse ist in Tabelle 16 möglich.

Fallstudie

Die aus Messungen und Probenahmen gewonnenen Abscheidegrade sowie die in Messungen bestätigten, gemittelten Herstellerangaben bezüglich Wärme- und Strombedarf flossen in die Berechnungen für die Fallstudie ein. Die Aneinanderreihung der Prozessschritte Pressschnecke und Vakuumverdampfer mit Brüdenwäscher zur ASL-Produktion ergab eine Reduktion des gesamten Gärrestaufkommens um 50 %. Die reduzierte Wassermenge ist somit bei allen betrachteten Verdampfer-Verfahren gleich, die dafür benötigten Wärme- und Strommengen unterscheiden sich jedoch. Siehe hierzu auch Tabelle 16. Gegenübergestellt wurden ein einstufiges, ein zwei- und ein vierstufiges Verfahren und die Ergebnisse in Tabelle 15 zusammengefasst. Die pro Kubikmeter benötigte Wärmemenge reduziert sich erwartungsgemäß mit jeder zusätzlichen Verdampfungsstufe. Dem gegenüber steht der nicht lineare Verlauf des spezifischen elektrischen Energiebedarfs. Dieser ist im zweistufigen Verfahren am geringsten und erhöht sich wieder bei der Installation zusätzlicher Verdampferstufen, was auf den steigenden Druckverlust in der Anlage und die geringeren Verdampfungstemperaturen und damit niedrigeren Drücke zurückzuführen ist.

Weiterhin ergab sich bei einem Ammonium-Strippgrad von 78 % eine ASL-Produktion in Höhe von 4,2 % bezogen auf das Gesamtgärrestaufkommen. Der hierfür benötigte Schwefelsäurebedarf liegt bei 1,2 % des gesamten Gärrestaufkommens.

Tabelle 15 In der Fallstudie der TU Berlin ermittelte Energiebedarfe und Stoffstromaufteilung für den Modellgärrest

		Energiebedarf thermisch		**Energiebedarf elektrisch**	
	Massenstrom	**[kWh/t Gärrest Ausgang BGA]**	**[kWh/t Wasser Ausgang]**	**[kWh/t Gärrest Ausgang BGA]**	**[kWh/t Wasser Ausgang]**
1-Stufig					
BGA	100%	0,00	0,00	0,00	0,00
PSS	91%	-	-	0,5	1,0
VV	50%	335	675	10	22
	Summe:	*335*	*675*	*11*	*23*
2-Stufig					
BGA	100%	0,00	0,00	0,00	0,00
PSS	91%	-	-	0,5	1,0
VV	50%	214	432	7	14
	Summe:	*214*	*432*	*7*	*15*
4-Stufig					
BGA	100%	0,00	0,00	0,00	0,00
PSS	91%	-	-	0,5	1,0
VV	50%	127	257	9	19
	Summe:	*127*	*257*	*9*	*20*

Datenvergleich

Tabelle 16 fasst alle wichtigen Daten des Kapitels Vakuumverdampfer zusammen. Aufgeführt sind die ausgewerteten Ergebnisse der Messungen, Angebote, Berechnungen und Fallstudien. Diesen werden die Werte für den spezifischen thermischen und elektrischen Energiebedarf zugeordnet. Einmal bezieht sich die benötigte Energie auf die Gärrestmenge am Ausgang der Biogasanlage, einmal auf die Menge entzogenen Wassers. Letzterer wird für Vergleiche als maßgeblich angesehen, da dieser aussagt, welcher Nutzen für welchen Aufwand erreicht wird. Die Energiekennzahl schließt sowohl den thermischen als auch den elektrischen spezifischen Energiebedarf ein und schafft somit eine Vergleichbarkeit, auch mit anderen Verfahren. Die letzten beiden Spalten geben an wie viel Wasser prozentual vom Gesamtgärrestaufkommen entzogen wurde und welche thermische Leistung dafür benötigt wird. Diese spezifische Wärmeleistung bezieht sich auf die installierte elektrische Leistung eines BHKW, das an einer NawaRo-Anlage betrieben wird, die eine den Fallbeispielen entsprechende Gärrestmenge produziert.

Werden die Energieeinträge pro entfernter Tonne Wasser miteinander verglichen, fällt auf, dass die gemessenen Werte für den thermischen Energiebedarf über denen der Angebote und der theoretischen Betrachtung liegen. Die Abweichungen belaufen sich auf 6 bzw. 17 %, die die berechneten Werte unter den gemessenen liegen. Hierzu muss berücksichtigt werden, dass die Berechnung keine Strahlungsverluste an die Umgebung berücksichtigt. Weiterhin ist anzumerken, dass der Anlagenbetrieb auch von örtlichen Gegebenheiten sowie dem bei der Messung vorherrschenden Betriebszustand abhängig ist. So ist die Vermessung ein Beweis dafür, dass die Energiebedarfe in der Gärrestaufbereitung großen Schwankungen unterliegen können. Technisch sind jedoch auch die in den Angeboten vorgelegten Verbrauchswerte durchaus erreichbar, wie die theoretische Betrachtung zeigt. Insgesamt erreichen Vakuumverdampfer-verfahren bereits bei zweistufigen Anlagen thermische Energiekennzahlen größer eins, was bedeutet, dass sie eine höhere Effizienz als das Referenzverfahren aufweisen; das vierstufige Verfahren erreicht sogar einen Wert über zwei. In der Gesamtwertung der Energiekennzahl reduzieren sich die Werte jedoch, aufgrund des hohen Strombedarfs.

Tabelle 16 Ergebnisse der Messungen, Berechnungen und Herstellerangaben für Vakuumverdampfer; die spezifische Wärmeleistung bezieht sich auf die installierte elektrische Leistung an einer NawaRo-Biogasanlage und ist die Wärmeleistung, die bereitgestellt werden muss, um den dort anfallenden Gärrest aufzubereiten.

	Thermischer Energiebedarf		**Elektrischer Energieeintrag**		**Energiekennzahl ε**			**Red. Wasser**	**Spezifische Wärmeleistung**
	[kWh/t Gärrest BGA]	**[kWh/t Wasser red.]**	**[kWh/t Gärrest BGA]**	**[kWh/t Wasser red.]**	**th.**	**el.**	**ges.**	**[%]**	$\dot{Q}\left[\frac{kW_{th}}{kW_{el}}\right]$
Messung									
1-Stufig	375	750	9	17	0,84	12,7	0,78	41%	0,90
2-Stufig	236	471	7	14	1,33	15,4	1,22	46%	0,58
Angebote									
1-Stufig	413	714	13	22	0,88	10,1	0,81	58%	1,10
2-Stufig	318	414	10	12	1,51	17,7	1,39	77%	0,85
4-Stufig	217	267	15	18	2,35	12,1	1,97	81%	0,58
Berechnung, selektive Wärmerückgewinnung									
1-Stufig	350	705	-	-	0,89	-	-	50%	0,94
2-Stufig	194	390	-	-	1,54	-	-	50%	0,52
3-Stufig	135	273	-	-	2,03	-	-	50%	0,36
4-Stufig	113	227	-	-	2,42	-	-	50%	0,30
Fallstudie									
1-Stufig	367	739	11	23	0,85	9,4	0,78	50%	0,98
2-Stufig	235	473	7	16	1,32	14,1	1,21	50%	0,63
4-Stufig	139	267	9	20	2,23	10,9	1,85	50%	0,35

Strippung

Die Gärreststrippung hat zum Ziel die Stickstofffracht im Gärrest und auch im Biogasfermenter selbst zu reduzieren. Sie ist daher nicht nur als reines Gärrestaufbereitungsverfahren zu verstehen, sondern auch als Begleitverfahren für die Fermentation, um Substrate mit hohem Ammoniumbildungspotential nutzen zu können. Die Funktionsweise ist der Vakuumverdampfung sehr ähnlich, bei leichtem Unterdruck und Temperaturen um 80 °C wird Ammoniak ausgetrieben und in einem Wäscher zu Ammoniumsulfat gebunden (Spindler et al. 2012). Da kein oder nur wenig Wasser entfernt wird, bedarf dieses Verfahren weniger Wärme als ein Vakuumverdampfer und kann daher größere Mengen behandeln und gezielt Stickstoff in eine transportwürdige Phase bringen. Alle Berechnungen, Fallbeispiele etc. basieren darauf, dass ausschließlich der überschüssige Gärrest an der Biogasanlage behandelt wird. Für eine Strippung, die auch im Fermenter den Ammoniumgehalt senkt, bedarf es einer separaten Auslegung, die abhängig vom Substrateinsatz an der Biogasanlage den Entfrachtungsbedarf ermittelt.

Berechnungsgrundlagen

Da bei der Strippung genau wie bei der Vakuumverdampfung der Wärmebedarf von der zu erwärmenden und der verdampften Menge Gärrest abhängt, werden hierfür dieselben Formeln verwendet, wie bei der Vakuumverdampfung. Da keine Details über die konstruktive Umsetzung bekannt sind, wird auch in diesem Fall von einer Druckverlust- und damit Elektrizitätbedarfsrechnung abgesehen.

Messdaten

Für die Vermessung einer großtechnischen Ammonium-Strippanlage wurden die folgenden Stoffströme beprobt: Rohgärrest nach der Biogasanlage, Feststoffphase und Flüssigphase nach der Pressschnecke, stickstoffreduzierter Gärrest nach der Strippung und Ammoniumsulfatlösung. Zur Veranschaulichung der Probenahmestellen kann Abbildung 10 herangezogen werden. In Kombination mit den aus der Anlagensteuerung gewonnenen Massen- und Wärmeströmen erfolgte die Bilanzierung der Anlage. Spezifische Energiebedarfe wurden auf Grundlage der Bilanzierung und Auswertung der Probenanalysen ermittelt. Tabelle 17 zeigt die Ergebnisse der Gärreststromaufteilung und der Analyse der spezifischen Energiebedarfe. Obwohl es sich bei der Strippung nicht um ein aufkonzentrierendes Verfahren handelt, sind hier auch die Werte für die Verdampfungsenergie einer Tonne Wasser angegeben. Damit ist die Effizienz dieses Verfahrens leichter vergleichbar mit der eines einstufigen Vakuumverdampfers. Da in dem Strippverfahren jedoch wesentlich weniger Volumenreduktion stattfindet als bei der Vakuumverdampfung, ist der spezifische Energiebedarf pro Tonne Rohgärrest sehr viel geringer. Zum Vergleich mit den Ergebnissen aus der Berechnung und den Herstellerangaben wird auf Tabelle 24 verwiesen.

Da die Gärreststrippung die Ammoniumreduktion im Gärrest zum Ziel hat, ist die Betrachtung der Stoffströme, insbesondere der des Stickstoffs von zentraler Bedeutung. Diesbezüglich wurden die beiden Parameter *Gesamtstickstoff* und *Ammoniumstickstoff* über die Strippanlage bilanziert. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 18.

Hier konnte ein Strippgrad von Ammoniumstickstoff in Höhe von 70 % gemessen werden, was nicht ganz der Herstellerangabe von 80 % entspricht. Allerdings basiert diese Messung auf einer Stichprobe, eine Langzeitbetrachtung hätte eine regelmäßige Probenahme erfordert und war im Rahmen des Projektes nicht durchführbar.

Die Bilanz des Gesamtstickstoffs ist in Tabelle 18 ebenfalls aufgeführt. Hiervon wird nur der leicht flüchtige Teil des Stickstoffs ausgetrieben, was hauptsächlich Ammonium entspricht. Organisch gebundener Stickstoff kann in den meisten Fällen nicht ausgestrippt werden, da er partikulär oder gut gelöst vorliegt. Der Strippgrad des Gesamtstickstoffs bzw. der Ammoniumanteil kann daher auch ein Zeichen für die Effizienz der vorangegangenen Fermentation sein, da durch den Abbau der Organik aus organischem Stickstoff Ammoniumstickstoff gebildet wird. Dass sich die Bilanz des Gesamtstickstoffs nicht zu 100 % ergibt, wie es bei Ammoniumstickstoff der Fall ist, liegt an Messungenauigkeiten in der Probenanalyse und der Bestimmung der Massenströme.

Tabelle 17 Wärmebedafsmessung an einer Strippanlage, auch wenn dieses Verfahren nicht zur Aufkonzentration gedacht ist, wird hier der spezifische Energiebedarf bezogen auf die verdampfte Tonne Wasser präsentiert, um Vergleichbarkeit zu schaffen

		Energiebedarf thermisch		Energiebedarf elektrisch	
	Massen-strom	**[kWh/t Gärrest Ausgang BGA]**	**[kWh/t Wasser Ausgang]**	**[kWh/t Gärrest Ausgang BGA]**	**[kWh/t Wasser Ausgang]**
BGA	100%	0,00	0,00	0,00	0,00
PSS	95%	-	-	0,5	7,8
Strippung	6%	81	1.263	5,6	87
	Summe:	81	1.263	6	95

Tabelle 18 Stickstoffbilanz der vermessenen Strippanlage

	Eingang	**N-Red. Gärrest**	**ASL**
N-Ges	100%	59%	37%
NH4-N	100%	30%	70%
NH4-N/N-Ges	52%	89%	86%

Theoretische Betrachtung

Für die theoretische Wärmebedarfsrechnung des Strippverfahrens, wurde das Berechnungsmodell der Vakuumverdampfung herangezogen und leicht modifiziert. Abbildung 20 stellt das Fließschema des Strippverfahrens grafisch dar. Die Strippung ist parallel zu dem Fermenter geschaltet, auf den Separationsschritt vor der Strippung wurde hier verzichtet. In Wärmetauscher WT 1 wird das Substrat von 45 °C Fermentertemperatur auf die Betriebstemperatur von 80 °C erhitzt und durch den Umwälzkreislauf dort gehalten. In der Strippkolonne erfolgt die Verdampfung von Wasser und Ammoniak, ein Teil der Verdampfungsenergie kann in Wärmetauscher WT 2 rückgewonnen werden. Das Strippgas gelangt anschließend in den Wäscher, in dem der Ammoniak als Ammoniumsulfat mittels Schwefelsäure oder REA-Gips gebunden wird. Das stickstoffreduzierte Substrat gelangt durch Wärmetauscher WT 3 zurück in den Fermenter oder wird in das Gärrestlager gepumpt. In WT 3 kann ein Teil der zum Aufwärmen benötigten Energie rekuperiert werden. Sollte dies nicht geschehen, dient das in den Fermenter zurückgepumpte Substrat als Fermenterheizung, eine Rekuperation an der Stelle ist daher nicht immer sinnvoll.

In den beiden aus der Vakuumverdampfung bekannten Berechnungsmodellen wird daher zunächst eine Variante behandelt, die möglichst alle Wärmeströme rückgewinnt, um ein theoretisches Optimum aufzuzeigen, und eine, die die im realen Prozess vorgesehenen Wärmeauskopplungen nutzt. Zusätzlich wird noch eine Wärmebedarfsrechnung ohne Wärmerückgewinnung durchgeführt.

Tabelle 19 Randbedingungen für die theoretische Wärmebedarfsermittlung des Ammonium-Strippverfahrens

Symbol	**Wert**	**Einheit**	**Bemerkung**
t_a	8000	h/a	Betriebsstunden pro Jahr
Gärrest			
ϑ_{GR}	45	°C	Temperatur d. Substrats
$m_{PSS, L}$	91	%	Flüssig nach Pressschnecke bezogen auf Gesamtgärrest
$m_{S, N\text{-}Red.}$	86	%	N-Reduziertes Substrat nach Strippung bezogen auf Gesamtgärrest
$m_{S, W}$	5,5	%	Wasserreduktion bezogen auf Gesamtgärrest
Wärmetauscher			
$\Delta T_{min.}$	10	K	Minimale Temperaturdifferenz

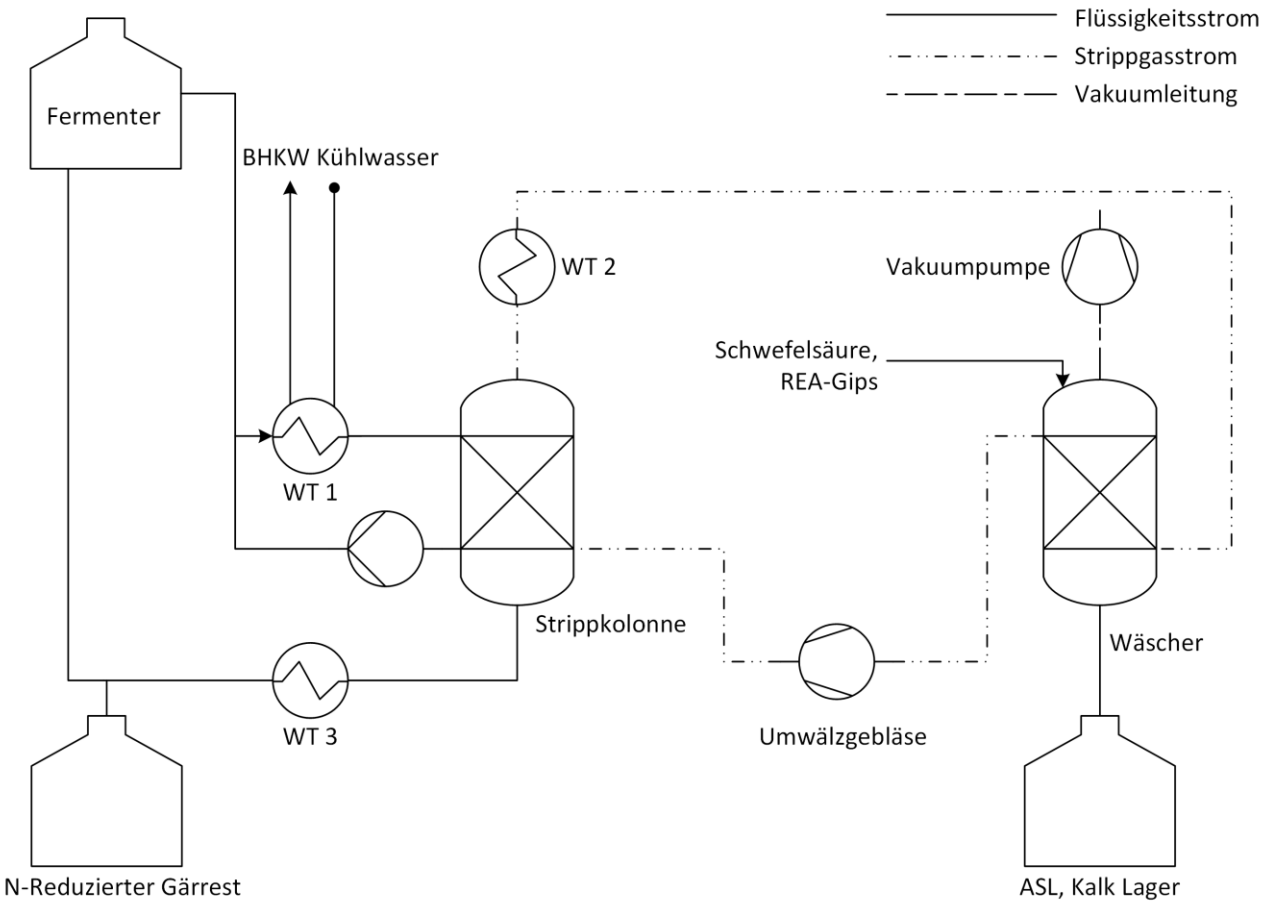


Abbildung 20 Fließschema eines Ammoniumstripp-Prozesses zur Veranschaulichung der theoretischen Betrachtung

Die *vollständige Wärmerückgewinnung* nutzt dabei alle Wärmeströme aus dem WT 2: Kondensation und Abkühlung auf 10 K über Substrateingangstemperatur sowie WT3: Abkühlung des N-reduzierten Substrates auf zehn Kelvin über Substrateingangstemperatur. Das zweite Szenario *selektive Wärmerückgewinnung* koppelt nur die Kondensationswärme aus WT 2 aus. Tabelle 19 zeigt alle Randbedingungen für die Berechnung.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 20 gezeigt. Aufgeführt sind hier die spezifischen Wärmen, einmal in Bezug auf den Gärresteingang und einmal auf das verdampfte Wasser. Weiterhin aufgeführt sind die thermische Energiekennzahl und die erwarteten Wärmeleistungen, die für die Gärrestbehandlung an einer 500 kW_{el} und an einer 2 MW_{el} NawaRo-Biogasanlage benötigt werden. Beim Vergleich der einzelnen Szenarien fällt auf, dass die vollständige Wärmerückgewinnung erwartungsgemäß einen sehr niedrigen Wärmebedarf hat, der spezifische Wert für die Wasserverdampfung liegt sogar unter dem eines vierstufigen Vakuumverdampferverfahrens, was unrealistisch ist. Eine selektive Wärmerückgewinnung führt ebenfalls nicht zu Ergebnissen, die mit der Messung vergleichbar sind. Allerdings erscheinen diese bei einem Vergleich mit einem einstufigen Vakuumverdampfer, dem die Strippung am ähnlichsten ist, realistisch. Insbesondere dann, wenn davon ausgegangen wird, dass zusätzlich 15 % Strahlungsverluste auftreten. Das Szenario ohne Wärmerückgewinnung ist mit den Daten aus der Messung vergleichbar. Die Messwerte liegen nur geringfügig über den theoretisch ermittelten. Nicht einbezogen ist hierbei, dass aufgrund der Substratrückführung rund 34 kW Fermenterheizung eingespart werden können. Für den direkten Vergleich zwischen Messwerten, Berechnung und Herstellerangabe wird auf Tabelle 24 verwiesen.

Die Aufteilung der Wärmeströme in Aufheizleistung, Verdampfungsleistung und die Rückgewinnungsmöglichkeiten sind in Tabelle 21 zu sehen. Es lässt sich erkennen, dass der Aufwand für die Erwärmung des Substrats nur geringfügig höher ist, als das Verdampfen der verhältnismäßig geringen Menge Wasser. Dies ist auch der Grund, warum die Definition der Energiekennzahl für die Strippung einen Sonderfall darstellt. Eine Nutzung der Wärme aus dem Kondensatstrom erscheint nicht sinnvoll, ebenso die Wärme aus dem Stickstoff reduzierten Substratstrom, wenn dieser die Fermenter direkt beheizt. Die sinnvollste Wärmeauskopplung besteht in der Kondensation des Dampfstroms, da dieser das größte Potential aufweist.

Tabelle 20 Ergebnisse der Wärmebedarfsrechnung eines Ammoniumstripp-Verfahrens

Szenario	Spezifische Wärme q_s [kWh/kg GR]	q_s [kWh/kg]	Energie-kennzahl ε_{th}	Theoretische Wärmeleistung für die Aufbereitung an einer 500kW BGA $\dot{Q}_{500}$ [kW]	2000kW BGA $\dot{Q}_{2000}$ [kW]
Vollständige Wärme-rückgewinnung	0,012	0,194	6,73	14	57
Selektive Wärmerück-gewinnung	0,041	0,680	1,92	50	200
Keine Wärmerückge-winnung	0,079	1,321	1,00	97	388

Tabelle 21 Aufteilung der Wärmeströme in der Berechnung

Wärmestrom	Q [%]	Beschreibung
Erwärmung	51	Substraterwärmung auf Prozesstemperatur
Verdampfung / Kondensation	49	Verdampfung und Kondensation haben dasselbe Potential
Kondensatwärme	2	Nutzbare Wärme im Kondensatstrom
N-Red. Wärme	35	Nutzbare Wärme im N-reduzierten Strom

Fallstudie

Das Ammoniumstripp-Verfahren wurde aus den Abscheidegraden und Rückhaltegraden aus den Messungen zusammengebaut und modelliert. Der Rohgärrest wird in einer Pressschnecke von groben Faserstoffen befreit und gelangt danach in die Strippung in der der Ammoniumgehalt reduziert wird. Der Strippgrad entspricht dem aus der Messung erhaltenen und beträgt 70 %, die Ammoniumsulfatlösung wurde in diesem Fall auf 30 % festgelegt. Das entspricht einem Kompromiss aus den Messwerten in der Strippanlage und den erreichten Werten bei der Vakuumverdampfung, was aufgrund der Prozessähnlichkeit gerechtfertigt ist.

Die höhere ASL-Konzentration setzt eine geringere Verdampfungsmenge voraus, da im Strippprozess keine Kondensatausschleusung vorgesehen ist. Dies wiederum führt unter der Annahme, dass der Energieaufwand bezogen auf die Tonne Inputmaterial gleichbleibend ist und keine Wärme zurückgewonnen wird, zu einer erhöhten Wärmeaufnahme in Bezug auf das verdampfte Wasser. Auf den Gesamtenergiebedarf der Anlage wirkt sich dies allerdings nicht aus, da sich der Energiebedarf an dem inputspezifischen Wärmebedarf und der Eingangsmenge orientiert.

Die Zusammenfassung des Fallbeispiels ist in Tabelle 22Tabelle 23 zu sehen. In letzterer wird nochmals verdeutlicht, wie sich die Massenströme aufteilen. Weiterhin ist zu sehen, dass eine größere Menge REA-Gips als Schwefelsäure für dieselbe Aufgabe benötigt wird, was an dem geringeren Sulfat-Massenanteil im Kalziumsulfat als in der Schwefelsäure liegt. Ein Vergleich aller Werte aus Messung, Berechnung, Fallbeispiel und Herstellerangaben ist in Tabelle 24 möglich.

Tabelle 22 Energiebedarfe des Ammoniumstripp-Verfahrens und Massenstromaufteilung bezogen auf die Flüssig- bzw. Wasserphase am Austritt jedes Prozessschrittes.

		Energiebedarf thermisch		Energiebedarf elektrisch	
	Massen-strom	**[kWh/m³ Gärrest Ausgang BGA]**	**[kWh/m³ Was-ser Ausgang]**	**[kWh/m³ Gärrest Ausgang BGA]**	**[kWh/m³ Wasser Ausgang]**
BGA	100%	0,00	0,00	0,00	0,00
PSS	91%	-	-	0,5	15,1
Strippung	3%	72	2178	6	176,8
	Summe:	72	2178	6	191,9

Tabelle 23 Stoffströme und Feststoffgehalte im Fallbeispiel der Ammoniumstrippung; die Storffströme Massenstrom und Ammnoniumstickstoff sind in Prozent angegeben und auf die Gärrestmenge am Prozesseingang bezogen.

Gehal-te/Stoffstrom	**Roh**	**Fest**	**Flüssig**	**N-Red.**	**ASL**	**H2SO4 96%**	**REA-Gips**
TR [%FM]	7,9%	30,0%	5,8%	6,0%	30%	96,0%	78%
Massenstrom [%Input]	100%	9%	91%	88%	4,3%	1,0%	1,5%
NH4N [%Input]	100%	9%	91%	27%	64%	0,0%	0,0%

Datenvergleich

In Tabelle 24 sind die Kennzahlen des Ammoniumstripp-Prozesses aufgeführt, hier können die spezifischen Energieeinträge, Energiekennzahlen, Strippgrad, Wasserreduktion und der BHKW-spezifische Wärmebedarf abgelesen und verglichen werden. Insgesamt liegen hierbei Messung, Berechnung, Herstellerangebot und Fallstudie dicht beieinander. Einzige Ausnahme stellt der hohe thermische Energiebedarf pro verdampfter Tonne Wasser dar, was an der geringeren Wasserreduktion liegt, wie im Abschnitt *Fallstudie* beschrieben.

Die Angaben des Herstellerangebots unterteilen sich in zwei Kategorien. Die erste, ohne Pressschnecke, bezieht sich auf den Energiebedarf am Eingang des Strippverfahrens. In der zweiten Kategorie, mit Press-schnecke, wurde angenommen, dass der Strippung eine Feststoffseparation vorgeschaltet wird. Die damit verbundene Reduktion des Gesamtmassenstromes bewirkt eine Senkung des spezifischen Energiebedarfs bezogen auf die Ausgangsmenge der Biogasanlage, da ein kleinerer Massenstrom behandelt werden muss.

Tabelle 24 Zusammenfassung der ermittelten Daten zur Ammoniumstrippung aus Messung, Berechnung, Herstellerangaben und Fallstudie

	Thermischer Energiebedarf		Elektrischer Energiebedarf		Energiekennzahl ε			Stripp-grad	Wasser Red.	Spez. Wärme-leistung
	[kWh/t Gärrest Ausgang BGA]	[kWh/t Wasser Ausgang]	[kWh/t Gärrest Ausgang BGA]	[kWh/t Wasser Ausgang]	th.	el.	ges.	[%]		$\dot{Q}\left[\frac{kW_{th}}{kW_{el}}\right]$
Messung	86	1.263	6	95	1,10	5,6	0,92	70%	6,4%	0,23
Angebot										
ohne PSS	90	1.432	7	112	1,01	4,5	0,83	80%	6,3%	0,24
mit PSS	82	1.432	6	112	1,01	4,5	0,83	80%	5,7%	0,22
Berechnung	72	1.321	-	-	1,00	-	-	-	6,0%	0,19
Fallstudie	79	2.385	6	209	0,74	2,9	0,59	70%	3,3%	0,21

Membranverfahren

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Gegenüberstellung der Messdaten und Herstellerangaben. Weiterhin werden auf Basis physikalischer Grundlagen Berechnungen zur theoretisch zu erwartenden Leistungsaufnahme der hierbei verwendeten Verfahrensschritte angestellt.

Berechnungsgrundlagen

Da sich die gemessenen Daten auf Stromverbrauch und Stoffdurchsatz beschränken, wurde zur Datenauswertung auf das entwickelte Bilanzierungsverfahren zurückgegriffen, siehe Kapitel *Methodik*. Die theoretische Betrachtung beruht auf strömungstechnischen Grundlagen sowie einem fluiddynamischen Ansatz zur Berechnung nicht-Newton'scher Flüssigkeiten. Die Strömungsleistung ergibt sich aus der Energiebilanz eines inkompressiblen Fluides entlang des Stromfadens zu

$$P_s = \Delta p \, \dot{V}.$$

Mit dem Pumpenwirkungsgrad η_P wird die Leistungsaufnahme der Pumpe berechnet:

$$P_P = \frac{P_s}{\eta_P}.$$

Die Formel für die Bestimmung des Druckverlustes innerhalb eines Rohres lautet:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho}{2} \bar{w}^2.$$

Hierbei entspricht ζ dem Widerstandsbeiwert, ρ der Fluiddichte und $\bar{w}$ der durchschnittlichen Rohr-Durchströmungsgeschwindigkeit.

Der Druckverlust über das Membranmodul basiert im Fall der Umkehrosmose auf einem Produktdatenblatt der Firma GE Power & Water (Lenntech BV 2017) sowie den Betreiberangaben von (Ökotech GmbH). Der Druckverlust bzw. die Energiedissipation in der Querstromultrafiltration wurde über den Berechnungsansatz für nicht-Newton Fluide aus (Kraume 2012) ermittelt. Die hierfür benötigten Formeln und Abbildungen basieren auf einer Veröffentlichung von (Dodge und Metzner 1958). Zunächst wird die Wandschubspannung τ_w mithilfe des Fließexponenten n und Oswald-de-Waele-Faktors k sowie der Membran(-betriebs)parameter Rohrradius R und Durchflussgeschwindigkeit $\bar{w}$ berechnet.

$$|\tau_w| = k \left(\frac{\left(3 + \frac{1}{n}\right) R}{\bar{w}} \right)^n$$

Mit dieser ist es möglich die nicht-Newton'sche Reynoldszahl zu ermitteln.

$$Re_{n-N} = \frac{8 \rho \bar{w}^2}{|\tau_w|}$$

Aus dieser wiederum kann iterativ der Strömungswiderstandsbeiwert ζ bestimmt werden.

$$\zeta_i = \left[-0{,}2 \, n^{-1{,}2} + 2n^{-0{,}75} \, log_{10} \left(Re_{nN} \left(\frac{\zeta_{i-1}}{4} \right)^{1-\frac{n}{2}} \right) \right]^{-2}$$

Der Startwert für die Iteration stammt aus Abbildung 21. (Dodge und Metzner 1958) beziffern die Standardabweichung des nach dieser Funktion berechneten Druckverlustes von experimentellen Daten im turbulenten Strömungsregime nicht-Newton-scher Flüssigkeiten mit 1,9 %. Wird der Widerstandsbeiwert und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in die Druckverlustgleichung eingesetzt, kann der Druckverlust und damit die Strömungs- und Pumpenleistung ermittelt werden.

Um den Energiebedarf auf die erzeugte Menge Permeat beziehen zu können, bedarf es weiterer Berechnungsformel für Membranmodule:

$$\dot{V}_P = A * J$$

$$\phi = \frac{\dot{V}_P}{\dot{V}_F}$$

A entspricht hierbei der Membranoberfläche und J dem Membranflux, also der spezifischen Menge erzeugten Permeats pro Quadratmeter Membranoberfläche. Der Flux ist dabei sowohl von der verwendeten Memb-

ran als auch von dem zu behandelnden Stoffsystem abhängig (atech innovations GmbH 2017). Die Ausbeute ϕ beschreibt das Verhältnis des Permat- und Feedvolumenstroms.

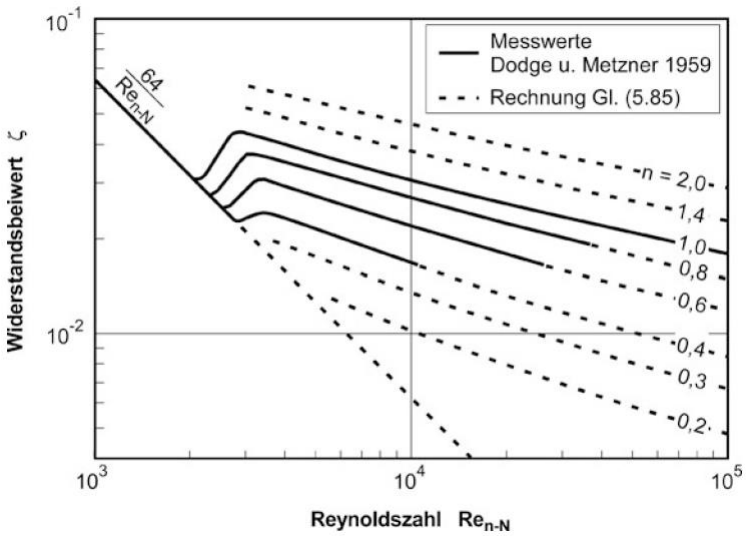


Abbildung 21 Widerstandsbeiwerte für verschiedene nicht-Newton Fluide bei turbulenter Rohrströmung. (Kraume 2012)

Messdaten

Zur Validierung der Hersteller- und Anlagenbetreiberaussagen wurden an zwei verschiedenen Membranaufbereitungsanlagen Messwerte aufgenommen. Dabei handelte es sich bei der einen um eine großtechnische Anlage zur Aufbereitung von Gärresten aus einer Abfallvergärungsanlage und bei der anderen um eine Forschungsanlage an einem NaWaRo-Fermenter. Die damit verbundenen Aufbereitungskapazitäten der Membrananlagen belaufen sich auf 20.000 bzw. 3.000 m³ pro Jahr.

Die Vorgehensweise an beiden Anlagen war nahezu identisch. In beiden Fällen wurden die Zählerstände der ein- und ausgehenden Stoffströme regelmäßig abgelesen und Proben jedes einzelnen Stroms im stationären Zustand genommen. Die Aufnahme der Energieströme erfolgte an der großtechnischen Anlage über Auslesen des installierten Stromzählers, während an der Forschungsanlage die Möglichkeit bestand, die eigenen Strommessgeräte anzuschließen. Unter Zuhilfenahme der Probenanalyse konnten die einzelnen Stoffströme bilanziert und Abscheidegrade der einzelnen Bestandteile bestimmt werden. Insbesondere die Bilanzierung des Trockenrückstands gab Aufschluss über die Verhältnisse der einzelnen Massenströme.

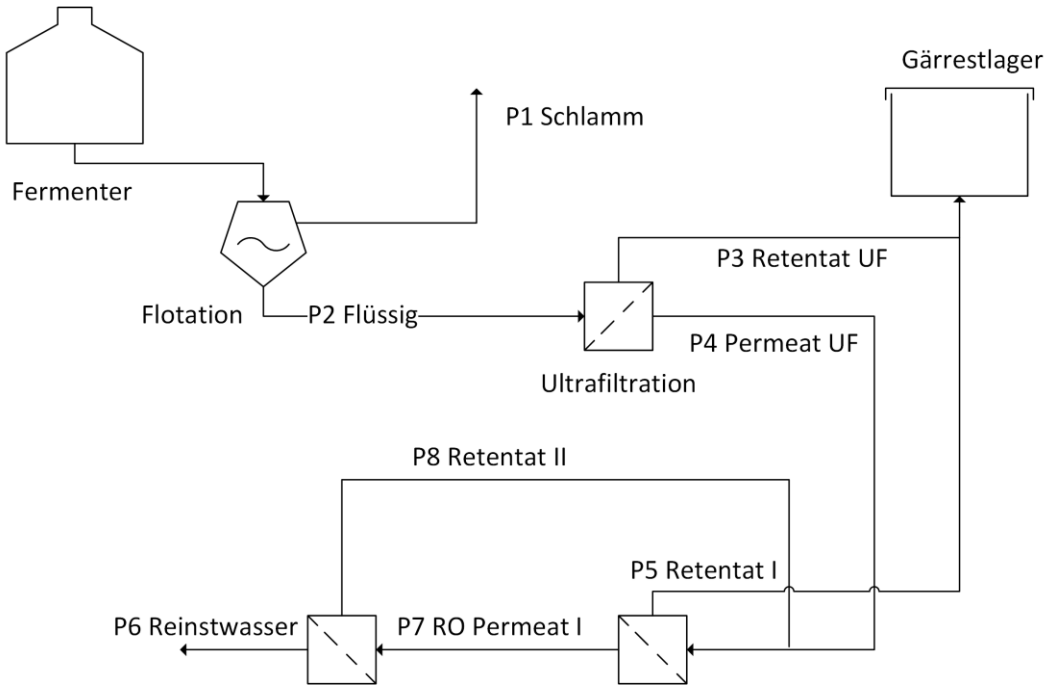


Abbildung 22 Blockschaltbild der großtechnischen Membrananlage an einer Abfallvergärungsbiogasanlage

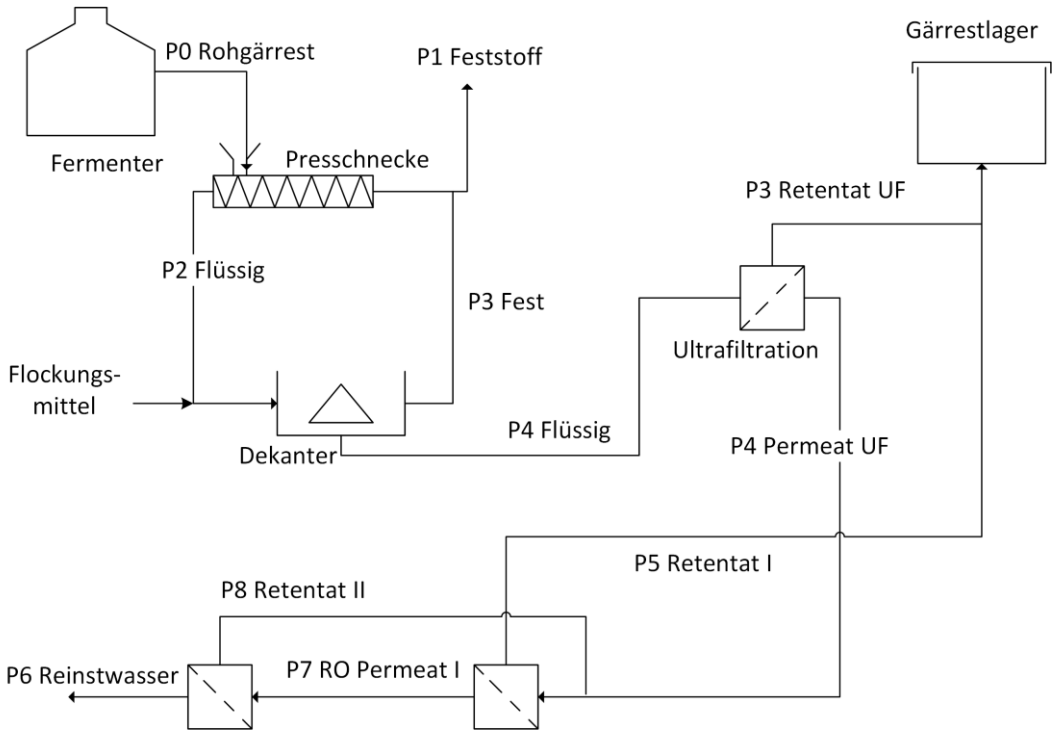


Abbildung 23 Blockschaltbild der Forschungsmembrananlage zur Aufbereitung von NaWaRo-Gärrest

Die Abbildung 22Abbildung 23 zeigen die Verschaltung der beiden Membrananlagen. Da Abfallvergärungsanlagen geringere Feststoff- und Fasergehalte im Gärrest aufweisen, kann auf eine Vorseparation verzichtet werden, der Gärrest wird direkt in eine flockungsunterstützte Flotation gepumpt. Im Anschluss daran weist die Flüssigphase einen sehr niedrigen Feststoffgehalt von unter 1 % auf und gelangt in die Ultrafiltration. Hier erfolgt die Abscheidung sämtlicher partikulärer Feststoffe, das Konzentrat wird in das Gärrestlager geleitet, das Permeat in den Umkehrosmoseschritt. Hier erfolgen die Aufkonzentration der verbliebenen Nährstoffe sowie die Erzeugung einleitfähigen Wassers. Das Retentat der ersten Umkehrosmosestufe wird als Düngerkonzentrat in das Gärrestlager gefördert, das Permeat der zweiten Umkehrosmosestufe ist einleitfähiges Wasser.

Das zweite vermessene Verfahren verfügt über eine aufwändigere Feststoffseparation, da die Feststoffgehalte im Rohgärrest mit 7-8 % sehr viel höher sind als an der Abfallvergärungsanlage. In der Pressschnecke erfolgt zunächst die Entfernung grober Feststoffpartikel größer 0,5 mm. Anschließend wird mithilfe von Flockungspolymeren der Trockenrückstand des Zentrates auf unter 1,5 % eingestellt. Dadurch wird es möglich das Zentrat in Ultrafiltration und Umkehrosmose zu behandeln, wie im vorherigen Absatz bereits beschrieben.

Die Ergebnisse der Vermessung sind in den Tabelle 25 undTabelle 26 zusammengefasst. Aufgeführt werden hier die prozentualen Massenströme am Ausgang jedes einzelnen Verfahrensschritts bezogen auf 100 % Gärrest am Ausgang der Biogasanlage. Als Produkt wird hierbei immer der Stoffstrom gewertet, der im nächsten Prozessschritt weiterverarbeitet wird. Weiterhin sind die gemessenen spezifischen Energieeinträge dargestellt, die ein Verfahrensschritt pro Tonne direkt am Eingang des Prozessschritts bzw. pro Tonne Produkt benötigt. In der Spalte *Gesamter Energiebedarf* wird dieser Aufwand unter Berücksichtigung des mit jedem Aufbereitungsschritt abnehmenden Massenstroms auf die Tonne Rohgärrest am Eingang und auf die Tonne Wasser am Ausgang der Aufbereitungsanlage umgerechnet.

Bei dem Vergleich der Massenströme fällt auf, dass die Ultrafiltration an der Abfallvergärungsanlage mehr Permeat produziert als die an der NaWaRo-Anlage. Dies ist mit dem geringeren Feststoffgehalt vor der Ultrafiltration zu erklären, was eine höhere Ausbeute von 90 % im Vergleich zu 70 % ermöglicht. Ein weiterer Unterschied ist zwischen den Verbräuchen der Flotation und des Dekanters zu erkennen. Letzterer benötigt ca. die vierfache Menge Energie, allerdings enthält der abseparierte Feststoff auch sehr viel weniger Wasser und ist bereits stichfest, was auf den Flotatschlamm nicht zutrifft. Dieser besteht nach eigener Messung zu über 98 % aus Wasser, sodass eine Nachbehandlung unabdingbar ist.

Der mit Abstand größte Stromverbraucher ist allerdings in beiden Fällen die Ultrafiltration, die 74-77 % am Gesamtverbrauch ausmacht. Der etwas höhere Energiebedarf der Ultrafiltration an der NawaRo-Anlage ist zum einen damit begründbar, dass es sich hierbei nur um eine Forschungs- und keine großtechnische Anlage handelt. Zum anderen verhält sich die Rheologie von Abfallvergärungs-Gärrest und NawaRo-Gärrest

unterschiedlich, neben höheren Feststoffgehalten im Dekanterzentrat weisen NawaRo-Gärreste auch höhere Viskositäten auf (Gienau und Rosenberger 2015).

Tabelle 25 Zusammenfassung der Ergebnisse der großtechnischen Anlagenvermessung an einer Abfallvergärungsanlage

		Spezifischer Energiebedarf		Gesamt Energiebedarf	
	Massen-strom	**Input Verfahren [kWh/m³]**	**Output Verfahren [kWh/m³]**	**[kWh/m³ Gärrest Ausgang BGA]**	**[kWh/m³ Wasser Ausgang RO]**
BGA	100%	0,00	0,00	0,00	0,00
Flotation	80%	0,70	0,88	0,7	1,3
UF	72%	25,00	27,78	20,0	36,5
RO	55%	8,80	11,58	6,3	11,6
			Summe:	27,1	49,4

Tabelle 26 Zusammenfassung der Ergebnisse der Vermessung einer Forschungsmembrananlage an einer NawaRo-Biogasanlage

		Spezifischer Energiebedarf		Gesamt Energiebedarf	
	Massen-strom	**Input Verfahren [kWh/m³]**	**Output Verfahren [kWh/m³]**	**[kWh/m³ Gärrest Ausgang BGA]**	**[kWh/m³ Wasser Ausgang RO]**
BGA	100%	0,00	0,00	0,00	0,00
PSS	90%	0,5	0,56	0,5	1,2
Dekanter	80%	2,8	3,2	2,6	6,0
UF	56%	29,8	42,6	23,9	56,1
RO	43%	8,8	11,6	4,9	11,6
			Summe:	31,9	74,8

In Summe zeigte die mit NawaRo-Gärrest betriebene Forschungsanlage im Vergleich zur großtechnischen Abfallvergärungsanlagen-Gärrest aufbereitende Membrananlage einen höheren Elektrizitätsbedarf. Zurückzuführen ist dies auf den Betrieb eines Dekanters, die kleinere Dimensionierung und insbesondere auf die Viskosität der Gärreste. Hierzu ist im folgenden Abschnitt eine Beispielrechnung auf Grundlage rheologischer Messwerte eine Energiebedarfsrechnung aufgestellt worden. Trotz der verhältnismäßig hohen Verbräuche kommen die Verfahren auf Energiekennzahlen zwischen 4,4 für die großtechnische und 2,9 für die Forschungsanlage.

Fallstudie TU Berlin

Abscheidegrade aus Messungen bilden die Berechnungsbasis für den Modell-NawaRo-Gärrest. Auf gemittelten Messwerten basierende spezifische Energieverbräuche und Abscheidegrade der Verfahrensschritte wurden herangezogen, um aus Stoffbilanzen die insgesamt benötigten Energie-verbräuche zu berechnen. Das betrachtete Verfahren entspricht dem in Abbildung 23 gezeigten.

Die im Vergleich zu den Messungen geringere prozentuale Wasserausbeute, ist auf den höheren Feststoffgehalt des Modellgärrests zurück zu führen, als er bei den Messungen an den Membrananlagen vorlag. Dementsprechend lagen abscheidegradbasiert auch höhere Feststoffgehalte im Zentrat des Dekanters vor. Deshalb musste die Ausbeute der Ultrafiltration gesenkt werden, um weiterhin sinnvolle und technisch machbare Trockenrückstände im Ultrafiltrationskonzentrat zu erreichen. Die Unterschiede in den Energieeinträgen lässt sich auf gleiche Art erklären, so wurde hier der Aufwand für das Abscheiden einer Tonne Flüssigprodukt herangezogen, weshalb der Energiebedarf bezogen auf die entfernten Tonne Wasser zwischen beiden Messungen liegt. Der niedrigere Energiebedarf bezogen auf die Tonne Inputgärrest ist auf die etwas

geringeren Abscheidegrade zurückzuführen. In der Fallstudie wird somit zwar eine größere Menge Gärrest behandelt, allerdings bei einer geringeren Aufkonzentration, als bei den vermessenen Verfahren.

Tabelle 27 In der Fallstudie der TU Berlin ermittelte Energiebedarfe und Stoffstromaufteilung für einen Modellgärrest

		Spezifischer Energiebedarf		Gesamt Energiebedarf	
	Massen-strom	**Input Verfahren [kWh/t]**	**Output Verfahren [kWh/t]**	**[kWh/t Gärrest Ausgang BGA]**	**[kWh/t Wasser Ausgang RO]**
BGA	100%	0,00	0,00	0,00	0,00
PSS	91%	0,5	0,55	0,5	1,2
Dekanter	80%	2,6	2,9	2,3	5,5
UF	53%	23,6	35,4	18,9	44,3
RO	41%	8,8	11,4	4,7	11,0
			Summe:	26,4	62,0

Theoretische Betrachtung

Für die theoretische Betrachtung des Membranprozesses, wird dieser in seine Unterprozesse Ultrafiltration und Umkehrosmose aufgeteilt. Es erfolgt die separate Berechnung der jeweiligen Energieeinträge, um diese im Anschluss zu einem kompletten Membranverfahren zusammenzufassen. Hiermit wird es möglich die theoretisch ermittelten Werte mit Hersteller-, Literatur- und Messwerten zu vergleichen.

Ultrafiltration

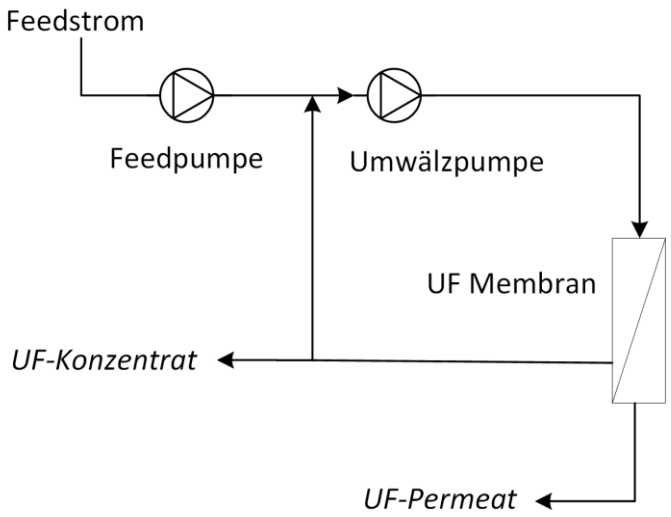


Abbildung 24 Fließbild einer Querstromultrafiltration

Abbildung 24 zeigt das Fließbild einer typischen rohrmodulbasierten Querstromultrafiltration, anhand derer die Berechnung des spezifischen Energiebedarfs pro Tonne Permeat erfolgt. Der zuvor durch mechanische Separation weitestgehend von Feststoffen befreite Feedstrom wird von der Feedpumpe auf den Betriebsdruck der Ultrafiltration gebracht und gelangt in den Umwälzkreislauf. Hier sorgt die Umwälzpumpe für einen ausreichenden Umwälzvolumenstrom, damit die Überströmungsgeschwindigkeit an der Membran gewährleistet wird. Diese muss hoch sein, da hierdurch das Biofilmwachstum auf der Membranoberfläche weitestgehend unterbunden wird. Durch die Entnahme von Permeat konzentriert sich der Flüssiggärrest im Umwälzkreislauf auf und hat im Falle eines kontinuierlichen Betriebs die Zusammensetzung des Konzentrats. Dies ist wichtig zu berücksichtigen, da die Stoffparameter des Konzentrats und nicht die des Feedstroms zur Druckverlustrechnung herangezogen werden müssen.

Die für die Berechnung herangezogenen Parameter sind in Tabelle 28 aufgeführt. Die Angaben bezüglich des Membranmoduls stammen aus einem Produktdatenblatt der Firma *atech*, das nach Herstellerangaben ein gängiges Modul in der Gärrestaufbereitung ist. (atech innovations gmbh 2017). Die Stoffparameter, ins-

besondere die rheologischen Daten stammen aus Untersuchungen der Hochschule Osnabrück (Gienau 2016)[1].

Tabelle 28 Berechnungsparameter für die Leistungsermittlung der Ultrafiltrationsstufe

Parameter	Wert	Einheit	Bemerkung
$\dot{V}_P$	103	L/h	Permeatvolumenstrom
d	3,3	mm	Membranrohrdurchmesser
L	1	M	Membranrohrlänge
A	4,1	m²	Membranoberfläche Modul
$\bar{w}$	5	m/s	Mittelere Strömgeschwindigkeit
J	25	L/(m²h)	Permeabilität / Flux
ϕ	70%		Ausbeute
p_{UF}	5	Bar	Betriebsdruck UF
ρ	1020	kg/m³	Dichte Flüssiggärrest
n	0,60	-	Fließexponent (Schubspannung n=m+1)
k	0,22	kg/(ms$^{-1,4}$)	Oswald-de-Waele-Koeffizient
η_P	70%		Pumpenwirkungsgrad

Tabelle 29 Ergebnisse Ultrafiltration

Parameter	Wert	Einheit
Volumenströme		
$\dot{V}_F$	146	L/h
$\dot{V}_R$	44	L/h
$\dot{V}_P$	103	L/h
$\dot{V}_U$	61,000	L/h
Berechnungsparameter		
τ_w	69,36	N/m²
$Re_{n\text{-}N}$	2941	
ζ	0,03	
Δp	1,27	Bar
Leistungen		
P_{Feed}	29	W
$P_{Umwälzung}$	3066	W
$P_{s,\ UF}$	30,2	kWh/m³

Aus den Parametern in Tabelle 28 und den Berechnungsgrundlagen lässt sich der permeatspezifische Energiebedarf $P_{s,\ UF}$ ermitteln. Dieser beträgt rund 30 kWh/m³ Permeat bei einem Druckverlust in dem Membranmodul von 1,27 bar pro Meter Modullänge, alle Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 29 zusammengefasst.

[1] Vielen Dank an dieser Stelle, Tobi!

Umkehrosmose

Im Anschluss an die Ultrafiltration gelangt das UF-Permeat zur weiteren Aufbereitung in die Umkehrosmoseanlage. Eine mögliche Verschaltung ist in Abbildung 25 dargestellt. Diese entspricht auch der Verschaltung der vermessenen Umkehrosmoseanlagen, weshalb auch die theoretische Vergleichsrechnung an diesem Beispiel erfolgt.

Der Feedstrom wird zunächst mittels Vordruckpumpe durch einen Polizeifilter befördert und erfährt eine Druckerhöhung auf das von der Hochdruckpumpe benötigte Niveau. Diese dosiert das Substrat in den Umwälzkreislauf der ersten Membranstufe. Hier sorgt eine Umwälzpumpe für die bei hohen Konzentrationen benötigte Überströmung der Membran; das erzeugte Konzentrat ist bereits das Produkt. Das Permeat muss aufgrund der hohen Salzkonzentrationen in der ersten Stufe in einem weiteren Schritt behandelt werden. Dieser erfolgt weitestgehend analog zum ersten nur, dass hier auf eine Umwälzung verzichtet wird und die Behandlung in zwei Permeat gestuften Membranen erfolgt. Das Permeat der letzten Membran ist das aufbereitete Wasser, die Retentate der Membranen II und III werden zurück in die erste Stufe gepumpt.

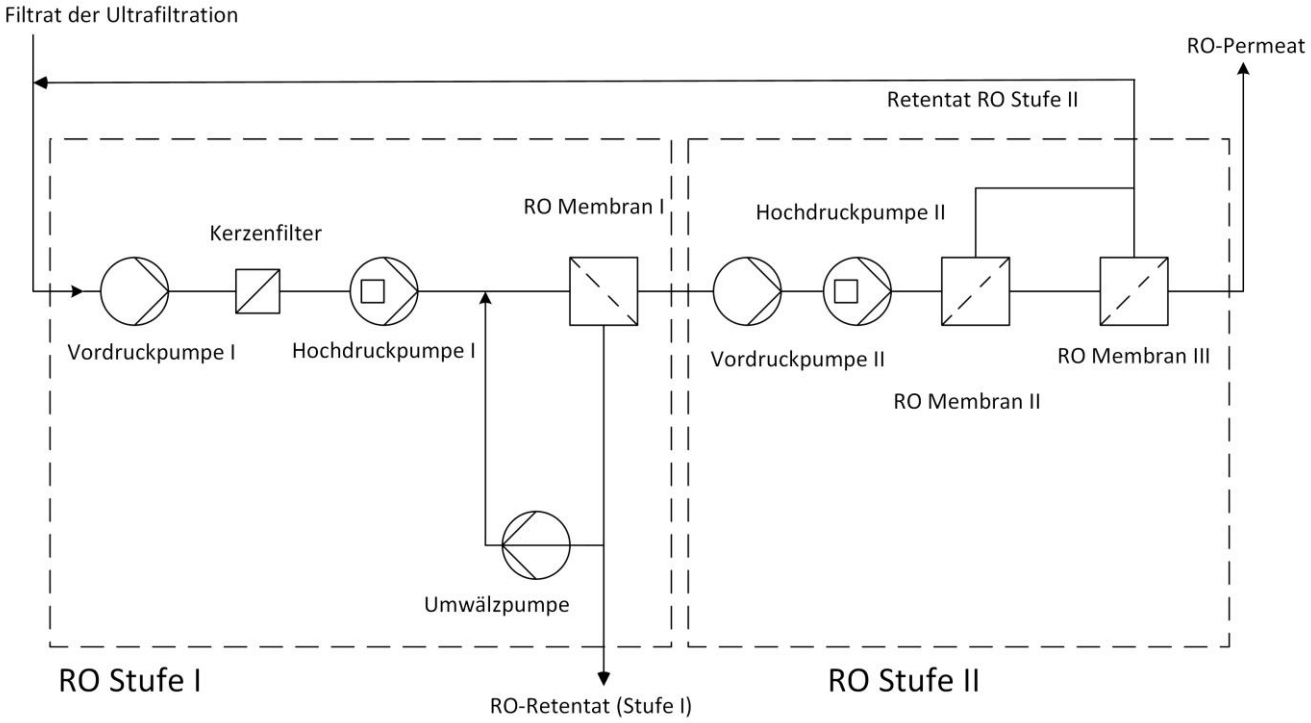


Abbildung 25 Fließbild einer zweistufigen Umkehrosmoseanlage

Tabelle 30 Zusammenfassung der Berechnungsparameter und Ergebnisse der Umkehrosmose

Parameter	Wert	Einheit
Allgemeine Berechnungsparameter		
Benötigter Vordruck	3	bar
Druck MS I	60	bar
Druck MS II	20	bar
Druckverlust Polizeifilter	1	bar
Druckverlust M I	3,45	bar
Ausbeute MS I	78%	
Ausbeute MS II	90%	
Pumpenwirkungsgrad	69%	
Volumenströme		
Feedstrom RO-Anlage	2,50	m³/h
Feedstrom RO I	2,71	m³/h
Permeatstrom RO I	2,11	m³/h
Retentatstrom RO I	0,55	m³/h
Feedstrom RO II	1,95	m³/h
Permeatstrom RO II	1,90	m³/h
Retentatstrom RO II	0,21	m³/h
Leistungen		
Vordruckpumpe RO I	0,3	kW
Hochdruckpumpe RO I	6,3	kW
Umwälzpumpe RO I	11,0	kW
Pumpen RO II	1,7	kW
Pumpenleistung Gesamt	19,3	kW
$P_{s,\,RO}$	10,2	kWh/m³

Die für die Berechnung der Leistungen benötigten Größen und die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 30 gezeigt, die Vorgehensweise ist in dem Abschnitt *Berechnungsgrundlagen* beschrieben. Weiterhin werden für die Berechnung die Betriebseigenschaften der Membranen und Pumpen benötigt, diese stammen aus Datenblättern der Membran- und Pumpenherstellern (Lenntech BV 2017; Danfoss GmbH 2017). Alle Volumenströme wurden aus der Bilanzierung der Anlage nach Vorgabe des Feedvolumenstrom gewonnen. Dieser beträgt 2,5 m³/h und entspricht damit einer gängigen Größe in der Gärrestaufbereitung. Aus Berechnung der Leistungen geht hervor, dass mit einem Energieaufwand von $P_{s,RO}$ = 10,2 kWh/m³ Permeat zu rechnen ist. Diese Größe ist weitestgehend von der Anlagenskalierung unabhängig.

Gesamtverfahren

Für das gesamte Membranaufbereitungsverfahren müssen der Ultrafiltration Feststoffseparationsverfahren vorgeschaltet werden. Diese sind eine Pressschnecke, die Feststoffepartikel größer einem Millimeter abtrennt, und ein Dekanter, der flockungsunterstützt den Trockenrückstand des Gärrests auf unter 1,5 % reduziert. Beide Maschinen stellen Standardverfahren in der Landwirtschafts- und Abwassertechnik dar, haben einen verhältnismäßig geringen Energiebedarf und sind hinreichend genau vermessen, weshalb an dieser Stelle auf eine theoretische Betrachtung verzichtet wird. Stattdessen werden die in eigenen Messungen bestätigten Daten aus der Literatur verwendet (Fuchs et al. 2010; Regenis GmbH 2016).

Tabelle 31 Ergebnistabelle der theoretischen Betrachtung des Membranverfahrens

		Spezifischer Energiebedarf		Gesamt Energiebedarf	
	Massen-strom	**Input Verfahren [kWh/t]**	**Output Verfahren [kWh/t]**	**[kWh/t Gärrest Ausgang BGA]**	**[kWh/t Wasser Ausgang RO]**
BGA	100%	0,00	0,00	0,00	0,00
PSS	90%	0,5	0,56	0,5	1,2
Dekanter	80%	3,2	3,37	2,7	6,3
UF	56%	21,1	30,19	16,9	39,7
RO	43%	7,7	10,15	4,3	10,2
			Summe:	24,5	57,3

Tabelle 31 fasst die vorherrschenden Randbedingungen sowie die Ergebnisse der Gesamtbetrachtung zusammen. Es wurde angenommen, dass die Pressschnecke und der Dekanter jeweils zehn Prozent des Gesamtgärreststroms abscheiden. Die verbleibenden 80 % werden der Ultrafiltration zugeführt, die eine Ausbeute von 70 % aufweist. Dies führt zu einer weiteren Reduktion des zu behandelnden Massenstroms auf 56 %, der der Umkehrosmoseanlage zugeleitet wird. In diesem letzten Aufbereitungsschritt werden 76 % des Eingangsstroms zu reinem Wasser aufbereitet, was insgesamt zu einer Wasserreduktion des Rohgärrests um 43 % führt.

Die Zahlen von zentraler Bedeutung für das Membranverfahren sind der spezifische Energiebedarf pro aufzubereitenden Kubikmeter Rohgärrest mit 24,5 kWh/m³, der spezifische Energiebedarf pro entfernten Kubikmeter Wasser $P_{S,\,Membran}$ mit 57,3 kWh/m³ und die hieraus resultierende Energiekennzahl $\varepsilon = 3{,}8$. Letztere besagt, dass das Membranverfahren rund vier Mal effizienter Wasser entfernt als das Vergleichsverfahren, das unter Wärmeeinsatz Wasser bei 100 °C verdampft.

Datenvergleich

Da im Rahmen des Forschungsvorhabens vorab eine intensive Literaturrecherche betrieben wurde und im Verlauf des Projektes zum Vergleich der Messwerte auch Herstellerangebote eingeholt wurden, erfolgt hier die Gegenüberstellung der Mess- und Berechnungswerte mit den Herstellerangaben und Literaturdaten. Diese sind in Tabelle 32 gezeigt. Die Mittelung in der vorletzten Zeile fasst alle darüberstehenden Werte zusammen, ungeachtet aus welcher Quelle sie stammen. Dies ist aus statistischer Sicht im höchsten Maße unwissenschaftlich, allerdings kann dieser in Verbindung mit der prozentualen Standardabweichung der Messwerte dazu dienen, einen Orientierungswert zu erlangen.

Es ist anzumerken, dass sowohl das Herstellerangebot als auch die Literaturwerte aus (Fuchs et al. 2010) von den Energieverbräuchen her, deutlich unter den Mess- und Berechnungswerten liegen, die Wasserausbeute im Herstellerangebot ist ebenfalls als sehr optimistisch zu werten. Da die Membrantechnologie in der Gärrestaufbereitung noch weitestgehend neu und unerforscht ist, kann damit gerechnet werden, dass die Energiebedarfe für die Aufbereitung mittels Membranverfahren noch sinken werden. Hauptverbraucher in den Messungen, Rechnungen und Literaturangaben ist die Ultrafiltration. Diese benötigt nach eigenen Messungen und Berechnungen rund 70 % des Gesamtenergieaufwandes. Eine Reduktion des Energiebedarfs ließe sich beispielsweise durch den Ersatz der Rohrmembranmodule mit Rotations-scheibenmembranen herbeiführen, da hier die zur Membranreinigung benötigte Leistung direkt auf die Membran übertragen wird und so keine Verluste in der Umwälzpumpe auftreten. Rotations-scheibenmembranen kommen bisher aber nur an wenigen Anlagen zum Einsatz und waren nicht Teil der Untersuchung. Eine weitere mögliche Herangehensweise stellt die Entwicklung von Verfahren oder Additiven dar, die zu einer Senkung der Viskosität der Gärreste führen. Ein mögliches Verfahren stellt eine thermische Vorbehandlung bei 80 °C der Gärreste dar, da hierdurch die Viskosität nachhaltig reduziert wird (Farno et al. 2014).

Tabelle 32 Zusammenfassung der im Rahmen des Forschungsprojektes gemessenen, berechneten und aus der Literatur gewonnenen Werte für den Energieaufwand einer Membranaufbereitung. Die Mittelung in der vorletzten Zeile dient ausschließlich der Orientierung.

	Gesamt Energiebedarf		Energiekennzahl	Entferntes Wasser
	[kWh/t Gärrest Ausgang BGA]	[kWh/t Wasser Ausgang RO]	ε	[%]
Messung 1	27,1	49,4	4,4	55%
Messung 2	31,9	74,8	2,9	43%
Berechnung	24,5	57,3	3,8	43%
Herstellerangebot	21,3	36,3	6,0	59%
Fuchs 2010	17,9	32,6	6,7	48%
TU Berlin Fallstudie	26,4	62,0	3,5	41%
Mittelwert	24,8	52,1	4,6	48%
Prozentuale Standardabweichung	18%	28%	30%	14%

3. Verwertung

Die Forschung der letzten drei Jahre hat gezeigt, dass die Vermessung großtechnischer Gärrestsaufbereitungsanlagen kompliziert ist, da keine mobile Messtechnik zum Erfassen der Massenströme von Gärrest existiert, weshalb stets auf die bereits installierte Messtechnik zurückgegriffen werden muss, was zu Lasten der Messgenauigkeit geht. Weiterhin ist festzuhalten, dass es sich bei Gärrest um ein höchst inhomogenes Gemisch handelt, dessen Eigenschaften nicht nur von der Biogasanlagenkategorie NawaRo-, Gülle-, Mist-, Bioabfall oder industrieller, landwirtschaftlicher Reststoff-Vergärung unterscheiden, sondern auch von der genauen Zusammensetzung des Substrats einer Anlagenkategorie, der Schnittlänge, der Verweilzeit, der Fermentationstemperatur, der Jahreszeit und vielen weiteren Faktoren abhängt. Bezüglich der Gärrestzusammensetzung konnte in diesem Projekt nur auf landwirtschaftliche Anlagen eingegangen werden, die vornehmlich aus einer Mischung von NawaRo-Substrat, Gülle und biogenen Reststoffen, wie Treber und Trester gefüttert wurden. Allerdings hat diese Kategorie den größten Anteil am Biogasanlagenmix und produziert den Gärrest mit dem höchsten Feststoffanteil, was die Aufbereitung erschwert. Eine Übersicht über die Zusammensetzung diverser Gärreste liefert (Fuchs et al. 2010). Ebenfalls enthalten ist ein sehr breites Grundlagenwissen über die Gärrestaufbereitung im Allgemeinen, die nun durch das hier abgeschlossene Forschungsvorhaben ergänzt und aktualisiert wird.
In dem nun abgeschlossenen Forschungsvorhaben wurden Erkenntnisse über die bis dato etablierten Gärrestaufbereitungsverfahren gesammelt und die Vor- und Nachteile aufgezeigt, sowie eine Daten-grundlage für Energiebedarfsrechnungen geliefert. Praxisrelevante Größen, wie der Aufkonzentrationsgrad, die Nährstoffgehalte einzelner Prozessströme und die Wasserreinheit können direkt von Anwendern genutzt werden. Hinsichtlich der auf Abscheidegraden basierten Übertragung der Messdaten auf ein Berechnungsmodell für die Ermittlung der Prozessstromaufteilung bestehen große Unsicherheiten, wie aus den Standardabweichungen der Mittelwerte für Abscheidegrade zu entnehmen ist. Dieser Umstand lässt sich auch durch eine breitere Datengrundlage nicht ändern, da diese Schwankungen existieren. Viel wichtiger erscheint eine detaillierte Analyse und Kategorisierung von Gärresten, um zu verstehen, was diese eigentlich genau sind und wie sie sich einordnen lassen. Wichtige Parameter sind selbstverständlich die bisher gut untersuchte Pflanzennährstoffzusammensetzung und die Verhältnisse von Ammoniumstickstoff zu Gesamtstickstoff sowie der Orthophosphatgehalt und Carbonatpuffer. Aber insbesondere die bisher wenig untersuchte Ladung und Größenverteilung der im Gärrest suspendierten Partikeln bedarf intensiver Forschung, um das eigentliche Kernproblem der Gärrestaufbereitung – die Separation der Feststoffe – besser verstehen und beeinflussen zu können.
Aus technischer Sicht besteht noch Bedarf an weiterer Grundlagenforschung hinsichtlich der gezielten Abtrennung einzelner Nährstoffe, insbesondere Phosphor. Das an kommunalen Kläranlagen zum Einsatz kommende MAP-Verfahren funktioniert mit den Gärresten aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen so nicht, was auf dessen chemische Zusammensetzung zurück zu führen ist. Weiterhin existiert kein großtechnisches Verfahren zur Kaliumrückgewinnung (Frank 2013; Maier et al. 2005). Strippverfahren zur Ammonium-

abscheidung existieren zwar in großem Maßstab, hier fehlt allerdings eine Serienproduktion, die es auch für kleine und mittlere Anlagengrößen attraktiv macht sowie die Möglichkeit auch aus der abseparierten Feststoffphase Ammonium abzuscheiden. Besonders letzteres hat laut dem Projektpartner KTBL großen Einfluss auf Lachgasemissionen. Besondere Vorteile der Ammoniumstripptechnologie bestehen in den geringen Energieanforderungen und der hohen Stickstoffreduktion, die nicht nur im Gärrest, sondern auch im Fermenter stattfindet. Damit wird nicht nur ein großes Stickstoffentfrachtungspotential erzielt, zusätzlich ermöglicht das Verfahren den Einsatz eines breiteren Substratspektrums, da auch Substrate mit hohem Ammoniumbildungspotential genutzt werden können, ohne dass die Mikrobiologie aufgrund zu hoher Ammoniumkonzentrationen gehemmt wird.
Aus den oben genannten Ausführungen ergeben sich die möglichen Folgeprojekte, die von der Grundlage der aktuellen Forschungsdaten profitieren. Diese sind die Entwicklung eines kostengünstigen Ammoniumstripp-Verfahrens für kleine und mittlere Biogasanlagen inklusive Trocknung und Ammoniumreduktion der Feststoffe. Ein solches Verfahren verfügt über ein großes Stickstoffentfrachtungspotential und reduziert Lachgasemissionen bedingt durch die Lagerung der festen Gärreste. In einer weiteren Forschungsphase ist die Etablierung eines Phosphorrückgewinnungsverfahrens denkbar, da durch die Strippung ein für die Fällung optimaler Ammoniumgehalt eingestellt werden kann. Eine Kombination dieser Verfahren kann auch zu einer verbesserten Feststoffabtrennung führen, nach Aussage der Berliner Wasserbetriebe in Wassmannsdorf, wird nach der MAP-Fällung ein höherer Trockenstoffgehalt im separierten Feststoff erzielt.

4. Erkenntnisse von Dritten

In der Literatur sind wichtige Gärrestforschungsverwandte Verweise zu finden. Wichtigstes Forschungsvorhaben ist die Untersuchung von Gärresteigenschaften an der Hochschule Osnabrück, mit dem Ziel die Membrantechnologie in der Gärrestaufbereitung Energieeffizienter zu gestalten (Gienau 2016).

5. Veröffentlichungen

Geplant ist es die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit im Rahmen einer monographischen Dissertation zu Veröffentlichen.

Weitere Präsentationen und Veröffentlichungen:

- Technische Umsetzung der Gärproduktaufbereitung; GGG-Fachseminar März 2016; M. Fechter, M. Kraume
- Digestate Treatment Techniques, 21st International Conference PROCESS ENGINEERING AND CHEMICAL PLANT DESIGN, Krakau 2016; M. Fechter, M. Kraume
- Großtechnische Messdatenerfassung und -evaluation unterschiedlicher Gärrestaufbereitungsverfahren; Projekt GÄRWERT – FNR-Statusseminar; M.Fechter, M.Kraume
- Entfrachtungspotentiale, Kosten Energiebilanzen; GärWERT-Seminar beim BMEL, Bonn 2016; M. Fechter, J. Dahlin, I. Petrova, U. Roth
- Influence of digestate processing technique on nitrogen mass flow and concentration as an important factor for N uptake, biomass yield and soil fertility; 1st International Conference Bioresource Technology for Bioenergy, Bioproducts & Environmental Sustainability, Sitges 2016; I. Petrova, M. Fechter, M. Kraume, C. Pekrun, K. Möller

ANHANG

Tabelle 33 Abscheidegrade der vermessenen Verfahrensschritte

Schwefel [kg/h]	MgO [kg/h]	K-Ges. (K2O) [kg/h]	P-Ges. (P2O5) [kg/h]	NH4-N [kg/h]	N-Ges [kg/h]	Kohlen-stoff [kg/h]	Rohasche [kg/h]	Wasser [kg/h]	TM [kg/h]	Massen-strom [kg/h]	
23%	50%	12%	22%	9%	13%	35%	18%	10%	33%	12%	**PSS fest**
91%	97%	15%	81%	18%	30%	80%	60%	11%	74%	14%	**Dekanter fest**
100%	100%	100%	100%	16.5%	= NH4-N	100%	100%	19%	100%	35%	**Band-trockner**
H2SO4	0%	0%	0%	75%	0%	0%	0%	1-TR	NH4 + H2SO4	NH4 + H2SO4	**ASL Band-trockner**
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	115%	100%	101%	**Pelletierer**
100%	100%	100%	100%	30%	59%	100%	99%	93%	100%	93%	**Strippung N-Red.**
100%	0%	0%	0%	70%	37%	0%	0%	4%	13%	5%	**Strippung ASL**
100%	100%	100%	100%	22%	50%	83%	100%	39%	100%	42%	**VV Kon-zentrat**
H2SO4	0%	0%	0%	78%	57%	0%	0%	3%	24%	4%	**VV ASL**
69%	80%	30%	58%	32%	38%	87%	40%	30%	59%	30%	**Konzetrat UF**
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	20%	100%	23%	**Konzetrat RO**

Literaturverzeichnis

atech innovations gmbh (2017): Ultrafiltration von Gärresten. Am Wiesenbusch 26, 2017. Telfon/Email an Maximilian Fechter.

VDI 2078: Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation). Online verfügbar unter https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-2078/197958916.

Berghof Membrane Technology GmbH & Co. KG: Bioflow Membrane Manual. Online verfügbar unter http://adurna.in/documents/Bioflow.pdf, zuletzt geprüft am 09.03.2016.

Brüß, Ulrich (2014): MPS Verfahren zur Totalaufbereitung von Gärresten. In: Fachverband Biogas e.V. (Hg.): 23. Jahrestagung und Fachmesse. Aufbereitung und Vermarktung von Gärprodukten. BIOGAS 23. Jahrestagung und Fachmesse. Fachverband Biogas e.V., S. 13–27.

Danfoss GmbH (2017): APP Pumps. Online verfügbar unter www.danfoss.de.

Dodge, D. W.; Metzner, Arthur B. (1958): Turbulent flow of non-newtonian systems. In: *A.1.Ch.E. Journal* (Vol. 5, No. 2), S. 189–204.

Farno, Ehsan; Baudez, Jean Christophe; Parthasarathy, Rajarathinam; Eshtiaghi, Nicky (2014): Rheological characterisation of thermally-treated anaerobic digested sludge. Impact of temperature and thermal history. In: *Water research* 56, S. 156–161. DOI: 10.1016/j.watres.2014.02.048.

Frank, Daniel (2013): Experimentelle Untersuchung und Modellierung der Fällung von Kalium-Magnesium-Phosphat Frank. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik und Plasmatechnologie IGVP.

Fuchs, Werner; Drosg, Bernard; Peter, Heinrich; Klummp, Hannelore (2010): Technologiebewertung von Gärrestbehandlungs- und Verwertungskonzepten. Hg. v. Universität für Bodenkultur Wien, Interuniversitäres Department für Agrarbiotechnologie, Institut für Umweltbiotechnologie: Eigenverlag der Universität für Bodenkultur Wien.

Gienau, Tobias (2016): Fließverhalten von Gärrest-Aufbereitungsprodukten. Hochschule Osnabrück, Albrechtstraße 30, 49076 Osnabrück, 2016. Telefon/Email an Maximilian Fechter.

Gienau, Tobias; Rosenberger, Sabine (2015): ENERGY-EFFICIENT TREATMENT OF DIGESTATES WITH AN OPTIMISED MEMBRANE PROCESS. In: *Papers of the 23rd European*, S. 599–608.

GNS - Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung mbH: GNS. Technologie- und Gründerzentrum Weinbergweg 23 D-06120 Halle (Saale). Online verfügbar unter www.gns-halle.de.

Heviánková, Silvie; Souček, Radek; Kyncl, Miroslav; Surovcová, Naděžda (2015): Contribution To The Study Of Flocculation Of Digestate. In: *GeoScience Engineering* 61 (3), S. 37–44, zuletzt geprüft am 08.05.2017.

Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang (2009): Energie aus Biomasse. 2. Aufl.: Springer. Online verfügbar unter http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9327-7_9.

Kraume, Matthias (2012): Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik. Grundlagen und apparative Umsetzungen. 2. Aufl.: Springer Vieweg.

Krischer, Otto; Kast, Werner (Hg.) (1978): Trocknungstechnik. Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin, Heidelberg New York: Springer-Verlag.

Lenntech BV (2017): AE HR Series. High Rejection Low Energy Seawater RO Elements. Rotterdamseweg 402 M, 2629 HH Delft. Online verfügbar unter http://www.lenntech.com.

Maier, W.; Weidelener, A.; Krampe, J.; Rott, U. (2005): Entwicklung eines Verfahrens zur Phosphat-Rueckgewinnung aus ausgefaultem Nassschlamm oder entwaessertem Faulschlamm als gut pflanzenverfuegbares Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP). Schlussbericht. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft. Online verfügbar unter https://www.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-21042.pdf, zuletzt geprüft am 23.05.2017.

MAN: Technisches Datenblatt. Basismotor E 3262 LE 202 2014.

Masse, L.; Massé, D. I.; Beaudette, V.; Muir, M. (2005): SIZE DISTRIBUTION AND COMPOSITION OF PARTICLES IN RAW AND ANAEROBICALLY DIGESTED SWINE MANURE. In: *Transactions of the ASAE* 48 (5), S. 1943–1949. DOI: 10.13031/2013.20003.

Meiners, Burkhard (2014): Mississippi-Gärresttrocknung. Produktpräsentation. Brunner Straße 18, 26316 Varel. Online verfügbar unter http://www.agroenergien.de/.

MKR Metzger GmbH: Vakuumverdampfung in der Gärrestaufbereitung. Recyclingsysteme Rappenfeldstraße 4 D-86653 Monheim an Maximilian Fechter.

Ökotech GmbH: Membrantechnik in der Gärrestaufbereitung. Am Teich 9, 04808 Thallwitz. Telefonat/Email an Maximilian Fechter.

Recknagel, Hermann; Schramek, Ernst-Rudolf; Sprenger, Eberhard (Hg.) (2007): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik. 73. Aufl. München: Oldenbourg.

Regenis GmbH (2016): Gärrestaufbereitung / Digestate Treatment. Germany, August 2016 an Maximilian Fechter.

Schwarz, S.; Jaeger, W.; Petzold, G.; Bratskaya, S.; Heinze, T. (2006): Synthetische und natürliche Polymere als Flockungsmittel bei der Fest-Flüssig-Trennung. In: *Chemie Ingenieur Technik* 78 (8), S. 49–58.

Seefeldt, Friedrich; Berewinkel, JAn; Lubetzki, Christoph (2009): Energieeffizienz in der Industrie: Springer.

Spindler, H.; Bauermeister, U.; Meier, T. (2012): Method and device for producing nitrogen fertilizer, removing phosphate from organic waste products, and limiting the potassium concentration. Angemeldet durch Phoenix Beteilgungs GmbH.

Thiering, Jochen; Bahrs, Enno (2011): Biogasproduktin in Deutschland. In: *GJAE - German Journal of Agricultural Economics* (4).

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Verbundvorhaben: GÄRWERT- GÄRprodukte ökologisch optimiert und WERTorientiert aufbereiten und vermarkten;

Teilvorhaben 3: Charakterisierung der Aufbereitungsprodukte und Düngeversuche

Zuwendungsempfänger:

HfWU Nürtingen-Geislingen & Universität Hohenheim

Förderkennzeichen:

12EKF023 bzw. 22402312

Laufzeit:

01.10.2013 bis **31.03.2017**

Monat der Erstellung:

04/2017

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Zuwendungsempfänger und ausführende Stelle:

Universität Hohenheim

Institut für Kulturpflanzenwissenschaften

Fachgebiet Düngung und Bodenstoffhaushalt

Fruwirthstr. 20

70593 Stuttgart

Zuwendungsgeber:

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)

Hofplatz 1

18276 Gülzow-Prüzen

Kooperationspartner:

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen

Institute for International Research on Sustainable Management and Renewable Energy (ISR)

Neckarsteige 6-10

72622 Nürtingen

Technische Universität Berlin

Fachgebiet Verfahrenstechnik

Ackerstraße 76

13355 Berlin

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)

Bartningstraße 49

64289 Darmstadt

Bearbeitung:

Ioana Petrova

Prof. Dr. Carola Pekrun

PD Dr. Kurt Möller

Inhalt

1 Ziele **8**
1.1 Aufgabenstellung 8
1.2 Stand der Technik 8
1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 9
2 Ergebnisse **10**
2.1 Erzielte Ergebnisse 10
2.1.1 Charakterisierung der Aufbereitungsprodukte 10
2.1.2 Keimpflanzentest 10
2.1.3 Düngungsversuche im Feld 14
2.1.4 Gefäßversuch zur Dünge- und Humuswirkung 20
2.1.5 Inkubationsversuch zur Messung der CO_2-Entwicklung eines Bodens nach Gärrestzugabe 24
2.1.6 Feldversuch zur Abschätzung der N_2O-Emissionen nach der Gärrestausbringung 27
2.2 Verwertung 29
2.3 Erkenntnisse von Dritten 30
2.4 Veröffentlichungen 30
Literatur **32**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbereitungsverfahren des Vollgärrestes, deren Gärprodukte als organische Düngemittel im Rahmen des Projektes untersucht wurden; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung 9

Abbildung 2: Sommerweizen 2015: N-Entzug in der oberirdischen Biomasse in kg pro ha; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle; KAS 100: 100 kg N pro ha in Form von Kalkammonsalpeter. 14

Abbildung 3: Mais 2015: N-Entzug in der oberirdischen Biomasse in kg pro ha; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle; KAS 100: 100 kg N pro ha in Form von Kalkammonsalpeter. 15

Abbildung 4: Sommerweizen 2016: Biomasseertrag in dt TM pro ha; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle; KAS 100: 100 kg N pro ha in Form von Kalkammonsalpeter. 16

Abbildung 5: Mais 2016: Biomasseertrag in dt TM pro ha; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle; KAS 100: 100 kg N pro ha in Form von Kalkammonsalpeter. 16

Abbildung 6: Sommerweizen 2016: N-Entzug in der oberirdischen Biomasse in kg pro ha; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); n.s.: nicht signifikant unterschiedlich; VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle; KAS 100: 100 kg N pro ha in Form von Kalkammonsalpeter.....17

Abbildung 7: Mais 2016: N-Entzug in der oberirdischen Biomasse in kg pro ha; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle; KAS 100: 100 kg N pro ha in Form von Kalkammonsalpeter. 17

Abbildung 8: Polynomfunktion 2. Grades zur Berechnung der Mineraldüngeräquivalente bei Mais 2016; i.F.: in Form; oberird.: oberirdisch. 18

Abbildung 9: Gesamter Stickstoffentzug in der oberirdischen Biomasse als Summe aller sieben Vegetationszyklen (Dt. Weidelgras – Mais – Dt. Weidelgras – Mais – Dt. Weidelgras – Mais – Dt. Weidelgras) in mg pro Gefäß; VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; flüssig n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; fl. n. ANA-Strip: flüssiger Gärrest nach ANA-Strip; K0: ungedüngte Kontrolle; KAS: Kalkammonsalpeter. 21

Abbildung 10: Ermittelte CO_2-C-Flussraten der verwendeten Gärprodukte in mg CO_2-C pro kg trockenen Boden und Tag (BGA 1).....24

Abbildung 11: Ermittelte CO_2-C-Flussraten der verwendeten Gärprodukte in mg CO_2-C pro kg trockenen Boden und Tag (BGA 4).....25

Abbildung 12: Kumulative Emissionen der verwendeten Gärprodukte über einen Zeitraum von zwei Monaten nach ihrer Ausbringung auf brachliegendem Boden; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); VG: Vollgärrest;

fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; K0: ungedüngte Kontrolle. 26

Abbildung 13: Zusammenhang zwischen ADF-Gehalt (Gehalt an Cellulose und Lignin) und ermittelte kumulative CO_2-Emissionen....26

Abbildung 14: N_2O-N-Flussrate in µg m^{-2} h^{-1} (BGA 1). 27

Abbildung 15: N_2O-N-Flussrate in µg m^{-2} h^{-1} (BGA 4). 28

Abbildung 16: Kumulative N_2O-Emissionen der verwendeten Gärprodukte über einen Zeitraum von drei Monaten nach ihrer Ausbringung auf brachliegendem Land im Jahr 2015; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle. 28

Abbildung 17: Kumulative N_2O-Emissionen der verwendeten Gärprodukte über einen Zeitraum von drei Monaten nach ihrer Ausbringung auf brachliegendem Land im Jahr 2016; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle. 29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wichtige Eigenschaften der verwendeten Gärprodukte; TM: Trockenmasse; FM: Frischmasse; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung.....11

Tabelle 2: Ergebnisse der "van Soest"-Analyse; aNDF: Neutral-Detergenz-Faser; ADF: Säure-Detergenz-Faser; ADL: Säure-Detergenz-Lignin; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung.....13

Tabelle 3: Kurzzeitwirkung der Gärprodukte auf die N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse von Sommerweizen und Mais, ausgedrückt in Mineraldüngeräquivalenten (% MDÄ). 19

Tabelle 4: Scheinbare Stickstoff-Wiederfindung (aNR: apparent nitrogen recovery) [%]. 20

Tabelle 5: Signifikanz der Unterschiede zwischen den verwendeten Düngemitteln in Bezug auf die N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse bei Dt. Weidelgras und Mais aus Abbildung 9; VZ: Vegetationszyklus; N-reicher GR: flüssiger Gärrest nach ANA-Strip. Die Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten innerhalb eines Vegetationszyklus an ($p<0,05$; HSD-Test). 21

Tabelle 6: Apparente N-Wiederfindung (aNR: apparent N recovery) in % in der oberirdischen Biomasse bei Dt. Weidelgras und Mais; alle Vegetationszyklen (VZ), alle Erntetermine.....23

Abkürzungsverzeichnis

ADF	acid detergent fiber
aNR	apparent nitrogen recovery
ASL	Ammoniumsulfat-Lösung
BGA	Biogasanlage
FM	Frischmasse
KAS	Kalkammonsalpeter
MDÄ	Mineraldüngeräquivalent
TM	Trockenmasse

Schlussbericht

1 Ziele

Aufbereitungsverfahren zur Erhöhung der Transportwürdigkeit von Gärprodukten gewinnen auf Grund der regionalen Überschüsse an organischen Düngemitteln zunehmend an Bedeutung. Diese Entwicklung wird voraussichtlich durch die verschärften Bestimmungen der neuen Düngungsgesetzgebung sowie der Einführung der verpflichtenden Hoftor- bzw. Stoffstrombilanzierung beschleunigt werden. Die dadurch erzielte Volumenreduktion und Aufkonzentrierung der enthaltenen Nährstoffe sollen die Erzeugung vermarktungsfähiger organischer Düngemittel mit einem kultur- und standortspezifischen Einsatz in der Landwirtschaft ermöglichen. Die Nährstoffzusammensetzung aufbereiteter Gärprodukte hängt stark von eingesetztem Substrat und Aufbereitungsverfahren ab. Das Hauptziel des Projektes beinhaltet die ökologische, ökonomische und pflanzenbauliche Bewertung ausgewählter praxisbezogener Produktionsketten und deren Gärprodukte.

1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Gärprodukte von ausgewählten Praxisanlagen hinsichtlich ihrer Inhaltsstoffe analysiert. Es wurden Informationen über ihre Dünge- und Humuswirkung, Pflanzenverträglichkeit und zur Ausgasung klimarelevanter Gase nach Ausbringung gesammelt. Ein Vergleich mit praxisüblichen Mineraldüngern (wie z.B. Kalkammonsalpeter) hinsichtlich der kurzfristigen Düngewirkung wurde bei Silomais und Sommerweizen durchgeführt. Eine Aussage über die langfristige Düngewirkung der Gärprodukte konnte auf Grund der kurzen Projektlaufzeit nicht getroffen werden.

Innerhalb dieses Teilvorhabens wurde eine umfangreiche Literaturrecherche über die in diesem Themengebiet bereits veröffentlichten Studien durchgeführt und die hierfür relevanten wissenschaftlichen Erkenntnisse in Form einer Review-Publikation zusammengefasst (Möller 2015). Des Weiteren erfolgte eine Laboranalyse der Produkte von allen untersuchten Anlagen, sowie der für die pflanzenbaulichen Versuche ausgewählten Gärprodukte hinsichtlich ihrer Inhaltsstoffe.

1.2 Stand der Technik

Im Rahmen des Projektes wurden Gärprodukte praxisüblicher Aufbereitungsverfahren, wie Flüssig-Fest-Separierung, Solare Trocknung, Pelletierung, Vakuumverdampfung, Umkehrosmose und Strippung verwendet. Abbildung 1 verdeutlicht die genannten Verfahren innerhalb der gesamten Prozesskette.

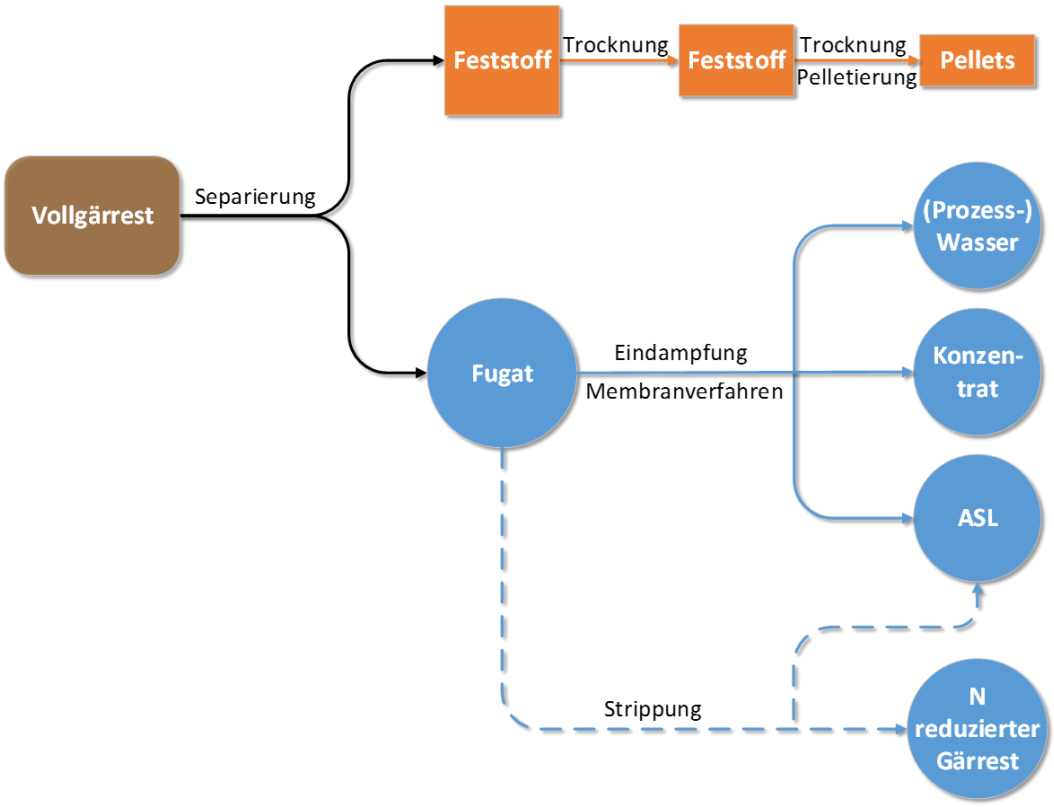


Abbildung 1: Aufbereitungsverfahren des Vollgärrestes, deren Gärprodukte als organische Düngemittel im Rahmen des Projektes untersucht wurden; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung

Für die Charakterisierung der Gärreste wurden Standardmethoden nach VDLUFA (Methodenbuch Band III, 1976) verwendet. Zur Bestimmung der Trockenmasse wurden die Gärreste bei 105 °C bis zum Erreichen eines konstanten Gewichts getrocknet (VDLUFA Methodenbuch Band III, Kapitel 3.1 „Bestimmung der Feuchtigkeit“). Der Gehalt an Gesamtkohlenstoff wurde mithilfe der Methode der trockenen Verbrennung (430 °C, 3 h) ermittelt und der des Carbonat-Anteils mit Hilfe der Scheibler-Apparatur entsprechend der DIN ISO – Norm 10693. Des Weiteren wurden der Gesamtstickstoff und dessen Ammonium-Anteil nach der praxisüblichen Kjeldahl–Methode festgestellt. Die Messung des pH-Wertes wurde in 0,01 *M* $CaCl_2$-Lösung durchgeführt.

Die Untersuchung zur Pflanzenverträglichkeit der Gärreste wurde nach einer überarbeiteten Methode in Anlehnung an VDLUFA (Methodenbuch Band I, Methode A 10.2.1) durchgeführt.

Die Freiland-Düngeversuche wurden nach guter fachlicher Praxis angelegt, wobei zur Gärrestausbringung auf praxisübliche Methoden und Techniken verzichtet wurde und sie stattdessen manuell erfolgte. Dabei wurde eine Schleppschlauchausbringung mittels der Verwendung von Gießkannen nachgestellt.

Der Gefäßversuch zur Düngewirkung wurde gemäß Chadwick et al. (2000) und Fouda (2011) durchgeführt, um diese als Vergleichsbasis bei der späteren Auswertung der Ergebnisse heranziehen zu können.

Die Methode, die im Rahmen des Gefäßversuches zur Abbaustabilität der organischen Substanz verwendet wurde, wurde den früheren Studien von Duong und Loos (2007), Sabahi et al. (2009) und de la Fuente et al. (2013) entnommen und an die Gärprodukteigenschaften, die zu ermittelnden Parameter und die Versuchsdauer angepasst.

Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach der Gärrest-Applikation im Freiland wurde mittels der „Closed chamber“- Methode nach Hutchinson und Mosier (1981) gemessen.

1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Dieses Forschungsvorhaben wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern

- Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU), Prof. Dr. Carsten Herbes und Prof. Dr. Carola Pekrun
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Ursula Roth und Dr. Sebastian Wulf

- Technische Universität Berlin, Prof. Dr.-Ing. Matthias Kraume

realisiert.

Die Gärprodukte wurden von zwei Biogasanlagen „BGA 1“ und „BGA 4“ bereitgestellt. Die chemische Analyse der Gärreste wurde vom Zentrallabor, der sogenannten „Core Facility“ der Universität Hohenheim durchgeführt.

2 Ergebnisse

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 Charakterisierung der Aufbereitungsprodukte

Die im Rahmen der verschiedenen Versuche verwendeten Gärreste wurden zu Beginn des jeweiligen Versuchsjahres neu von den ausgewählten Biogasanlagen bezogen und direkt analysiert. Die Ergebnisse der in den Jahren 2015/16 durchgeführten Laboranalysen sind in Tabelle 1 dargestellt. Wie im Zwischenbericht 2016 erwähnt, wurde die Anzahl der zu charakterisierenden Biogasanlagen auf insgesamt 2 („BGA 1“ und „BGA 4“) begrenzt. Daraus resultieren für die Jahre 2015 und 2016 zehn verschiedene Gärreste (fünf Gärreste pro Biogasanlage), die für die Experimente verwendet wurden.

2.1.2 Keimpflanzentest

Dieser Versuch wurde im Jahr 2014 nach der VDLUFA-Methode A 10.2.1 „Nachweis von pflanzenschädigenden Stoffen in Böden und gärtnerischen Substraten und Komposten“ aufgebaut. Als Zeigerpflanzen wurden Sommergerste und Chinakohl verwendet. Die applizierte Düngermenge betrug umgerechnet 100 kg N ha^{-1}, die im Verhältnis 50:50 bzw. 25:75 (Gärrest:Anzuchterde) ausgebracht wurde. Als Kontrollvariante dienten der mineralische Balkonpflanzendünger „Plantifor“ (HELLWEG Die Profi-Baumärkte GmbH & Co. KG) und eine ungedüngte Kontrolle. Die Ergebnisse zeigten, dass keine Beeinträchtigungen des Pflanzenaufganges aufgetreten sind, aber das Pflanzenwachstum der mit Gärresten behandelten Varianten war geringer als jenes der Mineraldüngerkontrolle.

Der Versuch wurde im Jahr 2015 wiederholt. Die applizierte Düngermenge wurde auf 170 kg N ha^{-1} erhöht. Zeigerpflanzen und Kontrollvarianten blieben unverändert. Die Applikation der Gärreste erfolgte vor der Aussaat und wurde an den jeweiligen N-Gehalt der Gärreste angepasst.

Die Düngung mit verschiedenen Gärprodukten beeinträchtigte die Keimung und die Entwicklung der beiden Kulturen nicht. Es konnte keine verzögerte Keimung festgestellt werden. Bezüglich der Laubfarbe und -form konnte acht Tage nach der Aussaat (Bonitur 2) eine schwache Aufhellung des Blattrandes bei 2,7 – 7,7 % (Sommergerste) bzw. 2,1 –11,7 % (Chinakohl) der gekeimten Pflanzen pro Gefäß ermittelt werden, wobei dies auch bei der Kontrollvariante zu beobachten war (2,6 % bei Sommergerste bzw. 3,3 % bei Chinakohl). Dies entsprach einer Bonitur-Note von 7 und verschwand mit fortschreitender Pflanzenentwicklung (bis zum 14. Tag nach der Aussaat) vollständig. In Bezug auf die Wurzelgesundheit konnten ebenso keine sichtbaren Unterschiede zwischen der Kontrolle und den verschiedenen organischen Düngervarianten festgestellt werden. Die Ergebnisse der Trockenmasse zeigen, dass Pellets (BGA 1), Vollgärrest (BGA 4) und Fugat (BGA 4) bei beiden Pflanzen einen tendenziell höheren Ertrag an oberirdischer Biomasse im Vergleich zur Kontrollvariante erbracht haben. Die Variante „Konzentrat nach Verdampfung“ (BGA 4) bildete bei Sommergerste 10 % mehr oberirdische Biomasse als die ungedüngte Kontrolle.

Tabelle 1: Wichtige Eigenschaften der verwendeten Gärprodukte; TM: Trockenmasse; FM: Frischmasse; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung

					Makronährstoffe								
Biogasanlage	**Verfahren**	**Gärprodukt**	**Jahr**	**TM**	**C_{ges}**	**N_{ges}**	**NH_4-N**	**NO_3-N**	**P**	**K**	**S**	**Ca**	**Mg**
				% FM	% TM	% FM	% FM	% FM	g/kg TM	g/kg TM	g/kg TM	g/kg TM	g/kg TM
BGA 1	-	Vollgärrest	2015	7,9	34,8	0,51	0,24	<0,001	10,57	45,14	3,99	16,80	5,39
	Separierung	Fugat		5,6	35,8	0,49	0,24	<0,001	14,83	66,30	4,88	23,27	7,29
		Feststoff		31,1	43,1	0,78	0,20	<0,001	5,43	11,22	2,68	7,83	3,33
	Trocknung	Feststoff		90,2	41,6	2,31	0,15	0,11	9,81	36,45	4,34	16,42	5,40
	Pelletierung	Pellets		88,9	40,2	3,12	0,38	0,32	10,31	35,14	4,24	17,51	5,81
		Vollgärrest	2016	10,8	43,5	0,51	0,20	<0,001	5,66	39,97	3,95	18,25	5,59
		Fugat		6,5	39,8	0,51	0,24	<0,001	8,02	69,92	4,67	23,07	8,31
		Feststoff		29,9	45,6	0,56	0,12	<0,001	3,79	15,55	4,70	10,19	3,83
		Feststoff		54,6	46,1	1,17	0,06	0,09	4,72	26,15	3,40	13,97	4,75
		Pellets		85,1	44,7	2,97	0,21	0,23	5,59	36,49	4,14	15,50	5,60
BGA 4	-	Vollgärrest	2015	5,4	38,1	0,52	0,34	<0,001	10,34	92,08	5,53	21,71	4,39
	Separierung	Fugat		5,0	36,8	0,52	0,34	<0,001	10,62	98,09	5,56	25,69	4,38
		Feststoff		22,5	39,8	0,63	0,34	<0,001	9,45	17,92	2,81	8,64	6,35
	Verdampfung	Konzentrat		8,5	37,5	0,41	0,17	<0,001	13,69	94,67	5,26	27,12	6,69
	Strippung	ASL		32,2	<0,2	5,98	5,86	<0,001	<0,01	<0,03	247,34	<0,03	<0,01
		Vollgärrest	2016	7,7	40,6	0,53	0,32	<0,001	7,99	60,77	4,13	16,02	7,88
		Fugat		4,7	39,3	0,50	0,28	<0,001	4,67	97,78	5,38	21,49	5,17
		Feststoff		17,4	43,4	0,56	0,25	<0,001	6,27	25,76	3,36	8,36	6,24
		Konzentrat		13,6	39,9	0,53	0,09	<0,001	6,74	84,85	5,69	21,73	6,65
		ASL		27,8	0,1	5,64	5,39	<0,001	0,03	0,90	230,00	0,32	0,09

Tabelle 1: Fortsetzung

Biogasanlage	Verfahren	Gärprodukt	Jahr	Mikronährstoffe							
				Fe	B	Mn	Na	Zn	Cu	Ni	Mo
				mg/kg TM							
BGA 1	-	Vollgärrest	2015	2126	28,2	301	3009	172	72,7	3,8	2,6
	Separierung	Fugat		2886	32,7	436	4489	240	57,7	6,1	4,0
		Feststoff		1081	21,1	108	737	43	11,7	<1,0	<1,0
	Trocknung	Feststoff		2246	29,0	243	2318	145	31,1	3,1	2,1
	Pelletierung	Pellets		2686	29,5	256	2240	151	31,8	3,4	2,1
		Vollgärrest	2016	2390	33,4	337	2626	150	26,9	5,3	2,0
		Fugat		3514	40,3	560	4482	265	49,9	9,7	3,7
		Feststoff		1579	35,1	145	991	50	11,8	1,4	0,6
		Feststoff		2446	42,6	287	1595	120	24,9	3,6	1,3
		Pellets		3181	41,0	330	2284	161	31,3	5,3	2,1
BGA 4	-	Vollgärrest	2015	1849	31,2	299	4014	278	55,1	6,2	4,6
	Separierung	Fugat		1852	30,5	310	4317	288	59,3	6,8	4,9
		Feststoff		758	10,9	134	844	73	17,2	1,4	1,3
	Verdampfung	Konzentrat		1987	26,7	330	4200	287	57,4	7,9	5,0
	Strippung	ASL		<5	<10,0	<1	12	2	<1,0	<1,0	<1,0
		Vollgärrest	2016	1851	30,3	266	2929	238	45,6	6,3	3,0
		Fugat		2179	34,5	336	4607	351	73,4	9,3	4,3
		Feststoff		1037	21,4	143	1228	109	19,6	3,3	1,5
		Konzentrat		2385	34,0	350	4196	355	71,9	10,1	4,5
		ASL		46,6	5,1	4	130	4	0,7	0,6	<0,1

Tabelle 2: Ergebnisse der "van Soest"-Analyse; aNDF: Neutral-Detergenz-Faser; ADF: Säure-Detergenz-Faser; ADL: Säure-Detergenz-Lignin; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung

Biogasanlage	Verfahren	Gärprodukt	Jahr	Rohfaser	aNDF	Hemicellulose	ADF	Cellulose	ADL
						(%)			
BGA 1	-	Vollgärrest	2015	16,4	41,1	3,4	37,7	20,7	17,0
	Separierung	Fugat		2,8	20,5	0,1	20,4	9,5	10,9
		Feststoff		38,2	68,3	16,5	51,8	30,2	21,6
	Trocknung	Feststoff		26,0	53,3	4,0	49,3	26,6	22,7
	Pelletierung	Pellets		20,3	51,7	5,4	46,3	23,8	22,5
		Vollgärrest	2016	20,7	47,7	3,9	43,8	21,5	22,3
		Fugat		6,1	37,9	-	38,2	13,8	24,4
		Feststoff		42,7	78,5	13,6	64,9	22,3	42,6
		Feststoff		31,0	65,3	4,6	60,7	21,4	39,3
		Pellets		23,3	58,3	6,3	52,0	20,4	31,6
BGA 4	-	Vollgärrest	2015	2,4	9,6	-	22,8	9,4	13,4
	Separierung	Fugat		< 0,6	2,1	-	25,4	8,0	17,4
		Feststoff		39,5	72,7	16,4	56,3	35,6	20,7
	Verdampfung	Konzentrat		1,7	8,9	-	26,0	14,8	11,2
	Strippung	ASL		< 0,6	< 1,0	-	< 0,5	-	< 0,5
		Vollgärrest	2016	18,4	45,5	4,4	41,1	22,4	18,7
		Fugat		2,2	18,9	-	29,8	10,5	19,3
		Feststoff		35,6	69,3	16,9	52,4	34,5	17,9
		Konzentrat		3,6	16,9	-	25,9	11,8	14,1
		ASL		< 0,6	< 1,0	-	< 0,5	-	< 0,5

2.1.3 Düngungsversuche im Feld

Der Feldversuch zur Düngewirkung, der im Jahr 2014 mit Silomais durchgeführt wurde, zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den verwendeten Gärresten. Alle Varianten, einschließlich der ungedüngten Kontrolle, erbrachten einen TM-Ertrag zwischen 19 - 21 t TM ha^{-1}.

Der Versuch wurde im Jahr 2015 wiederholt und auf eine weitere Feldfrucht, Sommerweizen, ausgeweitet. Die applizierte Düngermenge blieb unverändert (100 kg N ha^{-1} bei Mais und Sommerweizen). Um die Mineraldüngeräquivalente (MDÄs) berechnen zu können, wurde der verwendete Mineraldünger KAS wie im Vorjahr in vier unterschiedlichen Düngungsstufen ausgebracht Diese waren: 25, 50, 75 und 100 kg N ha^{-1}. Als Vergleich wurde auch eine ungedüngte Kontrollvariante angelegt.

Beim Kornertrag von Sommerweizen wies die ASL-Variante (BGA 4) im Mittel den höchsten Wert auf. Er lag bei 46,6 dt TM ha^{-1}. Die feste Fraktion nach Separierung erbrachte, abgesehen von der ungedüngten Kontrolle, den niedrigsten Kornertrag. Im Mittel betrug er 29,1 dt TM ha^{-1} (BGA 1) bzw. 29,8 dt TM ha^{-1} (BGA 4).

Der Biomasse-Ertrag von Mais zeigte eine ähnliche Tendenz. Die ASL-Variante lag im Mittel bei 169 dt TM ha^{-1} und erzielte somit den höchsten Ertrag. Die Varianten Feststoff nach Separierung (BGA 4) und Feststoff nach Trocknung (BGA 1) erbrachten den niedrigsten TM-Ertrag aller gedüngten Varianten. Im Mittel betrugen sie jeweils 145 dt TM ha^{-1}. Die höchste Düngestufe des Mineraldüngers KAS (applizierte Düngermenge 100 kg N ha^{-1}) lieferte, wie beim Sommerweizen, einen niedrigeren mittleren Biomasse-Ertrag als die ASL-Variante. Er lag bei 163 dt TM ha^{-1}

Betrachtet man die Stickstoffaufnahme in der oberirdischen Biomasse zeigte der Sommerweizen eine dem TM-Ertrag ähnliche Tendenz (Abbildung 2).

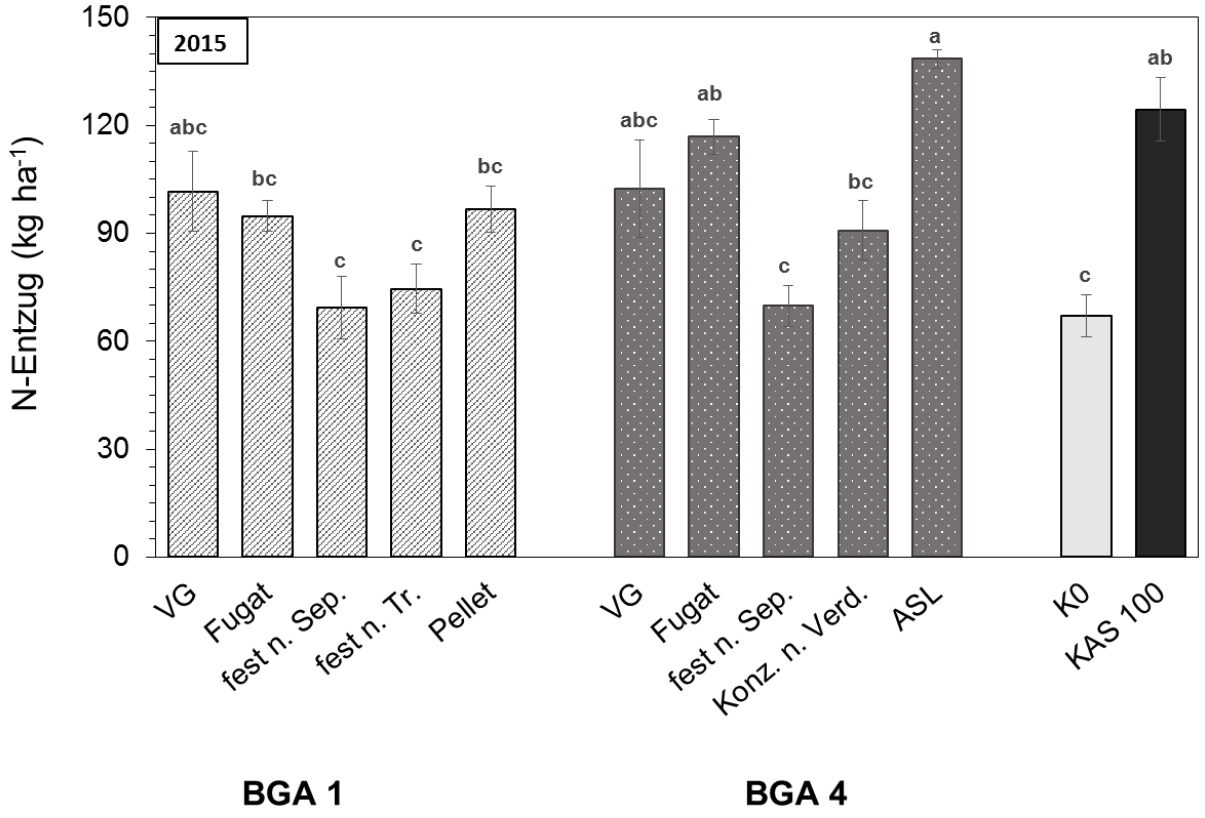


Abbildung 2: Sommerweizen 2015: N-Entzug in der oberirdischen Biomasse in kg pro ha; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle; KAS 100: 100 kg N pro ha in Form von Kalkammonsalpeter.

Die ASL-Variante lag auch hier im Mittel signifikant höher als ihre Vorstufe (Konzentrat nach Vakuumverdampfung) und als der Feststoff nach der Separierung. Eine Weiteraufbereitung des Feststoffes nach der Separierung führte zu einem Anstieg der N-Aufnahme.

Bei Mais wiesen die mit ASL behandelten Parzellen im Mittel den höchsten N-Entzug in der oberirdischen Biomasse auf (Abbildung 3). Die Weiteraufbereitung der festen und der flüssigen Fraktionen nach der Separierung zeigte keinen positiven Effekt auf die N-Aufnahme.

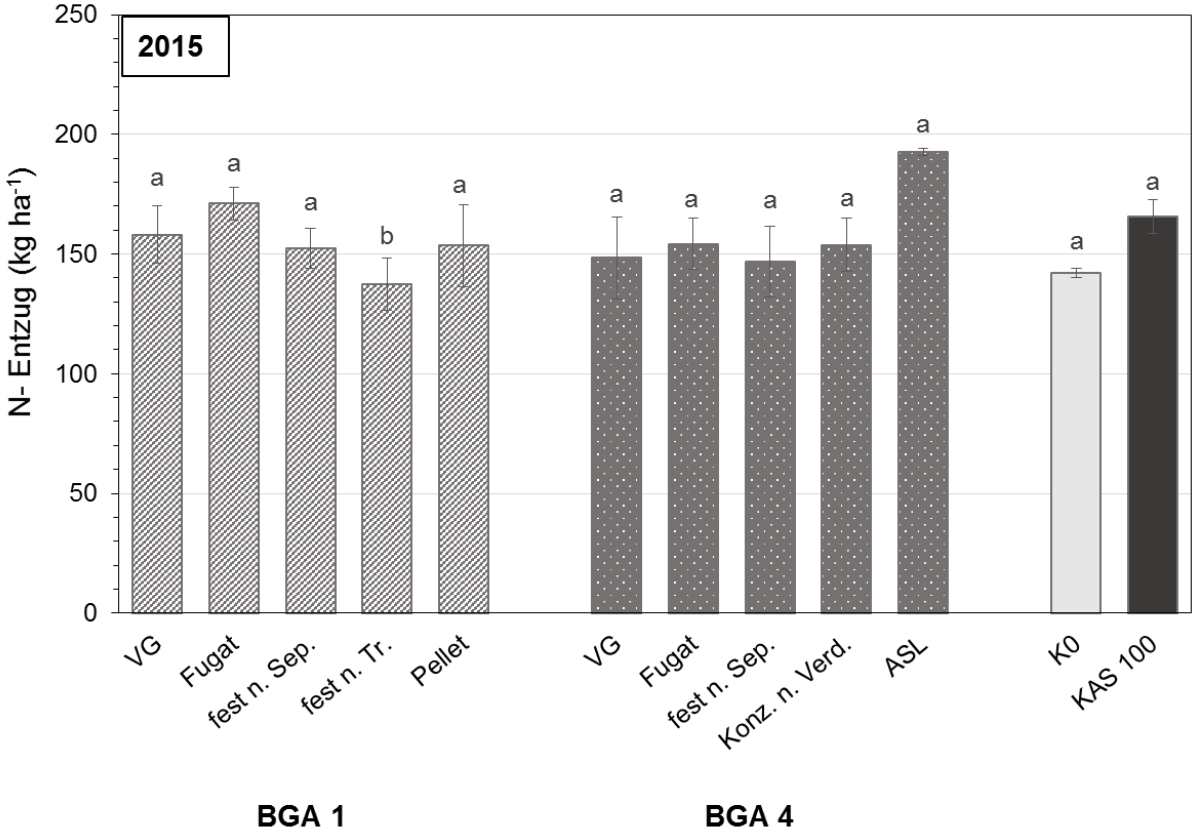


Abbildung 3: Mais 2015: N-Entzug in der oberirdischen Biomasse in kg pro ha; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle; KAS 100: 100 kg N pro ha in Form von Kalkammonsalpeter.

Die Applikation der Pellet-Vorstufe („Feststoff nach Trocknung“) führte zu einem vergleichbaren N-Entzug als bei der unbehandelten Kontrolle.

Um die Ergebnisse des zweiten Versuchsjahres verifizieren zu können, wurde der Feldversuch im Jahr 2016 wiederholt. Der im Vorjahr verwendete Versuchsaufbau, die Behandlungen, die ausgebrachte Düngermenge und die angebauten Kulturen blieben unverändert.

Auch in diesem Versuchsjahr führte die unterschiedliche Düngerzusammensetzung zu unterschiedlich hohen Sommerweizen-Erträgen (Abbildung 4).

Die Behandlungen „Feststoff nach Separierung“ und „Feststoff nach Trocknung“ wiesen die signifikant niedrigsten Erträge auf. Die flüssigen Gärprodukte führten im Vergleich dazu zu signifikant höheren Biomasseerträgen, wobei die höchsten Erträge weiterhin von den Mineraldüngern (ASL, KAS) erbracht wurden. Auch hier beeinflusste die Weiteraufbereitung des Feststoffes das Pflanzenwachstum positiv. Die mit Pellets gedüngten Parzellen bildeten einen höheren Ertrag als ihre Vorstufen.

Bei Mais wurden im letzten Untersuchungsjahr keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen in Bezug auf die TM-Erträge nachgewiesen werden (Abbildung 5). Lediglich der Wert der ungedüngten Kontrolle lag signifikant unter dem des Mineraldüngers (KAS), der ASL, des Fugats (BGA 4) und dem des Konzentrats nach Vakuum Verdampfung (BGA 4).

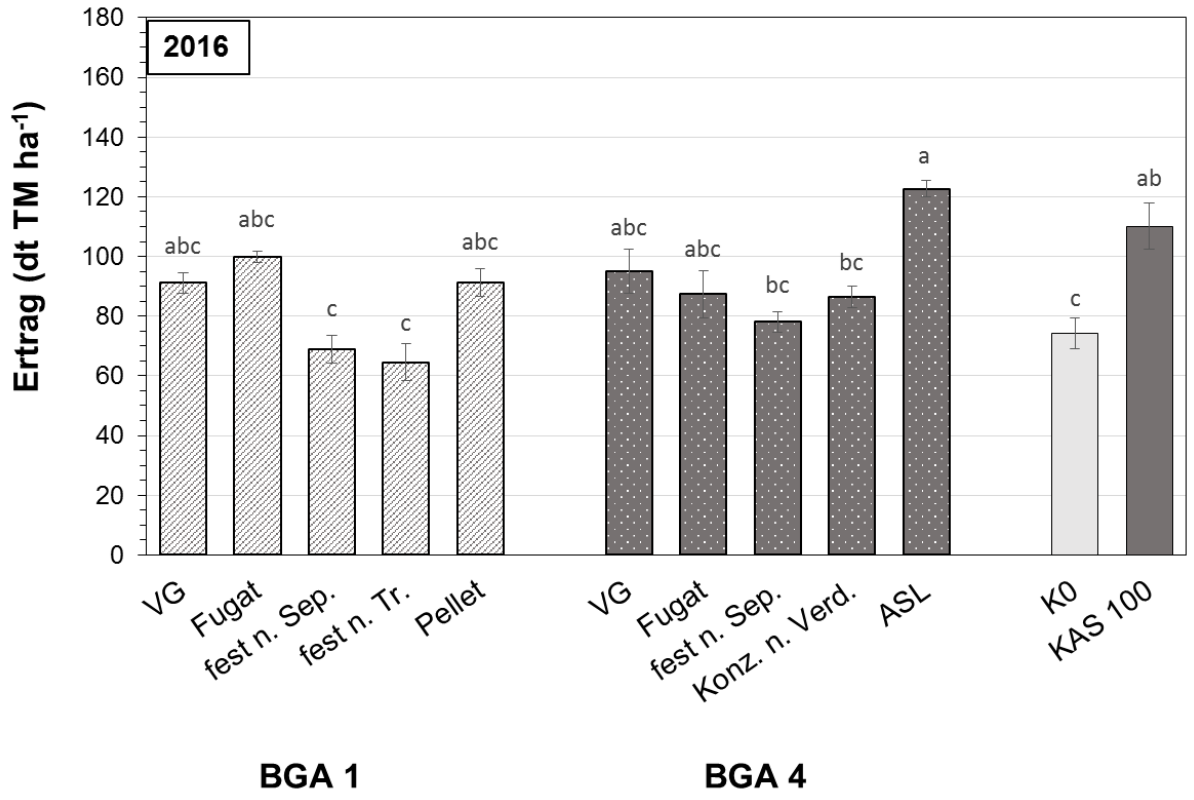


Abbildung 4: Sommerweizen 2016: Biomasseertrag in dt TM pro ha; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle; KAS 100: 100 kg N pro ha in Form von Kalkammonsalpeter.

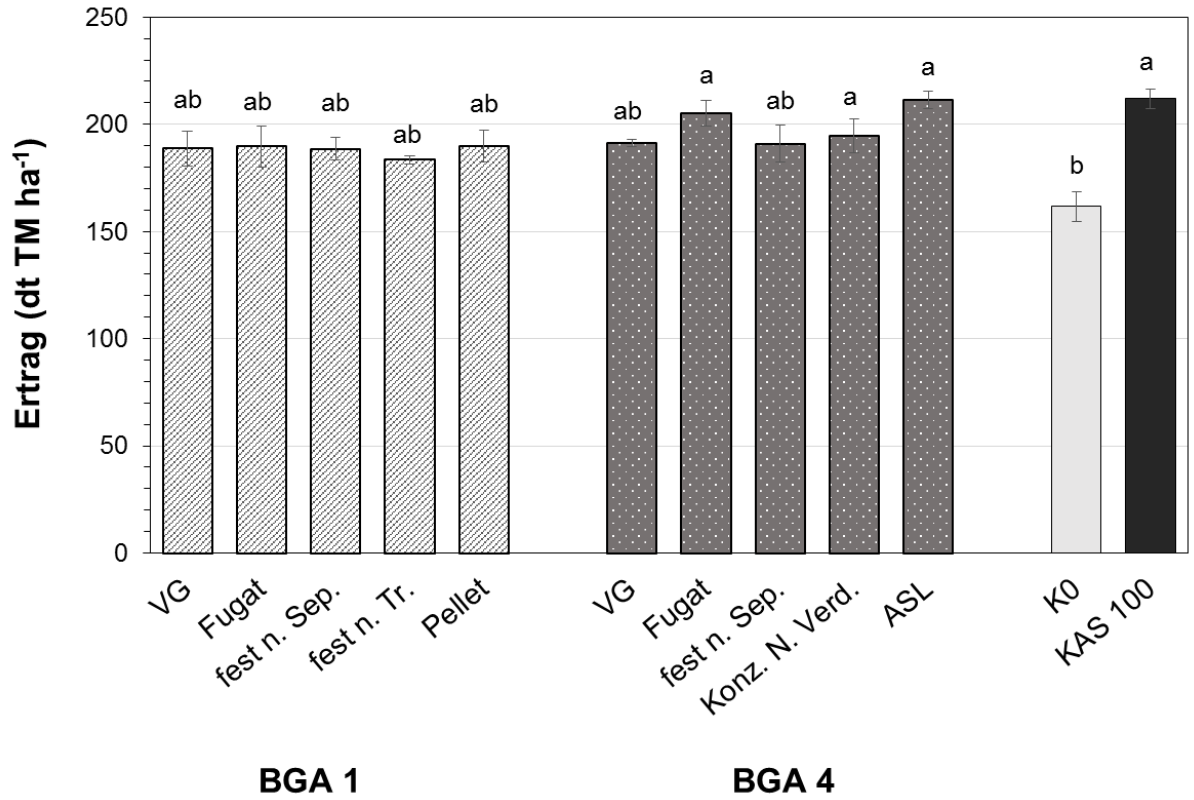


Abbildung 5: Mais 2016: Biomasseertrag in dt TM pro ha; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle; KAS 100: 100 kg N pro ha in Form von Kalkammonsalpeter.

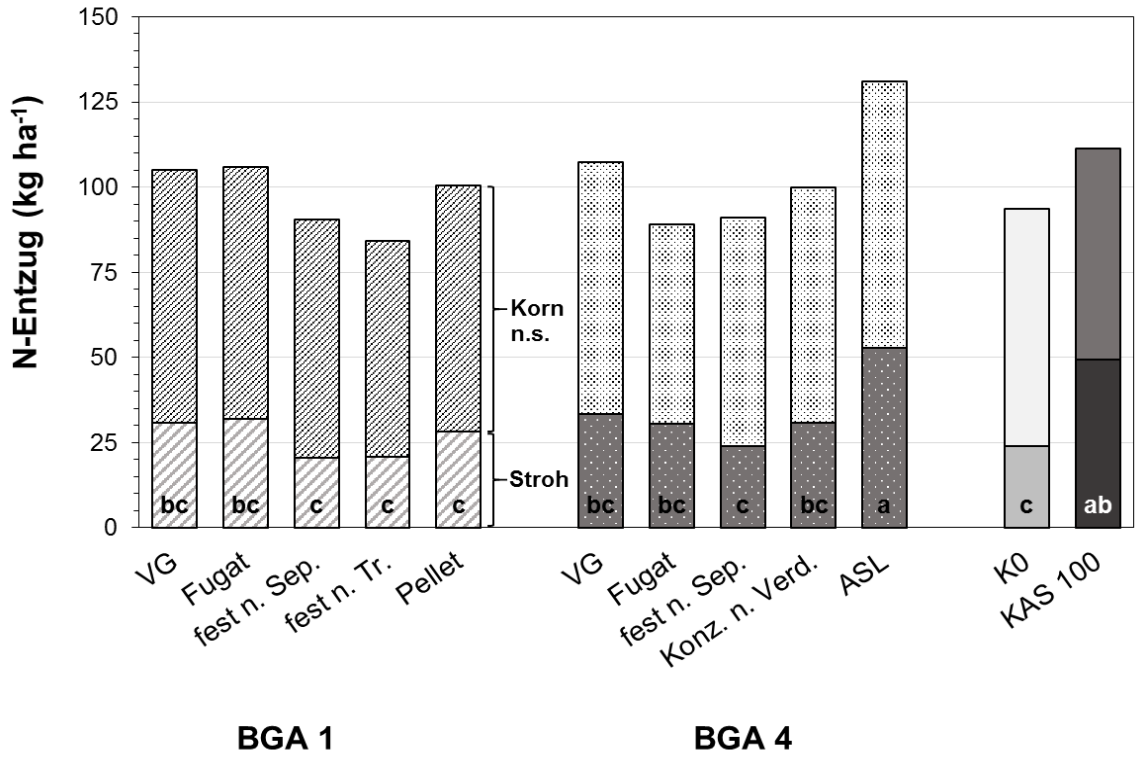


Abbildung 6: Sommerweizen 2016: N-Entzug in der oberirdischen Biomasse in kg pro ha; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); n.s.: nicht signifikant unterschiedlich; VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle; KAS 100: 100 kg N pro ha in Form von Kalkammonsalpeter.

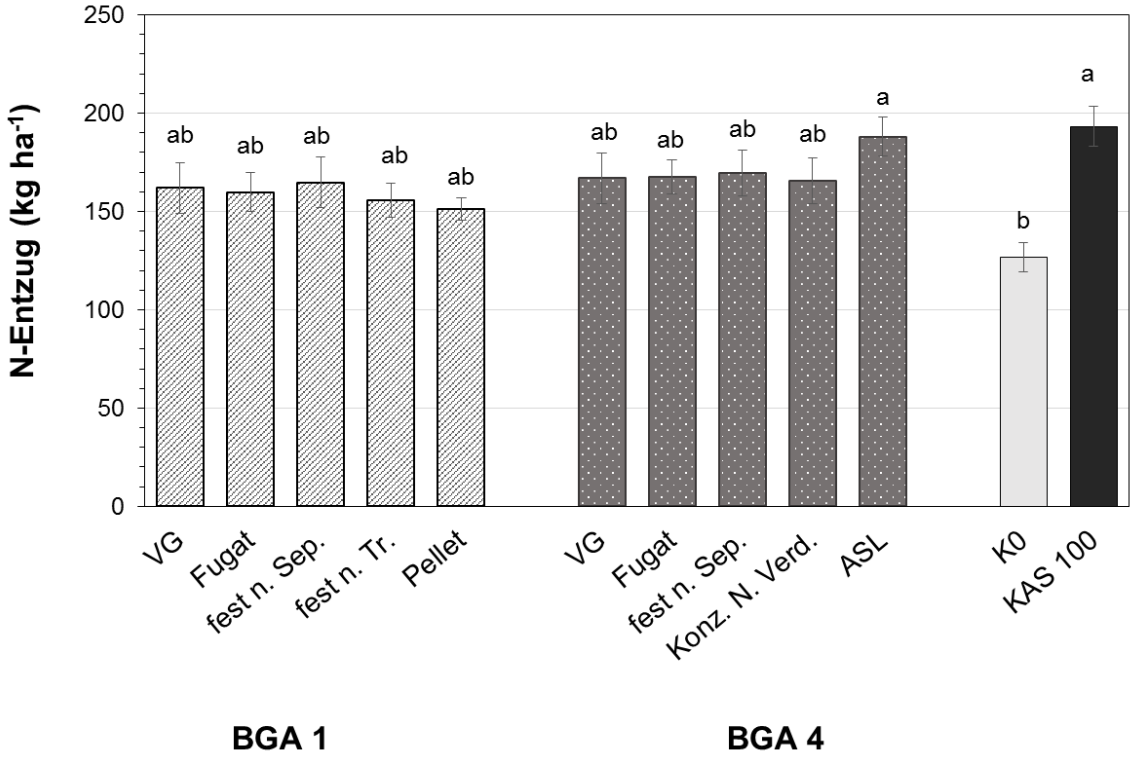


Abbildung 7: Mais 2016: N-Entzug in der oberirdischen Biomasse in kg pro ha; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle; KAS 100: 100 kg N pro ha in Form von Kalkammonsalpeter.

Betrachtet man die N-Aufnahme bei Sommerweizen, ist zu erkennen, dass sich eine ähnliche Tendenz wie beim Biomasseertrag abzeichnet. Dieser Parameter wurde in Korn- und Strohanteil separat erfasst (Abbildung 6). Der höchste N-Entzug in der oberirdischen Biomasse wurde in der ASL-Variante ermittelt und der niedrigste in den mit Feststoff nach Separierung behandelten Parzellen.

Bei Mais zeigten die verschiedenen organischen Dünger ähnliche Mittelwerte und die ungedüngte Kontrollvariante wies den signifikant niedrigsten N-Entzug auf (Abbildung 7). Ein eindeutiger positiver Düngeeffekt in Abhängigkeit von der Gärrestzusammensetzung konnte nicht nachgewiesen werden.

Um die kurzfristige N-Düngewirkung der verwendeten organischen Dünger besser nachvollziehen und dabei einen Vergleich zum praxisüblichen Mineraldünger anstellen zu können, bietet sich die Berechnung der s. g. Mineraldüngeräquivalente (MDÄ %) an. Nach Thomsen (2004) und Gutser et al. (2005) werden die Mineraldüngeräquivalente als ein Indikator für die N-Verwertung organischer Dünger betrachtet, der den Vergleich zum mineralischen Dünger in Bezug auf die N-Verfügbarkeit in verschiedenen Anwendungsjahren und auf unterschiedlichen Böden ermöglicht. Ein Beispiel: eine Applikationsmenge von 100 kg N ha^{-1} eines organischen Düngers mit MDÄ 30 % entspricht derselben N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse wie bei einer Mineraldünger-Gabe von 30 kg N ha^{-1}. Der organische Dünger kann also in diesem Fall 30 % des Mineraldüngers (bzw. dessen kurzfristige Düngewirkung) substituieren.

Zur Berechnung wurde eine Polynomfunktion 2. Grades aufgestellt, die von der tatsächlich ermittelten N-Aufnahme in der ungedüngten Kontrolle und den Mineraldünger-Varianten 25 bis 100 kg N ha^{-1} gebildet wurde (Abbildung 8).

Das Errechnen der Mineraldüngeräquivalente macht deutlich, dass die Düngewirkung einer bei der Strippung erhaltenen Ammoniumsulfat-Lösung (ASL) höher ist, als die des praxisüblichen Mineraldüngers KAS (dessen ausgebrachte Menge einer Gesamt-N-Gabe von 100 kg ha^{-1} entsprach). Diese Tendenz konnte bei beiden Feldfrüchten im Versuchsjahr 2015 beobachtet werden (Tabelle 3). Im darauffolgenden Jahr zeigte dieser tatsächlich mineralische Dünger bei Mais eine verminderte Düngewirkung. Im Gegensatz dazu blieb seine Wirkung bei Sommerweizen unverändert.

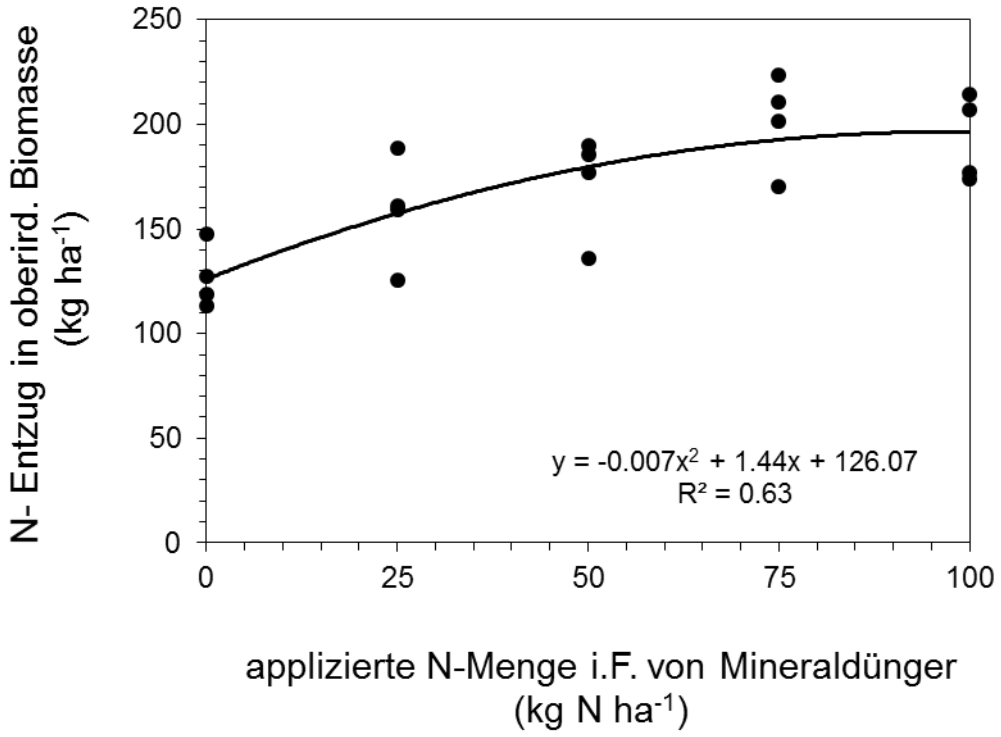


Abbildung 8: Polynomfunktion 2. Grades zur Berechnung der Mineraldüngeräquivalente bei Mais 2016; i.F.: in Form; oberird.: oberirdisch.

Tabelle 3: Kurzzeitwirkung der Gärprodukte auf die N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse von Sommerweizen und Mais, ausgedrückt in Mineraldüngeräquivalenten (% MDÄ).

Biogasanlage	Verfahren	Gärprodukt	MDÄ (%)			
			Sommerweizen		Mais	
			2015	2016	2015	2016
BGA 1	-	Vollgärrest	62	70	62	29
	Separierung	Fugat	50	70	116	27
		Feststoff	4	-2	39	32
	Trocknung	Feststoff	13	-11	-24	23
	Pelletierung	Pellets	53	52	43	19
BGA 4	-	Vollgärrest	63	79	22	35
	Separierung	Fugat	89	-5	46	35
		Feststoff	5	-3	15	38
	Verdampfung	Konzentrat	42	58	45	33
	Strippung	ASL	128	128	205	64

Eine Separierung des Vollgärrestes führte im Jahr 2015 bei beiden Kulturen und Biogasanlagen zu einer höheren Düngewirkung der flüssigen Fraktion im Gegensatz zu der der festen. Im Folgejahr war kein eindeutiger Düngeeffekt bei beiden Anlagen und Kulturen erkennbar.

Eine Pellet-Applikation führte bei Sommerweizen zu einem Anstieg der N-Aufnahme. Bei Mais konnte dieser Trend nur im Versuchsjahr 2015 gemessen werden. Die Düngewirkung der Pellet-Variante der Biogasanlage BGA 1 entsprach 43 % (Mais, 2015) der applizierten N-Düngemenge bzw. 52-53 % MDÄ (Sommerweizen) und machte damit deutlich, dass etwa 50 kg KAS je 100 kg applizierter N-Menge ersetzt werden können. Die geringste Düngewirkung erzielte die Pellet-Vorstufe („Feststoff nach Trocknung“) derselben Biogasanlage bei Mais (2015). Sie lag unterhalb der ungedüngten Kontrollvariante. Einen ähnlichen Düngeeffekt wies dieses Gärprodukt auch im Folgejahr bei Sommerweizen auf. Der Feststoff nach der Separierung beider Biogasanlagen und das Fugat (BGA 4) führten im letzten Versuchsjahr zu einem niedrigeren N-Entzug in der oberirdischen Biomasse von Sommerweizen als die ungedüngte Kontrolle.

Die Daten zeigen, dass die Düngewirkung der verwendeten Gärprodukte kulturartspezifisch, verfahrens- und witterungs- bzw. standortabhängig ist. Aus diesem Grund kann keine allgemein gültige Aussage darüber getroffen werden, in welchem Ausmaß diese organischen Dünger Mineraldünger ersetzen können. Bei Mais erbringen sie im Durchschnitt 30 % dessen, was der Mineraldünger KAS im Jahr der Ausbringung erzielt. Dies ist maßgeblich eine Folge der organisch gebundenen Nährstoffe, die im ersten Jahr noch nicht aufgenommen werden können.

Bei Sommerweizen zeigten die flüssigen Fraktionen eine sofortige Düngewirkung von ca. 70 %. Der Unterschied zum KAS wird größtenteils durch die langsame Mineralisierung des N_{org} verursacht.

Ein weiterer Parameter, der die Düngewirkung und die Nährstoffaufnahme in der oberirdischen Biomasse abbildet, ist die scheinbare N-Wiederfindung (aNR %) der verwendeten Dünger. Sie drückt aus, welcher Anteil der Nährstoffe, die mit dem Dünger ausgebracht wurden, von der Pflanze aufgenommen und für die Bildung von Biomasse verwendet wurde. Dabei wird ein möglicher Priming-Effekt nicht berücksichtigt.

Die Berechnung der N-Wiederfindung erfolgte in Anlehnung an Gunnarsson et al. (2010) und Benke et al. (2017) nach der Formel:

$$aNR\ (\%) = \frac{(N_f - N_0)}{N_{ges}} \times 100 \qquad (1)$$

wobei N_f die N-Aufnahme der mit Gärrest behandelten Parzelle, N_0 die N-Aufnahme der ungedüngten Kontrolle und N_{ges} die gesamte Applikationsmenge in kg N ha^{-1} ist. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Scheinbare Stickstoff-Wiederfindung (aNR: apparent nitrogen recovery) [%].

Biogasanlage	Verfahren	Gärprodukt	aNR (%)			
			Sommerweizen		Mais	
			2015	2016	2015	2016
BGA 1	-	Vollgärrest	34,5	11,4	16,0	35,1
	Separierung	Fugat	27,7	12,4	29,0	32,9
		Feststoff	2,3	-3,0	10,4	38,0
	Trocknung	Feststoff	7,5	-9,2	-4,8	28,8
	Pelletierung	Pellets	29,6	6,9	11,4	24,3
BGA 4	-	Vollgärrest	35,3	13,7	6,4	40,2
	Separierung	Fugat	49,7	-4,6	12,2	40,6
		Feststoff	2,7	-2,4	4,7	42,9
	Verdampfung	Konzentrat	23,7	6,3	11,8	38,8
	Strippung	ASL	71,4	37,5	50,6	61,3

Der gleiche Trend ist auch hier zu erkennen. Die Separierung führte nicht nur zu einer höheren Düngewirkung der flüssigen Fraktion im Gegensatz zu der der festen. Dieser Fraktionstyp zeigte auch eine erhöhte N-Wiederfindung des in dieser Form ausgebrachten Stickstoffes. Dieser Effekt war bei beiden Kulturen und Anlagen erkennbar, wobei die errechneten Mittelwerte in Abhängigkeit von angebauter Kultur, Substratzusammensetzung und Umweltbedingungen in den beiden Versuchsjahren sehr stark variierten. Bei Sommerweizen wiesen beide Gärrest-Fraktionen im ersten Jahr eine höhere N-Wiederfindung auf als im zweiten. Mais hingegen konnte den in organischer Form ausgebrachten Stickstoff im zweiten Versuchsjahr besser nutzen. Eine eindeutige Tendenz infolge der Weiteraufbereitung beider Fraktionstypen (fest und flüssig) konnte nicht nachgewiesen werden.

2.1.4 Gefäßversuch zur Dünge- und Humuswirkung

Der Gefäßversuch wurde im Februar 2015 angelegt. Er simulierte eine Fruchtfolge aus Deutschem Weidelgras (insgesamt drei Schnitte pro Vegetationszyklus) und Mais. Im Laufe des Jahres 2015 fanden drei Vegetationszyklen statt. Beide Kulturen wurden abwechselnd angebaut und nach Bedarf kulturartspezifisch gedüngt. Die applizierte Düngermenge betrug umgerechnet 250 kg N ha^{-1} bei Deutschem Weidelgras und 170 kg N ha^{-1} bei Mais. Es wurden Gärreste aus drei verschiedenen Biogasanlagen (BGA 1, BGA 2, BGA 3) verwendet. Als Vergleich dazu dienten der Mineraldünger KAS und eine ungedüngte Kontrolle.

Im zweiten Versuchsjahr erfolgten die Vegetationszyklen 4 (Mais), 5 (Weidelgras) und 6 (Mais). Um die Nachwirkung der verwendeten Dünger bestimmen zu können, wurde im Dezember 2016 ein zusätzlicher Zyklus begonnen. Dabei wurden dieselben Gefäße und der darin enthaltene Boden verwendet. Vor der Aussaat des Weidelgrases wurde der Boden erneut homogenisiert, aber es erfolgten keine weiteren Düngergaben.

Es wurde festgestellt, dass eine Weiteraufbereitung, sowohl der festen als auch der flüssigen Fraktion nach der Separierung, zu einer abnehmenden N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse führte. Signifikante Unterschiede wurden sowohl zwischen der ungedüngten Kontrolle und der Mineraldüngerkontrolle (KAS) als auch zwischen den verwendeten Gärresten und der Mineraldüngerkontrolle gefunden. Die KAS-Variante zeigte eine signifikant höhere N-Aufnahme im Vergleich zu den restlichen Varianten (Abbildung 8).

Eine Lufttemperatur unter 10 °C während der Jugendentwicklung bzw. 12,7 °C im Mittel während der Hauptwachstumsphase führten mit hoher Wahrscheinlichkeit beim 4. Vegetationszyklus (Mais 2) zu einer Beeinträchtigung der Ertragsbildung und der N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse (vgl. Abbildung 9, M 2). Die Maispflanzen wiesen trotz ausreichender Düngergabe eine verzögerte Keimung und ein verkürztes Wachstum auf.

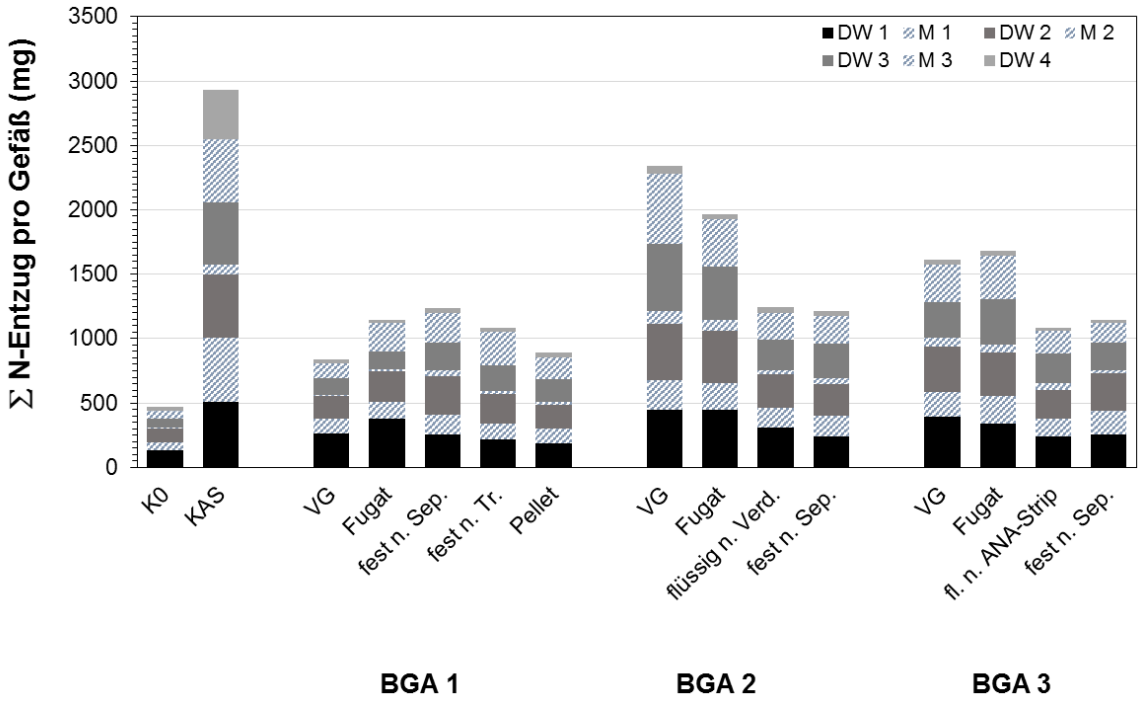


Abbildung 9: Gesamter Stickstoffentzug in der oberirdischen Biomasse als Summe aller sieben Vegetationszyklen (Dt. Weidelgras – Mais – Dt. Weidelgras – Mais – Dt. Weidelgras – Mais – Dt. Weidelgras) in mg pro Gefäß; VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; flüssig n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; fl. n. ANA-Strip: flüssiger Gärrest nach ANA-Strip; K0: ungedüngte Kontrolle; KAS: Kalkammonsalpeter.

Die statistische Bewertung der Unterschiede zwischen den Behandlungen sind in Tabelle 5 zusammengefasst worden.

Tabelle 5: Signifikanz der Unterschiede zwischen den verwendeten Düngemitteln in Bezug auf die N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse bei Dt. Weidelgras und Mais aus Abbildung 9; VZ: Vegetationszyklus; N-reicher GR: flüssiger Gärrest nach ANA-Strip. Die Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten innerhalb eines Vegetationszyklus an ($p<0,05$; HSD-Test).

Biogasanlage	Verfahren	Gärprodukt	N-Entzug pro Gefäß (mg)						
			Dt. Weidelgras				Mais		
			VZ 1	VZ 2	VZ 3	VZ 4	VZ 1	VZ 2	VZ 3
BGA 1	-	Vollgärrest	ab	a	bc	b	ab	bc	de
	Separierung	Fugat	ab	a	bc	b	ab	bc	cde
		Feststoff	ab	a	bc	b	ab	ab	cde
	Trocknung	Feststoff	ab	a	bc	b	ab	bc	cde
	Pelletierung	Pellets	a	a	bc	b	a	bc	cde
BGA 2	-	Vollgärrest	ab	a	a	b	b	a	a
	Separierung	Fugat	ab	a	b	b	b	a	abc
		Feststoff	ab	a	ab	b	ab	abc	cde
	Verdampfung	Konzentrat	ab	a	ab	b	ab	abc	cde
BGA 3	-	Vollgärrest	ab	a	ab	b	b	ab	bcd
	Separierung	Fugat	ab	a	ab	b	b	ab	abc
		Feststoff	ab	a	b	b	ab	ab	cde
	Strippung	N-reicher GR	ab	a	ab	b	ab	ab	cde
		K0	a	a	c	b	a	c	c
		KAS	b	a	ab	a	c	ab	ab

Der Feststoff nach einer Separierung des Vollgärrestes der Biogasanlagen BGA 2 und BGA 3 beeinflusste die N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse der Kulturpflanzen negativ. Im Gegensatz dazu zeigte dieser Feststoff der BGA 1 einen positiven Düngungseffekt und somit einen höheren N-Entzug.

Um die N-Aufnahme besser nachvollziehen und die tatsächliche Nachwirkung der unterschiedlichen Dünger bestimmen zu können, wurde jeweils für Vegetationszyklus, Kultur und Düngemittel die scheinbare N-Wiederfindung in der oberirdischen Biomasse berechnet. Auch hier wurde ein möglicher Priming-Effekt nicht berücksichtigt. In Anlehnung an Muñoz et al. (2004), Ladha et al. (2005), Hartl und Erhart (2005), Abbasi und Khizar (2012) und Sieling et al. (2013) wurde folgende Formel verwendet:

$$aNR\ (\%) = \frac{N_f - N_0}{N_{appl}} \times 100 \qquad (2)$$

Dabei entspricht N_f dem N-Entzug der Gärrest-Variante, N_0 der N-Entzug der ungedüngten Kontrolle und N_{appl} der applizierten Düngermenge in kg N ha^{-1}.

Betrachtet man die N-Wiederfindung der beiden Kulturen separat, so ist zu erkennen, dass bei Mais mit jedem weiteren Vegetationszyklus eine Tendenz zunehmender Wiederfindung besteht (unabhängig vom applizierten Gärrest) (Tabelle 6). Bei Weidelgras hingegen hing dieser Parameter von der Biogasanlage ab, was auf die unterschiedlichen Ausgangssubstrate zurückzuführen ist. Innerhalb der Biogasanlage BGA 1 konnte ein positiver Effekt der Weiteraufbereitung des Feststoffes im Vergleich zu Vollgärrest und Fugat festgestellt werden. Bei den Behandlungen „Pellet“ und „Feststoff nach Separierung“ wurde zudem eine höhere Nachwirkung nachgewiesen.

Eine umgekehrte Tendenz ist bei den Gärresten der beiden anderen Anlagen erkennbar. Innerhalb der BGA 2 wies der Vollgärrest, verglichen mit den restlichen organischen Düngern, die höchste N-Nachwirkung auf.

In der KAS-Variante konnte bei Mais eine N-Wiederfindung von über 100 % ermittelt werden. Einen ähnlichen Effekt zeigte auch der Vollgärrest der Anlage BGA 2 im 6. Vegetationszyklus (Mais 3). Dies kann eine Folge der Mineralisation bodenbürtigen Stickstoffs sein. Die genannten Varianten wiesen über die gesamte Versuchsdauer ein stärkeres Wachstum der ober- und unterirdischen Pflanzenteile auf als die aufbereiteten Gärreste.

Tabelle 6: Apparente N-Wiederfindung (aNR: apparent N recovery) in % in der oberirdischen Biomasse bei Dt. Weidelgras und Mais; alle Vegetationszyklen (VZ), alle Erntetermine

Biogasanlage	Verfahren	Gärprodukt	aNR (%)						
			Dt. Weidelgras				Mais		
			VZ 1	VZ 2	VZ 3	VZ 4	VZ 1	VZ 2	VZ 3
BGA 1	-	Vollgärrest	27,8	13,8	13,2	0,9	18,6	0,1	17,3
	Separierung	Fugat	53,4	28,6	15,2	-0,1	21,2	0,9	51,3
		Feststoff	27,1	40,8	30,5	3,1	29,1	12,7	54,9
	Trocknung	Feststoff	17,6	25,4	26,4	0,8	21,2	6,5	64,4
	Pelletierung	Pellets	10,9	16,2	22,8	3,1	19,0	3,7	35,4
BGA 2	-	Vollgärrest	67,6	69,9	96,9	8,2	56,1	30,3	154,9
	Separierung	Fugat	67,4	64,9	73,6	3,6	47,2	24,9	98,6
		Feststoff	23,0	29,7	35,1	3,2	32,9	9,0	48,4
	Verdampfung	Konzentrat	38,8	31,4	42,9	3,6	29,7	11,8	47,7
BGA 3	-	Vollgärrest	57,0	51,0	44,3	2,1	42,3	21,9	74,2
	Separierung	Fugat	44,8	50,3	60,4	2,0	48,7	17,3	89,2
		Feststoff	27,2	39,1	35,2	-0,3	39,6	14,9	36,1
	Strippung	N-, S- reicher GR	22,7	23,7	31,3	-1,5	26,5	4,3	29,8
		KAS	81,6	82,5	89,6	77,4	139,0	23,7	136,4

2.1.5 Inkubationsversuch zur Messung der CO_2-Entwicklung eines Bodens nach Gärrestzugabe

Im Rahmen dieses Experimentes sollten weiterführende Informationen zur Abbaustabilität der organischen Substanz in den ausgewählten Gärprodukten ermittelt werden, um Aussagen zur relativen Humusreproduktionsleistung treffen zu können. Folgende Gärreste wurden untersucht:

- Feststoff nach Separierung (BGA 1)
- Feststoff nach Trocknung (BGA 1)
- Pellet (BGA 1)
- Vollgärrest (BGA 4)
- Fugat (BGA 4)
- Konzentrat nach Vakuumverdampfung (BGA 4).

Die applizierte Düngermenge entsprach der des Feldversuches zur Abschätzung der N_2O-Emissionen (170 kg N pro ha). Der Versuch wurde in 2,5 L Einmachgläsern aufgebaut, die jeweils 700 g fein gesiebten, homogenisierten, luftgetrockneten Lehmboden enthielten. Die Inkubation fand bei 20 °C und 60 % der Wasserhaltekapazität (WHK) des Bodens (% FK) in Brutschänken statt. Das aus dem inkubierten Boden emittierte CO_2 wurde mithilfe einer NaOH-Falle aufgefangen. Um die emittierte Menge zu bestimmen, wurde die Natronlauge bis zum Farbumschlag mit Salzsäure, Bariumchlorid und einem Tropfen Phenolphtalein titriert. Die Menge der dafür benötigten Salzsäure (HCl) wurde für die Berechnung der täglichen CO_2-Entwicklung in mg CO_2-C pro kg trockenen Boden verwendet. Um den Grad der Abbaubarkeit dieser Gärprodukte zu bestimmen, wurde die tägliche bodenbürtige CO_2-Flussrate, auch substratinduzierte Bodenatmung genannt, über einen Zeitraum von zwei Monaten nach der Düngerausbringung erfasst. Zu Beginn des Versuches wurden täglich Proben genommen, die nach der dritten Woche auf dreimal wöchentlich reduziert wurden.

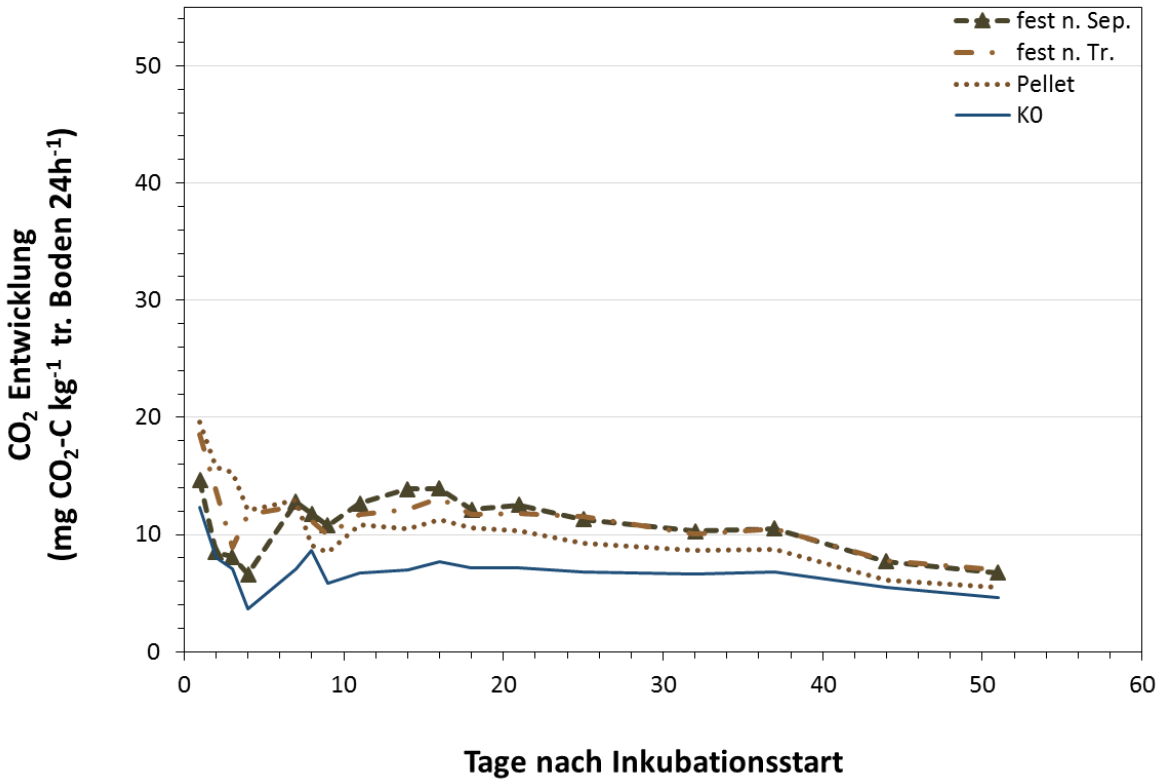


Abbildung 10: Ermittelte CO_2-C-Flussraten der verwendeten Gärprodukte in mg CO_2-C pro kg trockenen Boden und Tag (BGA 1).

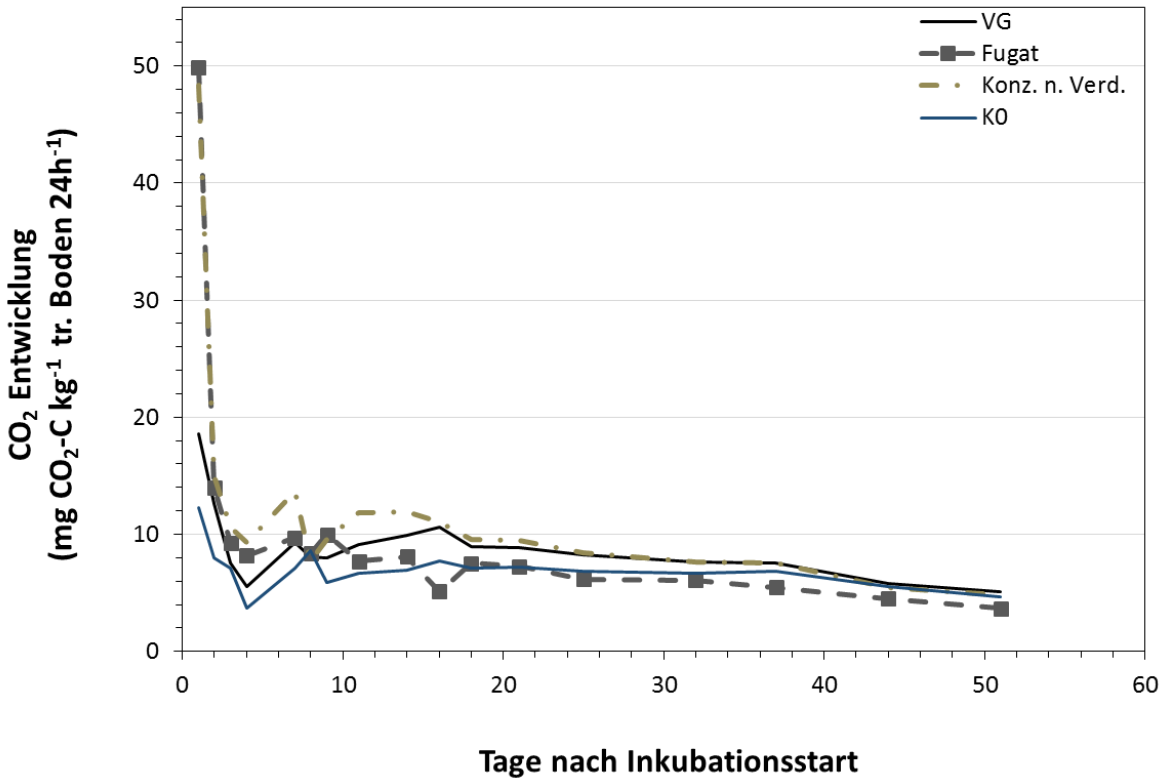


Abbildung 11: Ermittelte CO_2-C-Flussraten der verwendeten Gärprodukte in mg CO_2-C pro kg trockenen Boden und Tag (BGA 4).

Die Ausbringung und Einarbeitung der Feststoffe führte während der ersten zwei Tage zu einer geringeren CO_2-Entwicklung als die des Fugats und des Konzentrats nach Verdampfung (Abbildung 10). Im Gegensatz dazu blieb die substratinduzierte Bodenatmung der mit Feststoffen gedüngten Gefäße im Verlauf des ersten Monats nach dem Inkubationsbeginn tendenziell höher als die der flüssigen Gärreste. Mögliche Erklärungsansätze wären hier zum einen eine durch die Gärrestzugabe induzierte Erhöhung der mikrobiellen Aktivität im Boden und die daraus resultierende Umsetzung dort schon vorhandener organischer Substanz in Folge einer Sauerstoffzufuhr bei der Einarbeitung. Zum anderen kann der in anorganischer Form vorliegende Kohlenstoff (gelöste bi-Karbonate und Karbonate) als CO_2 abgegeben werden.

Die Berechnung der kumulativen CO_2-Emissionen ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den verwendeten Feststoffen (Abbildung 12). Im Gegensatz dazu wurde mit zunehmendem Aufbereitungsgrad der flüssigen Fraktion eine Tendenz ansteigender kumulativer Emissionen festgestellt. Dort wies das Konzentrat nach Verdampfung die höchsten CO_2-Emissionen auf. Sie betrugen im Mittel 208 mg CO_2-C pro kg trockenen Boden. Die niedrigsten Emissionen hingegen wurden in den mit Vollgärrest gedüngten Gefäßen ermittelt. Sie lagen im Mittel bei 157 mg CO_2-C pro kg trockenen Boden.

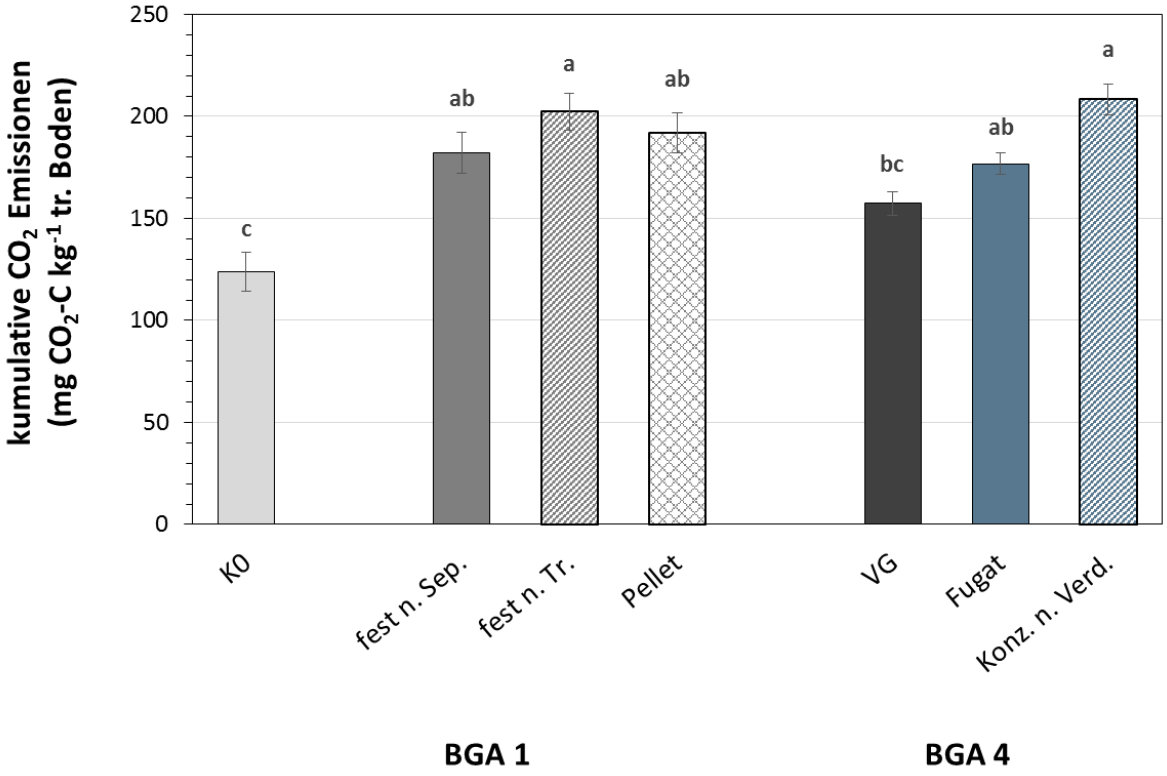


Abbildung 12: Kumulative Emissionen der verwendeten Gärprodukte über einen Zeitraum von zwei Monaten nach ihrer Ausbringung auf brachliegendem Boden; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; K0: ungedüngte Kontrolle.

Abbildung 13 zeigt einen möglichen Zusammenhang zwischen den ansteigenden kumulativen CO_2-Emissionen mit einer Weiteraufbereitung des Fugats und dem Anteil an Lignin und Cellulose in der organischen Substanz dieser Gärreste.

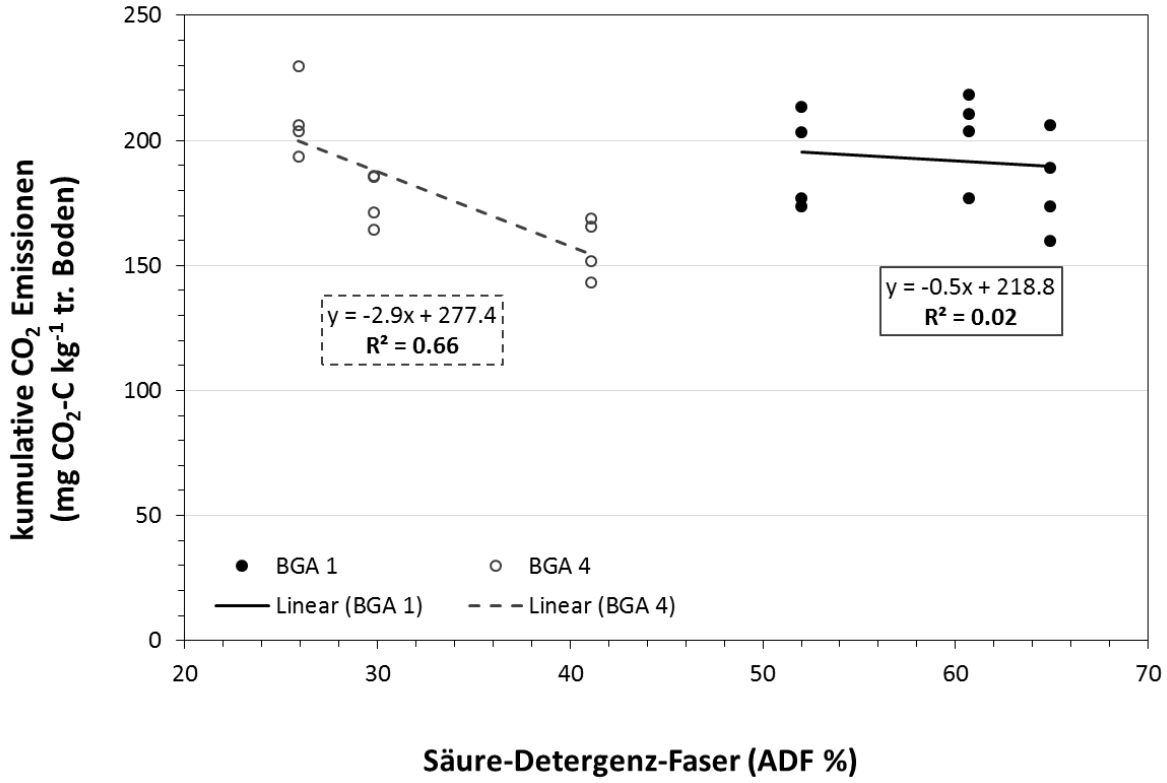


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen ADF-Gehalt (Gehalt an Cellulose und Lignin) und ermittelte kumulative CO_2-Emissionen.

Mit einem zunehmenden Anteil an schwer abbaubarer organischer Substanz nehmen die kumulativen Emissionen ab. Leicht abbaubare Kohlenstoffe werden zu Beginn der Inkubation in Form von CO_2 freigesetzt. Betrachtet man hingegen die Feststoffe, so ist zu erkennen, dass diese zwei Parameter nicht miteinander korrelieren. Hier konnte kein Zusammenhang zwischen Gärrestzusammensetzung und kumulativen CO_2-Emissionen nachgewiesen werden.

2.1.6 Feldversuch zur Abschätzung der N_2O-Emissionen nach der Gärrestausbringung

Der Feldversuch zur Abschätzung der N_2O-Emissionen wurde im Jahr 2015 (April – Juni) und im Jahr 2016 (April – Juni) durchgeführt. Er fand auf unbewachsenem Boden statt. Dabei wurden die bodenbürtigen N_2O-Emissionen in einem Zeitraum von sieben Wochen nach der Gärrest-Applikation dreimal wöchentlich erfasst. Im Rahmen dieses Versuches wurden dieselben Gärreste wie bei den oben beschriebenen Gefäß- und Freilandversuchen verwendet. Die applizierte Düngermenge betrug 170 kg N pro ha. Als Vergleichsvariante galt eine unbehandelte Kontrolle.

Die Ergebnisse des ersten Versuchsjahres zeigten, dass eine Weiteraufbereitung der Gärreste zu einer Reduzierung der N_2O-Emissionen führt. Eine Ausnahme stellten die Pellets der Biogasanlage BGA 1 und die feste Fraktion nach der Separierung der Biogasanlage BGA 4 dar. Die Applikation dieser Produkte führte unter starkem, langanhaltendem Regen und gleichzeitig hoher Luft- und Bodentemperatur zu den höchsten ermittelten Flussraten während des Messzeitraumes. Sie betrugen 930 bzw. 378 µg N_2O-N m^{-2} h^{-1} (Abbildungen 14 und 15).

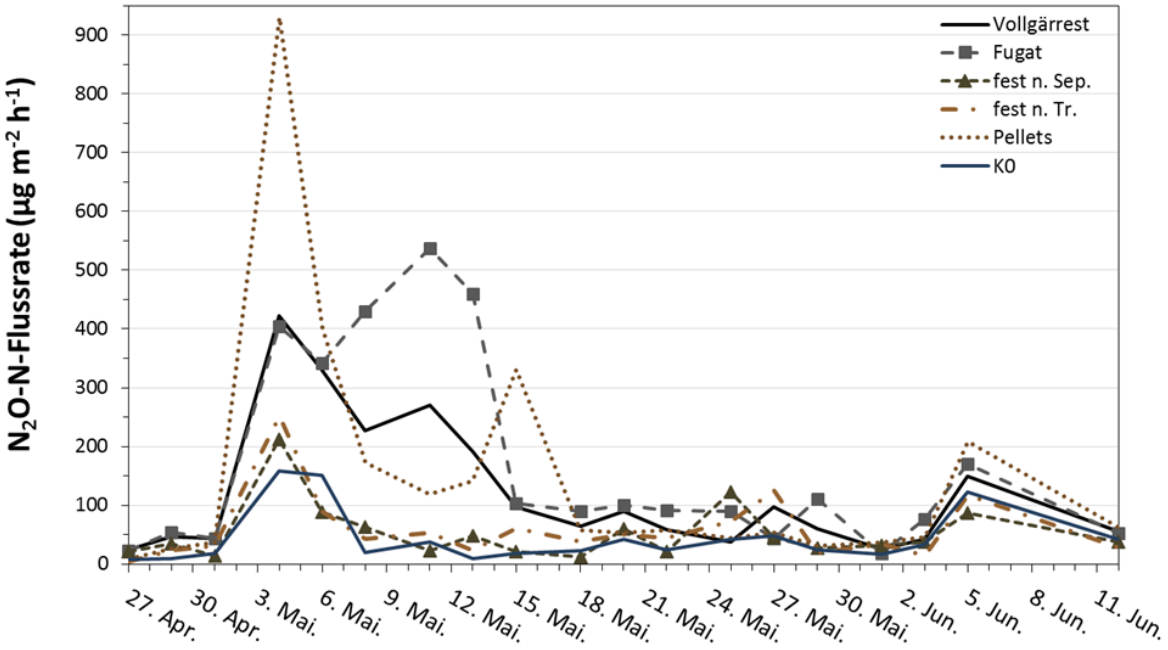


Abbildung 14: N_2O-N-Flussrate in µg m^{-2} h^{-1} (BGA 1).

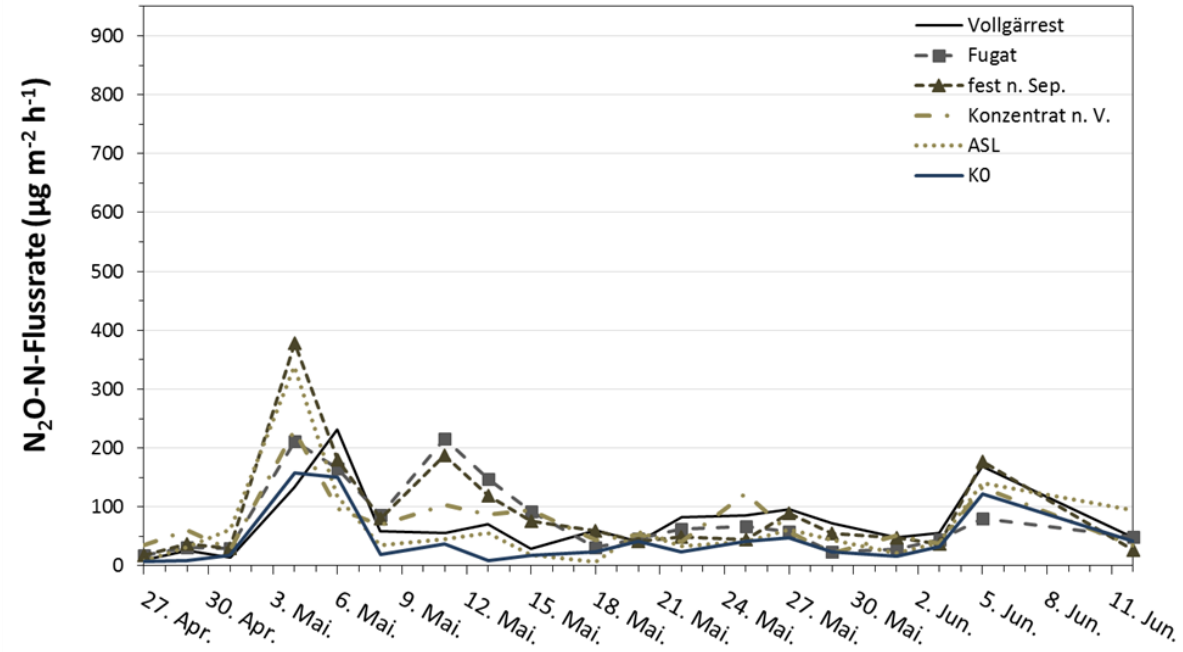


Abbildung 15: N_2O-N-Flussrate in µg m^{-2} h^{-1} (BGA 4).

Betrachtet man hingegen die kumulativen Emissionen des ersten Versuchsjahres, so zeigt sich, dass das Fugat der Biogasanlage BGA 1 die höchsten Emissionen über den gesamten Messzeitraum aufwies (Abbildung 16). Sie lagen bei 2 kg N_2O-N ha^{-1}. Die niedrigsten Emissionen erzielte die feste Fraktion nach der Separierung derselben Biogasanlage. Sie betrugen 0,7 kg N_2O-N ha^{-1}.

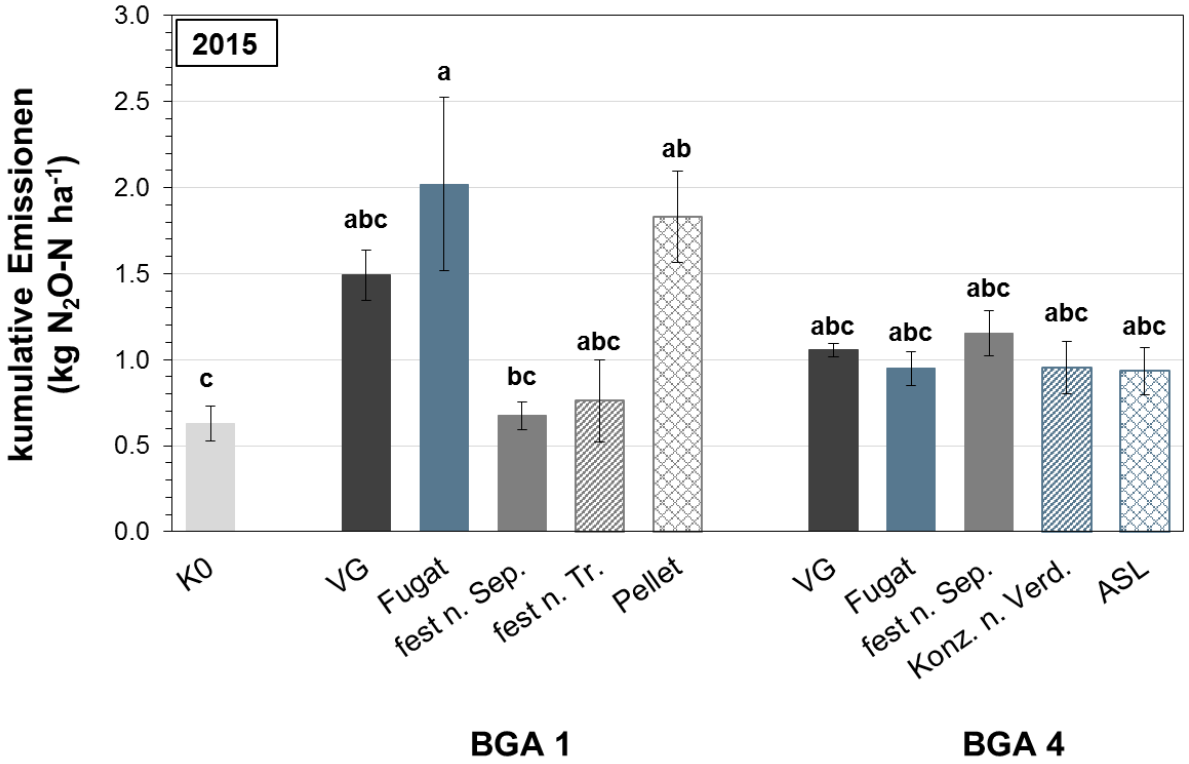


Abbildung 16: Kumulative N_2O-Emissionen der verwendeten Gärprodukte über einen Zeitraum von drei Monaten nach ihrer Ausbringung auf brachliegendem Land im Jahr 2015; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei p<0,05 (HSD-Test); VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle.

Im Folgejahr konnte ein ähnliches Muster erfasst werden. Die Pellet-Variante wies erneut die höchste N_2O-N-Flussrate auf. Sie lag im Mittel bei 294 µg N_2O-N m^{-2} h^{-1} und wurde eine Woche nach Versuchsbeginn gemessen. Im zweiten Versuchsjahr wurden deutlich niedrigere Flussraten und

kumulative N_2O-Emissionen gemessen. Sie reichten von 0,19 kg N_2O-N ha^{-1} bei der ungedüngten Kontrollvariante bis zu 0,99 kg N_2O-N ha^{-1} beim Vollgärrest der Anlage BGA 4 (Abbildung 17). Der Messzeitraum des Jahres 2016 war durch weniger Niederschlag und geringere Lufttemperaturen gekennzeichnet, was eine mögliche Erklärung für die geringeren Gasverluste ist.

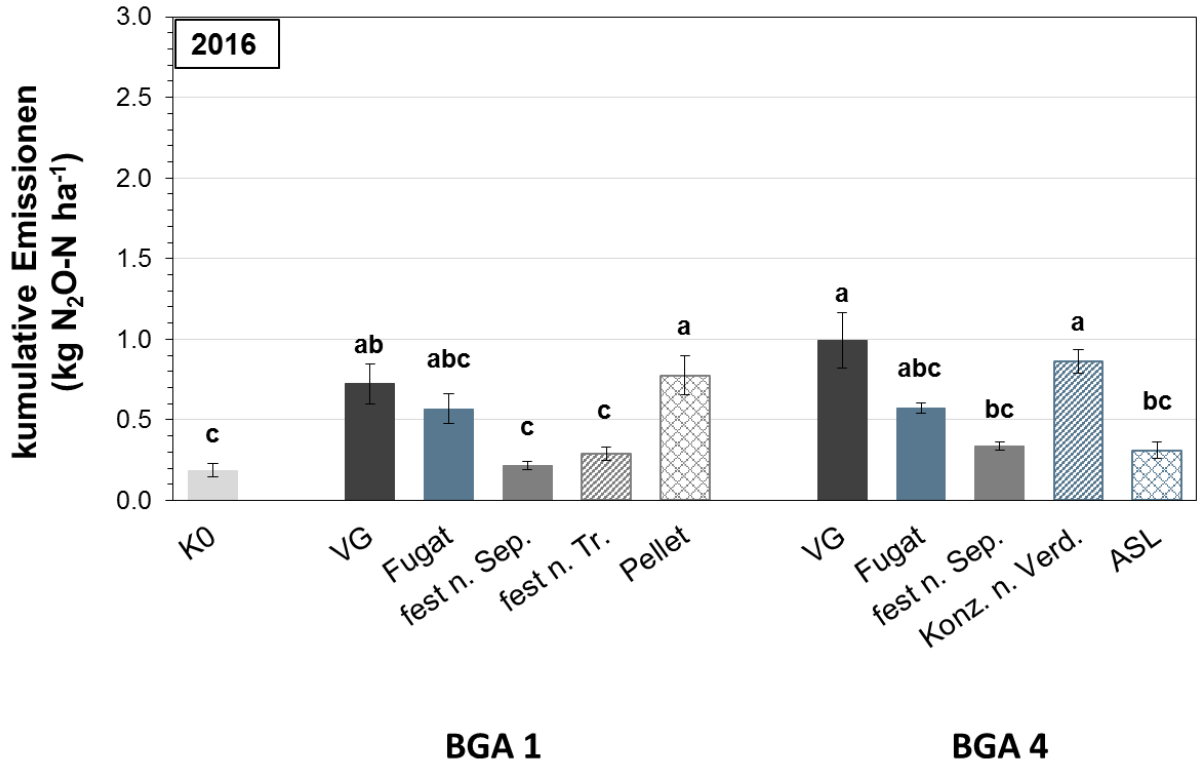


Abbildung 17: Kumulative N_2O-Emissionen der verwendeten Gärprodukte über einen Zeitraum von drei Monaten nach ihrer Ausbringung auf brachliegendem Land im Jahr 2016; Fehlerbalken: Standardfehler; Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede bei $p<0,05$ (HSD-Test); VG: Vollgärrest; fest n. Sep.: Feststoff nach Separierung; fest n. Tr.: Feststoff nach Trocknung; Konz. n. Verd.: Konzentrat nach Vakuumverdampfung; ASL: Ammoniumsulfat-Lösung; K0: ungedüngte Kontrolle.

Die Weiteraufbereitung beider Fraktionen führte auch im zweiten Versuchsjahr zu einem signifikanten Anstieg der kumulativen N_2O-Emissionen. Im Gegensatz dazu führte die Separierung des Vollgärrestes beider Anlagen zu signifikant niedrigeren kumulativen Emissionen des Feststoffes im Vergleich zum Fugat.

2.2 Verwertung

Auf der wissenschaftlichen Ebene wurden die Ergebnisse sowohl in forschungsorientierten Publikationen, als auch in Vorträgen und Postern auf wissenschaftlichen Tagungen vorgestellt. Zudem sind sie Inhalt einer Doktorarbeit und werden an entsprechender Stelle eingehend erläutert und diskutiert.

Es wurden im Rahmen dieses Vorhabens bereits etablierte Untersuchungs- bzw. Analyse-Methoden aus dem Bereich der Bodenkunde und der Pflanzenernährung auf den Gärprodukt-Einsatz in der Landwirtschaft angepasst und verifiziert. Darunter sind z.B. die im Kapitel 2 „Stand der Technik“ erwähnten Analyse-Methoden nach VDLUFA und die Methode nach van Soest zu verstehen, welche ursprünglich für die Analyse von Futtermitteln entwickelte wurde.

Des Weiteren wurde der Gärprodukt-Einsatz praxisnah durchgeführt, indem die applizierte Düngermenge nach dem kulturartspezifischen Pflanzenbedarf erfolgte. Ein Teil der durchgeführten Versuche wurde im Kontext verschiedener Bachelor-, Master- und Projektarbeiten realisiert. Auf diese Weise wurde eine Integration von Studierenden der Studiengänge „Agrarwissenschaften“ und „Nachwachsende Rohstoffe und Bioenergie“ in das Projekt gewährleistet.

Auf Grund der zeitlichen Begrenzung war es nicht möglich, die vollständige Wirkungsweise des Gärproduktes „Pellet“ nachvollziehen und erklären zu können. Hierfür werden zusätzliche, auf die Zusammensetzung und Beschaffenheit eingehende Untersuchungen benötigt. Dies ist insbesondere deshalb interessant, da Pellets bereits erfolgreich als Dünger vermarktet werden. Die Autoren halten eine Fortsetzung der Forschungsarbeiten an diesem Produkt für wichtig und aufschlussreich.

Ein weiterer zu untersuchender Aspekt ergab sich aus der Tatsache, dass das Verfahren, die Temperatur und die Dauer des Trocknungs-Verfahrens nur unzureichend berücksichtigt wurden.

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten dieses Teilvorhabens basieren auf dem generierten Know-How über die Erzeugung kulturspezifischer Düngemittel aus Biogas-Gärresten. Die gewonnenen Erkenntnisse können zur Optimierung bereits etablierter Verfahrensketten genutzt werden und damit die Wirtschaftlichkeit bestehender Biogasanlagen steigern. Zudem tragen Veröffentlichungen auf dem Fachseminar der Güte Gemeinschaft Gärprodukte e.V. und eine geplante Veröffentlichung in der Zeitschrift „DLG-Mitteilungen“ zum Wissenstransfer in die Landwirtschaft bzw. die Biogas-Branche bei. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass die im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse beim Nutzer ankommen und auch tatsächlich realisiert werden können (Kapitel 4: Veröffentlichungen). Es ist überdies anzunehmen, dass die gesamte Biogas-Branche von einer verbesserten Gärrest-Nutzung und dem Schließen der Nährstoffkreisläufe profitiert und durch diese und ähnliche Konzepte zurück auf die Erfolgsspur geführt werden kann.

2.3 Erkenntnisse von Dritten

Den Autoren sind keine Ergebnisse Dritter bekannt, die sich auf die Relevanz bzw. Realisierbarkeit des Vorhabens auswirken können.

2.4 Veröffentlichungen

Der Review – Artikel Möller, K.: „Effects of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions and soil biological activity. A review” ist im Jahr 2015 in der Zeitschrift “ Agronomy for Sustainable Development” erschienen. Er enthält eine Übersicht der Versuchsergebnisse zur Wirkung der Gärrestausbringung auf den Boden.

Die Ergebnisse des Freilandversuches zur Düngewirkung werden, zusammen mit den entsprechenden Energie- und Stoffströmen der dabei verwendeten Gärprodukte, momentan in Form einer wissenschaftlichen Publikation zum Thema „Influence of digestate processing technique on nitrogen mass flow and concentration and on N uptake, biomass yield and soil fertility“ zusammengefasst. Sie wird im Laufe des Jahres 2017 bei der internationalen Zeitschrift „Renewable Energy“ eingereicht.

Eine weitere wissenschaftliche Publikation, die die Klimarelevanz der Gärreste in Bezug auf die N_2O-Emissionen im Freiland- und Gefäßversuch darstellt, wird bis zum 30. Juni 2017 bei der internationalen Zeitschrift „Bioresource Technology“ eingereicht.

Des Weiteren ist eine dritte wissenschaftliche Publikation im Rahmen einer kumulativen Dissertation bis zum Ende des Jahres 2017 geplant. Die Gesamtergebnisse werden in dieser Forschungsarbeit zusammengefasst.

Um die in diesem Projekt gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse an Anlagenbetreiber und Landwirte weiterreichen zu können, wurden sie auf nationalen und internationalen Tagungen und Konferenzen, wie z.B.

- 127. VDLUFA – Kongress: I. Petrova, P. Seiz, C. Pekrun, K. Möller. 2015. Einfluss der Aufbereitung von Gärresten auf Zusammensetzung, Düngewirkung und N_2O-Emissionen nach Ausbringung, Vortrag und schriftlicher Beitrag in VDLUFA-Schriftenreihe.

- 128. VDLUFA – Kongress: I. Petrova, C. Pekrun, K. Möller. 2016. Einfluss der Aufbereitung von Gärresten auf ihre Zusammensetzung und die Düngewirkung bei Mais und Sommerweizen, Vortrag und kurze Zusammenfassung „Abstract“.

- 59. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V.: I. Petrova, C. Pekrun, K. Möller. 2016. Einfluss der Aufbereitung von Gärresten auf ihre Zusammensetzung und die Düngewirkung bei Kulturpflanzen, Vortrag und schriftlicher Beitrag in Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V.

- Fachseminar 2016 der Güte Gemeinschaft Gärprodukte e.V.: I. Petrova, C. Pekrun, K. Möller. 2016. Einfluss der Aufbereitung von Gärresten auf Zusammensetzung, Düngewirkung und N_2O-Emissionen nach Ausbringung der Aufbereitungsprodukte, Vortrag.

- 1st International Conference Bioresource Technology for Bioenergy, Bioproducts & Environmental Sustainability, Sitges, Spanien: I. Petrova, M. Fechter, C. Pekrun, K. Möller. 2016. Influence of digestate processing technique on nitrogen mass flow and concentration as

an important factor for N uptake, biomass yield and soil fertility, Poster-Vortrag und geplante wissenschaftliche Publikation.

- International Conference – Progress in Biogas IV: I. Petrova, C. Pekrun, K. Möller. 2016. The influence of digestate treatment and composition on N_2O and CO_2 emissions after the application on fallow land, Vortrag und zwei geplante wissenschaftliche Publikationen.

- K. Möller, 2016: Vortrag mit dem Titel “Einfluss auf Zusammensetzung, Dünge- und Humuswirkung durch die Gärproduktaufbereitung” auf der Eurotier 2016 in Hannover.

vorgestellt. Ein weiterer Artikel zum Thema „Düngewirkung verschieden aufbereiteter Gärprodukte“ ist in Planung und soll in den DLG-Mitteilungen im Laufe dieses Jahres erscheinen.

Erkenntnisse dieses Projektes sollen auch in einem „Handbuch der organischen Düngung“ einfließen, das vom Projektleiter K. Möller als Mitherausgeber derzeit für den Agrimedia-Verlag vorbereitet wird.

Randaspekte der Thematik dieses Projektes wurden auch in der nachfolgenden Publikation veröffentlicht:

Benke, A.P., A.-M. Rieps, I. Wollmann, I. Petrova, S. Zikeli, K. Möller (2017): Fertilizer value and nitrogen transfer efficiencies with clover-grass ley biomass based fertilizers. Nutrient Cycling in Agroecosystems 107, 395-411.

Literatur

Abbasi, M. K.; Khizar, A. (2012): Microbial biomass carbon and nitrogen transformations in a loam soil amended with organic–inorganic N sources and their effect on growth and N-uptake in maize. Ecological Engineering 39, pp 123– 132

Benke, A. P.; Rieps, A.-M.; Wollmann, I.; Petrova, I.; Zikeli, S.; Möller, K. (2017): Fertilizer value and nitrogen transfer efficiencies with clover-grass ley biomass based fertilizers. Nutr Cycl Agroecosyst 107, pp 395 – 411

Chadwick, D. R.; John, F.; Pain, B. F.; Chambers, B. J. and Williams, J. (2000): Plant uptake of nitrogen from the organic nitrogen fraction of animal manures: a laboratory experiment. Journal of Agricultural Science 134, pp 159 – 168

de la Fuente, C.; Alburquerque, J. A.; Clemente, R.; Bernal, M. P. (2013). Soil C and N mineralisation and agricultural value of the products of an anaerobic digestion system. Biol Fertil Soils 49, pp 313–322

Duong, Q. V.; Loos, T. (2007). Plant based organic fertilizer – suitable nutrient source for organic vegetable production. Report Paper

Fouda, S. E-S. (2011). Nitrogen availability of biogas residues. Dissertation. Technische Universität München

Gunnarsson, A.; Bengtsson, F. and Caspersen, S. (2010). Use efficiency of nitrogen from biodigested plant material by ryegrass. J. Plant Nutr. Soil Sci. 173, pp 113–119

Gutser, R.; Ebertseder, Th.; Weber, A.; Schraml, M. and Schmidhalter, U. (2005). Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. J. Plant Nutr. Soil Sci. 168, pp 439–446

Hartl, W. and Erhart, E. (2005). Crop nitrogen recovery and soil nitrogen dynamics in a 10-year field experiment with biowaste compost. J. Plant Nutr. Soil Sci. 168, pp 781–788

Hutchinson, G. L.; Mosier, A. R. (1981). Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. Soil Science Society of America Journal 45(2), pp 311-316

Ladha, K. L.; Pathak, H.; Krupnik, T. J.; Six, J. and van Kessel, C. (2005). Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. Advances in Agronomy 87, pp 85 – 156

Möller, K. (2015). Effects of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions, and soil biological activity. A review. Agron. Sustain. Dev. 35, pp 1021–1041

Muñoz, G. R.; Kelling, K. A.; Powell, J. M.; Speth, P. E. (2004). Comparison of estimates of first-year dairy manure nitrogen availability or recovery using nitrogen-15 and other techniques. J. Environ. Qual. 33, pp 719-727

Sabahi, H.; Schulz, R.; Müller, T. and Li, Z. (2009). Nitrogen turnover of legume seed meals as affected by seed meal texture and quality at different temperatures. Archives of Agronomy and Soil Science 55(6), pp 671–682

Sieling, K.; Herrmann, A.; Wienforth, B.; Taube, F.; Ohl, S.; Hartung, E.; Kage, H. (2013). Biogas cropping systems: Short term response of yield performance and N use efficiency to biogas residue application. European Journal of Agronomy 47, pp 44-54

Thomsen, I. K. (2004). NitrogeN-use efficiency of ^{15}N-labelled poultry manure. Soil Sci. Soc. Am. J. 68, pp 538–544

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

GÄRWERT - GÄRprodukte ökologisch optimiert und WERTorientiert aufbereiten und vermarkten
Teilvorhaben 4: Energie- und Treibhausgasbilanzen

Zuwendungsempfänger:

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

Förderkennzeichen:

13EKF022 bzw. 22402213

Laufzeit:

01.10.2013 bis **31.03.2017**

Monat der Erstellung:

06/2017

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Zuwendungsempfänger und ausführende Stelle:

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)
Bartningstraße 49
64289 Darmstadt

Zuwendungsgeber:

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
Hofplatz 1
18276 Gülzow-Prüzen

Kooperationspartner:

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen
Institute for International Research on Sustainable Management and Renewable Energy (ISR)
Neckarsteige 6-10
72622 Nürtingen

Technische Universität Berlin
Fachgebiet Verfahrenstechnik
Ackerstraße 76
13355 Berlin

Universität Hohenheim
Institut für Kulturpflanzenwissenschaften
Fachgebiet Düngung und Bodenstoffhaushalt
Fruwirthstr. 20
70593 Stuttgart

Bearbeitung:

Ursula Roth
Dr. Sebastian Wulf

Inhalt

1 Ziele ... 8
1.1 Aufgabenstellung ... 8
1.2 Stand der Technik ... 8
1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen ... 8

2 Beschreibung der Methodik ... 8
2.1 Allgemeines Vorgehen ... 8
2.2 Betrachtete Aufbereitungsverfahren ... 10

3 Verwendete Kennzahlen und Annahmen ... 14
3.1 Aufbereitung ... 14
3.2 Lagerung ... 16
3.3 Transport ... 18
3.4 Ausbringung ... 18
3.5 Mineraldüngerersatz und Nährstofferlöse ... 21
3.6 Berücksichtigung der Wärmenutzung ... 23
3.7 Szenarien der Nährstoffentfrachtung ... 24

4 Ergebnisse und Diskussion ... 25
4.1 Aufbereitungsverfahren: Stoffströme, Energiebedarf und Treibhausgasemissionen 25
4.2 Entfrachtungsziel alle Nährstoffe (Entfrachtungsszenario „100%“) ... 29
4.1 Entfrachtungsziel 50% des anfallenden Phosphors (Entfrachtungsszenario „P50“). 36
4.2 Entfrachtungsziel 50% des anfallenden Stickstoffs („N50“) ... 41
4.3 Gegenüberstellung der drei Szenarien ... 46
4.4 Sensitivitäten ... 47

5 Schlussfolgerungen ... 52

6 Verwertung der Ergebnisse ... 54

Literatur ... 55

Anhang ... 56

Danksagung ... 63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozessschema der Gärrestseparierung mit Pressschnecke 11

Abbildung 2: Prozessschema der Gärrestaufbereitung durch Separierung und anschließende Trocknung ..... des Feststoffs in einem Bandtrockner. 12

Abbildung 3: Prozessschema der Gärrestaufbereitung durch Separierung und anschließende solargestützte Trocknung des Feststoffs in einem Gewächshaus.. 12

Abbildung 4: Prozessschema der Gärrestaufbereitung durch Separierung und anschließende NH_3-Strippung der Flüssigphase 13

Abbildung 5: Prozessschema der Gärrestsaufbereitung durch Separierung und Vakuumverdampfung der Flüssigphase mit anschließender Brüdenwäsche 13

Abbildung 6: Prozessschema der Gärrestsaufbereitung durch Separierung und anschließende Aufreinigung der Flüssigphase in einer Membrananlage mit Ultrafiltration und Umkehrosmose. 14

Abbildung 7: Massenverteilung der einzelnen Produkte bei den betrachteten Aufbereitungsverfahren. Prozentuale Anteile beziehen sich auf die ursprünglich angefallene Menge an unbehandeltem Gärrest. .25

Abbildung 8: Nährstoffgehalte des unbehandelten Gärrests und der einzelnen Produkte der betrachteten Gärrestaufbereitungsverfahren. 27

Abbildung 9: Verteilung der Nährstofffrachten im unbehandelten Gärrest auf die einzelnen Produkte der betrachteten Gärrestaufbereitungsverfahren. 28

Abbildung 10: Treibhausgasemissionen der Verwertung des unbehandelten Gärrests und der Aufbereitungsprodukte bei einer vollständigen überregionalen Verwertung 31

Abbildung 11: Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte bei einer vollständigen überregionalen Verwertung. Darstellung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests. 33

Abbildung 12: Kumulierter Energieaufwand der Verwertung des unbehandelten Gärrests und der Aufbereitungsprodukte bei einer vollständigen überregionalen Verwertung.. 34

Abbildung 13: Kumulierter Energieaufwand der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte bei einer vollständigen überregionalen Verwertung. Darstellung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests. 35

Abbildung 14: Effekt der Gärrestaufbereitung und -verwertung auf die Treibhausgasbilanz des Biogasstroms bei einer vollständigen überregionalen Verwertung. 36

Abbildung 15: Treibhausgasemissionen der Verwertung des unbehandelten Gärrests und der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Phosphors. 38

Abbildung 16: Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Phosphors. Darstellung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests. 39

Abbildung 17: Kumulierter Energieaufwand der Verwertung des unbehandelten Gärrests und der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Phosphors. 40

Abbildung 18: Kumulierter Energieaufwand der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Phosphors. Darstellung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests.. 41

Abbildung 19: Treibhausgasemissionen der Verwertung des unbehandelten Gärrests und der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Stickstoffs 43

Abbildung 20: Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Stickstoffs. Darstellung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests. 44

Abbildung 21: Kumulierter Energieaufwand der Verwertung des unbehandelten Gärrests und der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Stickstoffs. 45

Abbildung 22: Kumulierter Energieaufwand der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Stickstoffs. Darstellung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests. 46

Abbildung 23: Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und Verwertung für verschiedene Entfrachtungsziele. Darstellung ausgewählter Aufbereitungsverfahren im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests. 47

Abbildung 24: Einfluss der Anlagengröße auf die Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und -verwertung. Entfrachtungsziel: alle Nährstoffe 48

Abbildung 25: Einfluss der Transportentfernung auf den kumulierten Energieaufwand der Gärrestaufbereitung und -verwertung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests. Entfrachtungsziel: 50 % der Phosphorfracht im unbehandelten Gärrest. 49

Abbildung 26: Einfluss der für die Feststoffseparation gewählten Abscheidegrade auf die Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und -verwertung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests. Entfrachtungsziel: alle Nährstoffe. 51

Abbildung 27: Einfluss der zusätzlichen Pelletierung des Trockenguts auf die Treibhausgasemissionen der Bandtrocknung. Entfrachtungsziel: 50 % der Phosphorfracht im unbehandelten Gärrest. 52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bilanzparameter für die Treibhausgas- und Energiebilanzierung der Gärrestaufbereitung 9

Tabelle 2: Nährstoffgehalte und Gärrestanfall für eine Modellbiogasanlage mit 500 bzw. 2.000 kW_{el} ..... installierter Leistung beim betrachteten Substratmix von 65 % Maissilage und 35 % Rindergülle ..... (% des Frischmasse-Inputs) 10

Tabelle 3: Faktoren für die Treibhausgasbilanzierung der Biogasstromproduktion 10

Tabelle 4: Abscheidegrade und Energiebedarf verschiedener Aufbereitungsverfahren 15

Tabelle 5: Annahmen zur baulichen Ausführung der Lager für unbehandeltem Gärrest und Aufbereitungsprodukte bei Lagerung an der Anlage bzw. in der Ackerbauregion bei überregionaler Verwertung 16

Tabelle 6: Emissionsfaktoren bei der Lagerung von unbehandeltem Gärrest und Aufbereitungsprodukten. .17

Tabelle 7: Energiebedarf, Treibhausgasemissionen und Kosten durch den Transport je Tonne Gärrest bzw. Aufbereitungsprodukt. Angenommene Transportentfernung von 300 km 18

Tabelle 8: Kosten, Energiebedarf und Treibhausgasemissionen aus der Bereitstellung der Technik und dem Dieselverbrauch für die Ausbringung und Einarbeitung von unbehandeltem Gärrest und der Aufbereitungsprodukte. 20

Tabelle 9: Verwendete Emissionsfaktoren für NH_3-Verluste nach der Ausbringung von unbehandeltem Gärrest und den Aufbereitungsprodukten.. 21

Tabelle 10: Bewertung der Nährstoffe in den Gärresten und Aufbereitungsprodukten. Anrechnung der Düngewirkung, Nährstoffwert, sowie kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen bei der Bereitstellung des Nährstoffes als Mineraldünger. 22

Tabelle 11: Erlöspotenzial für den unbehandelten Gärrest und die Aufbereitungsprodukte bei der überregionalen Verwertung. 23

Tabelle 12: Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit ..... Erdgas 23

Tabelle 13: Betrachtete Entfrachtungsszenarien 24

Tabelle 14: Kumulierter Energieaufwand der betrachteten Aufbereitungsverfahren 28

Tabelle 15: Treibhausgasemissionen der betrachteten Aufbereitungsverfahren 29

Tabelle 16: Anfallmengen und Nährstoffgehalte des unbehandelten Gärrests und der Aufbereitungsprodukte für die betrachtete Modellanlage 30

Tabelle 17: Produktmengen zur regionalen bzw. überregionalen Verwertung bei einem Entfrachtungsziel von 50 % der Phosphorfracht im unbehandelten Gärrest und in den einzelnen Produkten vorliegende Nährstofffrachten 37

Tabelle 18: Produktmengen zur regionalen bzw. überregionalen Verwertung bei einem Entfrachtungsziel von 50 % der Stickstofffracht im unbehandelten Gärrest und in den einzelnen Produkten vorliegende Nährstofffrachten 42

Tabelle 19: Für die Berechnungen in Kapitel 4.5 verwendete und im Projekt ermittelte Abscheidegrade für Verfahren der Feststoffabtrennung. 50

Abkürzungsverzeichnis

ASL	Ammoniumsulfatlösung
BT	Bandtrocknung
DZ	Dekanterzentrifuge
KEA	kumulierter Energieaufwand
M	Membranverfahren
N50	Szenario mit Entfrachtungsziel von 50 % der Stickstofffracht im unbehandelten Gärrest
PSS	Pressschnecke
P50	Szenario mit Entfrachtungsziel von 50 % der Phosphorfracht im unbehandelten Gärrest
Solar	solargestützte Trocknung
Strip	Strippung
THG	Treibhausgas(e)
VV	Vakuumverdampfung
100%	Szenario mit Entfrachtungsziel von 100 % der Nährstoffe im unbehandelten Gärrest

1 Ziele

1.1 Aufgabenstellung

In vielen Regionen mit Intensivtierhaltung bestehen hohe Nährstoffüberschüsse. Zugleich befinden sich dort zahlreiche Biogasanlagen, deren Gärreste mit den unbehandelten Wirtschaftsdüngern um Flächen für die Ausbringung konkurrieren. Der Bedarf zur überregionalen Verwertung der Nährstoffe aus Überschussregionen nimmt daher immer stärker zu. Nicht zuletzt vor diesem Hintergrund wird die Aufbereitung von Gärresten diskutiert. Als wichtiger Vorteil gilt die Volumenreduktion, aber auch die Möglichkeit der gezielten Auftrennung der Nährstoffströme. Diesen Vorteilen stehen jedoch Kosten, Energieaufwendungen und Treibhausgasemissionen aus der Errichtung der Aufbereitungsanlagen und deren Betrieb gegenüber. In diesem Teilprojekt soll für verschiedene regionale Ausgangssituationen mit unterschiedlichem Bedarf zur Nährstoffentfrachtung geprüft werden, ob sich durch die Aufbereitung Energie oder Treibhausgasemissionen einsparen lassen. Dies kann neben der Wirtschaftlichkeit als Kriterium zur Bewertung von Aufbereitungsverfahren herangezogen werden.

1.2 Stand der Technik

Bisher wurde vornehmlich die Wirtschaftlichkeit von Aufbereitungsverfahren und –strategien betrachtet. Diese Berechnungen berücksichtigen zwar die Kosten des Strom- und ggf. Wärmebedarfs der Aufbereitungsverfahren und in einzelnen Fällen den Dieselbedarf bei der Ausbringung der Produkte. Die Umweltwirkung in dieser Verbräuche sowie der Vorleistungen für die Anlagenerrichtung oder die Bereitstellung von Maschinen und Technik gehen in solche Bewertungen jedoch nicht ein.

Ziel des Vorhabens ist es daher, Treibhausgas- und Energiebilanzierung für die betrachteten Aufbereitungsverfahren aufzustellen, die alle relevanten Faktoren berücksichtigen und auch die Verwertung der Aufbereitungsprodukte einschließen. Bei der Verwertung liegt der Fokus auf der landwirtschaftlichen Nutzung. Eine vergleichende Bewertung der Verfahren wird unter Annahme verschiedener Rahmenbedingungen vorgenommen.

1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Datenerhebung im Rahmen des Projekts erfolgte in Abstimmung mit den Projektpartnern:

- Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen, Institute for International Research on Sustainable Management and Renewable Energy (ISR)
- Technische Hochschule Berlin, Fachgebiet für Verfahrenstechnik
- Universität Hohenheim, Fachgebiet Düngung und Bodenstoffhaushalt

Darüber hinaus wurden wechselseitig Ergebnisse aus den Teilprojekten zur Verfügung gestellt, Details hierzu finden sich im Methoden- und Ergebnisteil dieses Berichts.

2 Beschreibung der Methodik

2.1 Allgemeines Vorgehen

Für die Berechnung der Energie- und Treibhausgasbilanzen von Aufbereitungsverfahren für Gärreste wurden die Aufwendungen und Verbräuche an Materialien, Betriebsmitteln und Energie für den gesamten Prozess ab Verlassen der Biogasanlage (Überlauf Nachgärer) bis hin zur landwirtschaftlichen Verwertung erfasst. Ebenso wurden gasförmige Emissionen berücksichtigt, die an verschiedenen Stellen des Aufbereitungs- und Verwertungsprozesses auftreten können. Es können sich auch Einsparungen an Treibhausgasen oder Energie durch den Ersatz von Mineraldünger ergeben (Tab. 1). Emissionen, Energieaufwand und Einsparungen bei der Verwertung des unbehandelten Gärrests, wurden analog berechnet, um den Effekt der Aufbereitung im Vergleich zu einer Nicht-Behandlung darstellen zu können. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse werden diese je Kubikmeter unbehandeltem Gärrest dargestellt. Das Vorgehen zur Ermittlung des ku-

mulierten Energieaufwands (KEA)[1] orientiert sich an den Vorgaben der VDI-Richtlinie 4600 „Kumulierter Energieaufwand (KEA)" (VDI 2012), setzt diese jedoch nicht vollständig in den Berechnungen um. So ist z. B. der Rückbau der Aufbereitungsanlage oder der Lagerstätten nicht berücksichtigt ist.

Tabelle 1: Bilanzparameter für die Treibhausgas- und Energiebilanzierung der Gärrestaufbereitung

	Aufbereitung	**landwirtschaftliche Verwertung der Aufbereitungsprodukte bzw. des unbehandelten Gärrests**		
	Anlagenerrichtung und –betrieb	**Lagerung**	**Transport**	**Ausbringung**
Herstellung Materialien	Materialbedarf für Errichtung der Gebäude und Herstellung der Anlagentechnik		Materialbedarf für Herstellung von Transport- und Ausbringtechnik	
Herstellung Betriebsmittel	Schwefelsäure, Natronlauge, Flockungsmittel etc.		Dieselverbrauch für Transport und Ausbringung	
				eingesparter Mineraldünger
Energiebereitstellung	Strombedarf, ggf. Wärmebedarf[1)]			
direkte Emissionen	ggf. NH_3-Emissionen	NH_3-, N_2O- und CH_4-Emissionen bei nicht-gasdichter Lagerung[2)]		NH_3-Emissionen nach Ausbringung

[1)] Durch den Wärmebedarf für die Aufbereitung wird ggf. eine bestehende höherwertige Wärmenutzung, wie z.B. durch ein Nahwärmenetz, verdrängt. Die extern nicht mehr zur Verfügung stehende Wärmemenge muss dann durch andere, in der Regel fossile Ressourcen bereitgestellt werden. Die damit verbundenen Aufwendungen (KEA, THG) sind der Gärrestaufbereitung zuzurechnen.

Die Material- und Betriebsmittelverbräuche für den Aufbereitungsschritt basieren auf Hersteller- und Betreiberangaben bzw. wurden aus diesen berechnet. Der Strom- und Wärmebedarf wurden durch die TU Berlin bei den Anlagenherstellern und teilweise auch auf den Anlagen erhoben (s. Berichtsteil Teilvorhaben 2 und Tab. 4)

Für die Prozessschritte Lagerung, Transport und Ausbringung wurden die Mengen an Baumaterial und Technik sowie der Dieselverbrauch aus der KTBL-Datenbank bzw. mit KTBL-Modellen ermittelt. Hierbei wurde auf bestehende Standardverfahren zurückgegriffen.

Die Treibhausgasemissionen und KEA-Werte für Materialien, Betriebsmittel und Energie stammen zum überwiegenden Teil aus der ecoinvent-Datenbank (ecoinvent 2015). Für Strom wurden die vom Umweltbundesamt jährlich ermittelten Treibhausgasemissionen des deutschen Strommix verwendet (UBA 2017).

Die Klimawirksamkeit gasförmiger Emissionen wurde mit den vom IPCC (2006) festgelegten Faktoren für das Treibhausgaspotenzial berechnet.

Bisher existieren keine oder nur wenig abgesicherte Erkenntnisse zu den Emissionen bei der Lagerung und Ausbringung von aufbereiteten Gärresten. Daher wurde auf die im landwirtschaftlichen Emissionsinventar (Haenel et al. 2016) verwendeten Emissionsfaktoren für Wirtschaftsdünger und unbehandelte Gärreste zurückgegriffen. Die verwendeten Faktoren werden in den Abschnitten zu Lagerung und Ausbringung dargestellt.

Gasförmige Emissionen bei der Aufbereitung selbst können bei den hier betrachteten Verfahren (s. unten) lediglich bei der Trocknung auftreten: Ein Großteil des Ammoniumstickstoffs (NH_4-N) geht aufgrund der hohen Temperaturen in die Gasphase über und als NH_3 verloren, falls keine Abluftreinigung erfolgt. NH_3 selbst ist zwar kein Treibhausgas, jedoch indirekt klimawirksam. Es verursacht nach Deposition in umliegenden Naturräumen Lachgasemissionen (N_2O) aus dem Boden. Darüber hinaus geht düngewirksamer Stickstoff mit dem

[1] Der Kumulierte Energieaufwand KEA ist nach der VDI-Richtlinie 4600 definiert als „die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Guts (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann."

NH_3 aus dem Gärrest verloren. Es wird angenommen, dass dieser Stickstoff durch Mineraldünger ersetzt werden muss.

Modellbiogasanlage und Modellgärrest

Für die Berechnungen wurden die Verfahren auf den Gärrest einer Modellbiogasanlage angewendet (Tab. 2). Für diese Modellbiogasanlage wird ein Substratinput aus 35 % Rindergülle und 65 % Maissilage, bezogen auf den Frischmasseinput, angenommen. Um mögliche Größeneffekte nachweisen zu können, wurden die Berechnungen für eine Anlage mit 500 kW_{el} bzw. mit 2 MW_{el} installierter Leistung durchgeführt.

Tabelle 2: Nährstoffgehalte und Gärrestanfall für eine Modellbiogasanlage mit 500 bzw. 2.000 kWel installierter Leistung beim betrachteten Substratmix von 65 % Maissilage und 35 % Rindergülle (% des Frischmasse-Inputs)

	TM	**N_{tot}**	**NH_4-N**	**P_2O_5**	**K_2O**	**Gasertrag**	**Anfallmenge**	
							500 kW_{el}	**2 MW_{el}**
	% FM	kg/t FM				m_n^3/t FM	t FM/a	
Gärrest	7,9	6,0	3,9	2,5	9,3	--	10.715	42.860

Effekt der Aufbereitung auf Treibhausgasemissionen des Biogasstroms

Um die Bedeutung der Treibhausgasemissionen aus der Aufbereitung der Gärreste für die Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung aus Biogas insgesamt abzuschätzen, wurde diese in die Gesamtbilanz integriert Fallen durch die Aufbereitung und die Verwertung der Produkte weniger Emissionen an als beim unbehandelten Gärrest, so wäre dies ein zusätzlicher Beitrag zur Ressourcenschonung. Entstehen durch die Aufbereitung Emissionen, würde dies das Emissionsminderungspotenzial der Biogasproduktion verringern.

Aufgrund der Erweiterung des Bilanzierungsrahmens durch die Einbeziehung der vorgelagerten Biogasproduktion müssen zusätzliche Faktoren in die Treibhausgasbilanz einbezogen werden (Tab. 3). Für die Berechnungen wurde auf Ergebnisse aus KTBL 2013 zurückgegriffen, die auf Basis der Annahmen für das vorliegende Vorhaben angepasst wurden.

Tabelle 3: Faktoren für die Treibhausgasbilanzierung der Biogasstromproduktion

Emissionsquelle	Energiepflanzenbereitstellung
	Errichtung der Anlage
	Prozessenergie (Strom, ggf. Zündöl)
	Methanverluste (BHKW-Schlupf, Leckagen)[1)]
Emissionseinsparung	Vermiedene Methanemissionen aus der Lagerung unvergorener Wirtschaftsdünger[2)]
	Nutzung der BHKW-Abwärme[3)]

[1)] Annahmen: BHKW-Schlupf 1% der Methanproduktion, Leckagen 0,5% der Methanproduktion

[2)] Methanverluste aus offener Wirtschaftsdüngerlagerung nach IPCC (2006): Rindergülle 10 % der potenziellen Methanproduktion, Schweinegülle 17 %. Für das Methanbildungspotenzial werden die Richtwerte für den Gasertrag aus KTBL (2015) verwendet.

[3)] Die Nutzung der BHKW-Wärme wird bereits in den Betrachtungen ohne Einbeziehung der Biogasproduktion berücksichtigt.

2.2 Betrachtete Aufbereitungsverfahren

Folgende Verfahren wurden im vorliegenden Vorhaben betrachtet:

- Feststoffseparation mit Pressschneckenseparator (PSS),
- Trocknung der Festphase aus der Separation mit Bandtrockner und anschließender Abluftreinigung (BT), bei der eine gering konzentrierte Ammoniumsulfatlösung anfällt (optional: Trocknung auch eines Teils der Flüssigphase, um die verfügbare BHKW-Abwärme vollständig zu nutzen: BT_{max}),
- solargestützte Trocknung der Festphase aus der Separation in einem Gewächshaus (Solar; optional: Trocknung auch eines Teils der Flüssigphase, um verfügbare BHKW-Abwärme vollständig zu nutzen: $Solar_{max}$),

- Strippung der Flüssigphase aus der Separation und dadurch Gewinnung einer Ammoniumsulfatlösung (Strip),
- Vakuumverdampfung der Flüssigphase der Separation mit anschließender Brüdenwäsche und dadurch Gewinnung einer Ammoniumsulfatlösung (VV),
- weitergehende Feststoffabtrennung aus der Flüssigphase der Separation durch Flockungshilfsmittel und Dekanterzentrifuge (DZ), anschließend Aufbereitung der verbleibenden Flüssigphase in einer Membrananlage mit Ultrafiltration-und Umkehrosmosestufe (M).

Die Feststoffabtrennung stellt somit den ersten Schritt für alle weiteren Aufbereitungsoptionen dar. Die Separierung mit Pressschnecke oder Dekanterzentrifuge und das Membranverfahren sind die einzigen Verfahren, für die keine Wärme benötigt wird.

Alle Verfahren werden im Schlussbericht des Teilvorhabens 2 detailliert beschrieben. Hier wird daher lediglich die Funktionsweise der einzelnen Verfahren anhand von vereinfachten Fließschemata dargestellt (Abb. 1-6) sowie die wichtigsten Verfahrenskennwerte in einer Tabelle zusammengefasst (Tab. 4). Diese Kennwerte fließen auch in die Energie- und Treibhausgasbilanzierung ein. Neben den Energiebedarfswerten sind dies v.a. die Abscheidegrade, die die Auftrennung der Nährstoffe in die verschiedenen Aufbereitungsprodukte bestimmen.

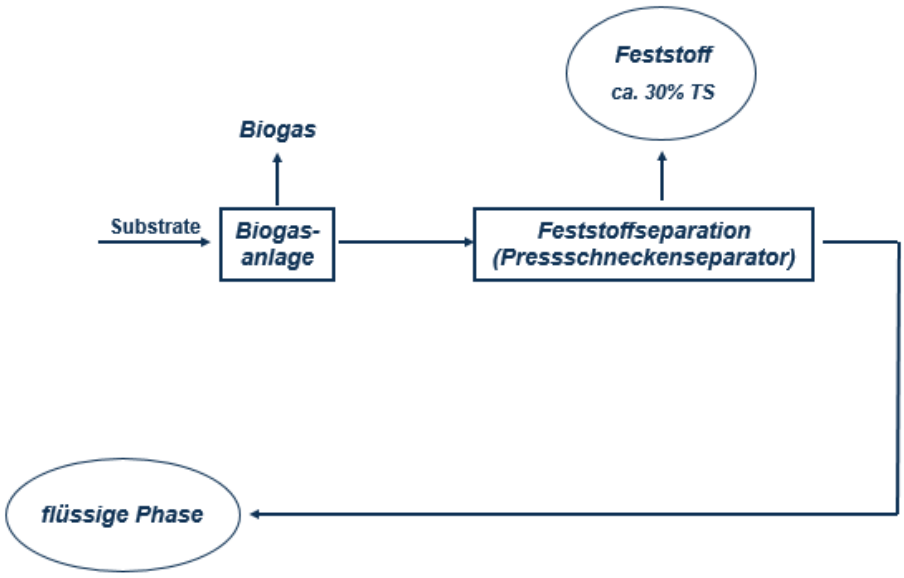


Abbildung 1: Prozessschema der Gärrestseparierung mit Pressschnecke

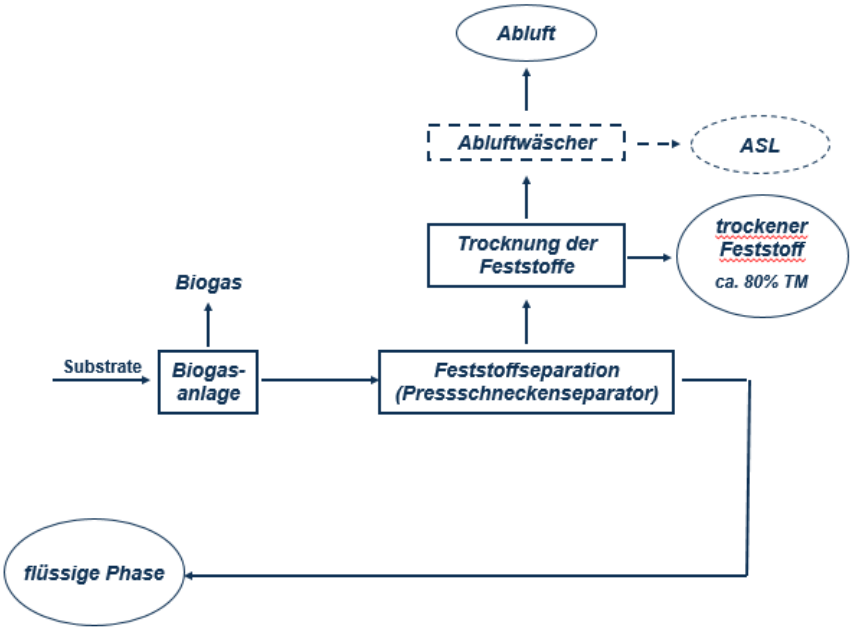


Abbildung 2: Prozessschema der Gärrestaufbereitung durch Separierung und anschließende Trocknung des Feststoffs in einem Bandtrockner. Optional kann auch ein Teil der Flüssigphase getrocknet werden. Die Trocknerabluft kann über eine Abluftreinigung geführt und so NH_3-Verluste vermieden werden.

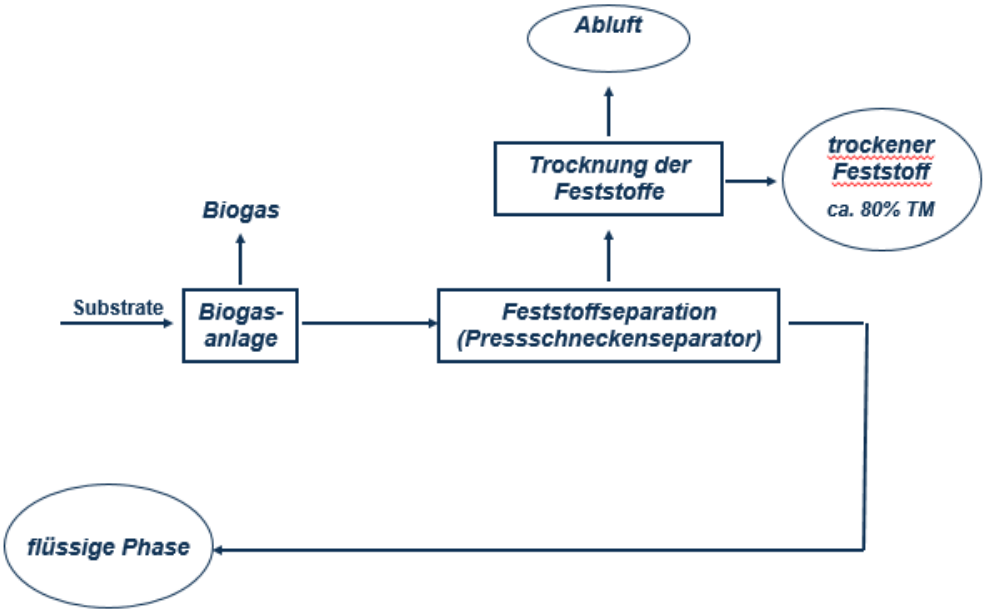


Abbildung 3: Prozessschema der Gärrestaufbereitung durch Separierung und anschließende solargestützte Trocknung des Feststoffs in einem Gewächshaus. Optional kann auch ein Teil der Flüssigphase getrocknet werden. Bei der solargestützten Trocknung ist eine Abluftreinigung in der Praxis nicht üblich.

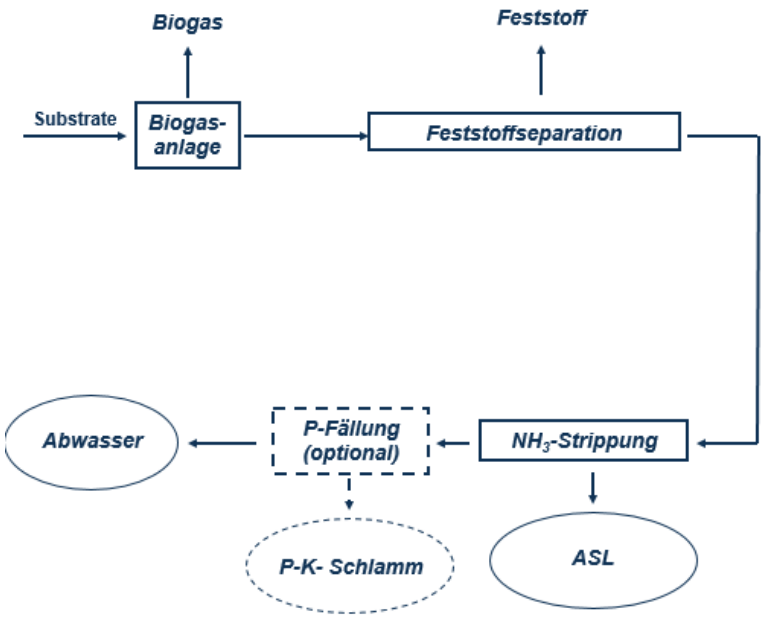


Abbildung 4: Prozessschema der Gärrestaufbereitung durch Separierung und anschließende NH_3-Strippung der Flüssigphase

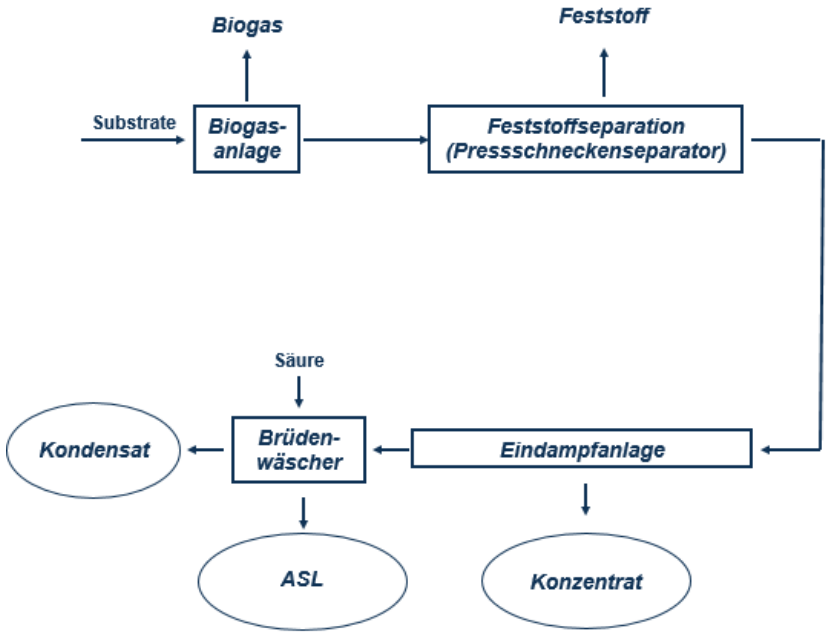


Abbildung 5: Prozessschema der Gärrestsaufbereitung durch Separierung und Vakuumverdampfung der Flüssigphase mit anschließender Brüdenwäsche

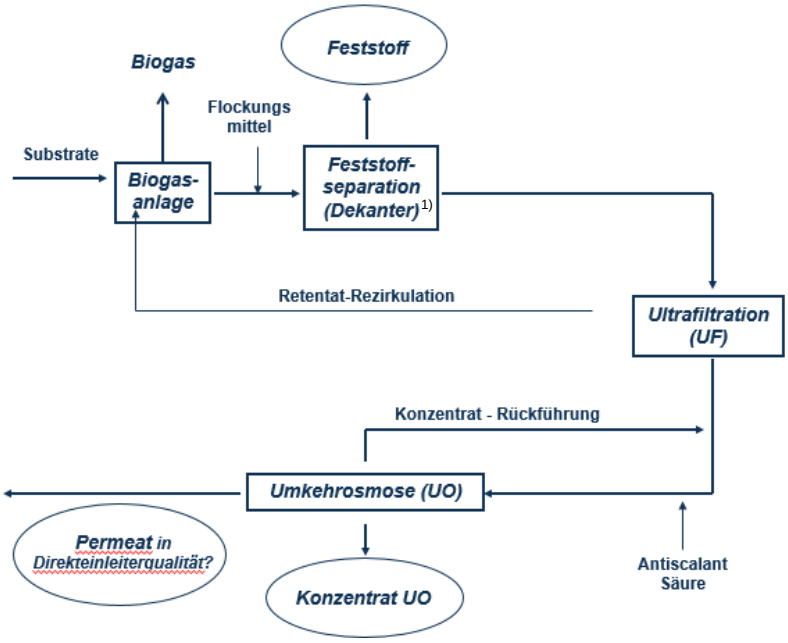


Abbildung 6: Prozessschema der Gärrestsaufbereitung durch Separierung und anschließende Aufreinigung der Flüssigphase in einer Membrananlage mit Ultrafiltration und Umkehrosmose
[1)] Hier in Kombination mit vorgeschalteter Pressschnecke für Gärreste mit hohem TM-Gehalt und Faseranteil, um für Dekanterzentrifuge einen Inputstoff mit besser geeigneten Eigenschaften zu erhalten.

3 Verwendete Kennzahlen und Annahmen

3.1 Aufbereitung

In Tabelle 4 sind die wichtigsten Kennwerte der einzelnen Aufbereitungsschritte aufgeführt. Die Abscheidegrade weisen aus, welcher prozentuale Anteil der Trockenmasse bzw. der Nährstoffe aus dem Inputmaterial des jeweiligen Verfahrensschritts in die Produkte abgeschieden wird. Nur für den ersten Verfahrensschritt, die Feststoffseparation, ist das Inputmaterial der Ausgangsgärrest. Der Anteil eines Nährstoffs in Produkten der weiteren Aufbereitungsschritte bezogen auf die Menge im Ausganggärrest kann daher nur in mehreren Schritten berechnet werden.

Die in Tabelle 4 ausgewiesenen Abscheidegrade basieren bis auf wenige Ausnahmen auf den auf den Praxisanlagen gewonnenen Ergebnissen zu den Massenströmen (Betreiber-/Herstellerangaben) und den Nährstoffgehalten (Laboranalysen der Stoffströme). Lediglich für die Feststoffseparation wurde auf Ergebnisse aus Datenrecherchen des KTBL zurückgegriffen, da deren Ergebnisse repräsentativer für den betrachteten Gärrest waren.

Auch die Energiekennzahlen beziehen sich auf den Inputstoff in den jeweiligen Verfahrensschritt. Ein direkter Vergleich der Verfahren hinsichtlich des Energiebedarfs ist daher auf Basis der dort ausgewiesenen Werte nicht möglich.

Tabelle 4: Abscheidegrade und Energiebedarf verschiedener Aufbereitungsverfahren

Verfahrensschritt	Inputstoff	Abscheidung in die/das	Abscheidegrade					Strombedarf	Wärmebedarf
			TM	N_{tot}	NH_4-N	P_2O_5	K_2O	kWh_{el}	kWh_{th}
			in % des Gehalts im Inputstoff					je m³ Inputstoff	
Feststoffabtrennung									
Pressschnecke[1)]	Gärrest	feste Phase	48%	17%	9%	22%	10%	0,5	0,0
Dekanterzentrifuge[2)]	Gärrest	feste Phase	60%	23%	15%	80%	12%	2,6	0,0
Bandtrocknung									
Trocknung nur Festphase	feste Phase PSS	Trockengut	100%	[3)]	17%	100%	100%	25	734
Trocknung optimiert	feste und Teil flüssige Phase PSS	Trockengut	100%	[3)]	17%	100%	100%	57	1.087
Abluftreinigung Trockner	Abluft Trockner	ASL (17%)	[4)]	[3)]	75%	0%	0%	5	0,0
Solargestützte Trocknung									
Trocknung nur Festphase	feste Phase PSS	Trockengut	100%	[3)]	17%	100%	100%	20	0,0
Trocknung optimiert	feste und Teil flüssige Phase PSS	Trockengut	100%	[3)]	17%	100%	100%	30	887
Stripverfahren									
Strippung	flüssige Phase PSS	N-reduzierte Flüssigphase	93%	59%	20%	100%	100%	7,0	83
		ASL (35%)	[4)]	37%	80%	0%	0%		
Vakuumverdampfung (2-stufig)									
Verdampfung	flüssige Phase PSS	Konzentrat	93%	50%	22%	100%	100%	7,8	226
Brüdenwäsche	Brüden aus Verdampfer	ASL (35%)	[4)]	78%	78%	0%	0%		
Membrantechnik									
Ultrafiltration	flüssige Phase DZ	Konzentrat Ultrafiltration	59%	38%	32%	58%	30%	30	0,0
Umkehrosmose	Filtrat Ultrafiltration	Konzentrat Umkehrosmose	100%	100%	100%	100%	100%	8,8	0,0

[1)] KTBL (2013)

[2)] KTBL (2017)

[3)] Variiert in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen N_{org} und NH_4-N im Ausgangsgärrest, das vom Substratinput in die Biogasanlage bestimmt wird. Durch die Trocknung treten nur Verluste an NH_4-N auf, der organische Stickstoff verbleibt im Trockengut.

[4)] Behandlung der Abluft; durch die Zugabe von Schwefelsäure TM-Eintrag zusätzlicher zum abgeschiedenen NH_4-N und daher Anteil am Gärrest nicht ausweisbar.

3.2 Lagerung

Um den Effekt reduzierter Gärrestvolumina durch die Aufbereitung darstellen zu können, wird bei den Betrachtungen davon ausgegangen, dass sämtliche Lagerstätten neu zu errichten sind, auch die für den unbehandelten Gärrest. Dabei wird die in der Novellierung der Düngeverordnung vom März 2017 festgelegte Mindestlagerkapazität von 9 Monaten auf alle Produkte angewendet.

Da die Verweilzeit in Fermenter und Nachgärer bei der betrachteten Biogasanlage lediglich 90 Tage beträgt, muss der Gärrest zunächst für mindestens weitere 60 Tage in gasdichten Gärrestlagern verbleiben, um die gesetzlich vorgeschriebenen 150 Tage im gasdichten System einzuhalten. So ist gewährleistet, dass Restgasemissionen aus dem Gärrest minimiert werden. Auch im Fall einer Gärrestaufbereitung wird also Lagerkapazität für den Gärrest geschaffen (Tab. 5).

In den Berechnungen wird davon ausgegangen, dass aus logistischen Gründen Gärreste und Aufbereitungsprodukte, die in Ackerbauregionen verwertet werden sollen, kontinuierlich dorthin transportiert und gelagert werden. Sofern es zu einer vollständigen überregionalen Verwertung kommt, werden an der Anlage selbst Zwischenlager für 14 Tage errichtet. Während der Lagerung von Gärresten und Aufbereitungsprodukten kann es, je nach Produkt, zu Emissionen von Ammoniak, Lachgas und auch Methan kommen. Für die Berechnungen wird davon ausgegangen, dass emissionsmindernde Abdeckungen zum Einsatz kommen (Tab. 5).

Tabelle 5: Annahmen zur baulichen Ausführung der Lager für unbehandeltem Gärrest und Aufbereitungsprodukte bei Lagerung an der Anlage bzw. in der Ackerbauregion bei überregionaler Verwertung

Lagergut	**Lagerung an der Anlage**	**Lagerung in der Ackerbauregion**
unbehandelter Gärrest	gasdicht abgedeckter Rundbehälter mit Anschluss ans gasführende System	Rundbehälter mit fester, jedoch nicht gasdichter Abdeckung
feste Aufbereitungsprodukte		
Festphase nach Separation frisch	Silolager, überdacht Folienabdeckung zur Minderung der NH_3-Verluste	
Festphase nach Separation getrocknet	Silolager, überdacht	
flüssige Aufbereitungsprodukte		
Flüssigphase nach Separation, N-reduzierte Flüssigphase Stripverfahren, Konzentrate Vakuumverdampfung und Membranverfahren	Rundbehälter mit fester, jedoch nicht gasdichter Abdeckung	
Ammoniumsulfatlösung	Edelstahlbehälter	

Je nach Art des Aufbereitungsproduktes und der betrachteten Verwertungsstrategie unterscheiden sich die erforderlichen Größen der jeweiligen Lagerstätten. Die Aufwendungen zur Errichtung der Lager sind nicht proportional zur Größe, so dass die Kosten und Treibhausgasemissionen aus der Errichtung der Lager je Tonne Lagergut kein einheitlicher Wert für alle im Folgenden betrachteten Szenarien sind. Für jedes der betrachteten Szenarien wurden neben dem kumulierten Energieaufwand und den Treibhausgasemissionen auch die Kosten für die Lagerung des unbehandelten Gärrests und der Aufbereitungsprodukte berechnet und der HfWU für die Kostenbetrachtungen zur Verfügung gestellt.

Während der Lagerung des Gärrestes und der Aufbereitungsprodukte kommt es zu gasförmigen Emissionen, sofern diese nicht gasdicht abgedeckt sind. Dies sind v.a. Verluste in Form von Lachgas und Ammoniak, aber auch an Methan. Lediglich für die getrockneten Feststoffe und die Ammoniumsulfatlösung treten keine gasförmigen Emissionen auf (Tab. 6). Das Trockengut ist durch den Trocknungsprozess stabilisiert und hygienisiert, so dass keine Umsetzungsprozesse mehr stattfinden. In der ASL liegt NH_4-N in einer gebundenen Form vor und es ist keine organische Substanz für die Methanbildung mehr vorhanden.

Lachgas wirkt als direktes Klimagas mit einem hohen Treibhausgaspotenzial von 296 kg CO_2eq/kg N_2O. Ammoniak ist lediglich indirekt klimawirksam: Wie andere N-Einträge in den Boden unterliegt NH_3 nach Deposition in umliegenden Naturräumen den Prozessen der Nitrifikation und Denitrifikation, bei denen immer auch ein gewisser Anteil an Stickstoff in Form von Lachgas verloren geht. Nach IPCC (2006) betragen diese sogenannten indirekten Emissionen 1 % des als Ammoniak emittierten Stickstoffs. Darüber hinaus verringern gasförmige N-Verluste, insbesondere als NH_3, die Düngewirkung der Gärreste oder Aufbereitungsprodukte und somit den Ersatz von Mineraldünger.

Für die Lachgas- und Ammoniakemissionen aus der Lagerung unbehandelter Gärreste werden im landwirtschaftlichen Emissionsinventar (Haenel et al. 2016) die Emissionsfaktoren für Rinder- bzw. Schweinegülle verwendet. Für den Gärrest selbst wurde in den Berechnungen der Faktor des Emissionsinventars für die Lagerung von Rindergülle mit fester Abdeckung übernommen (Tab. 6). Für die flüssigen Produkte aus der Gärrestaufbereitung wurde für Lachgas davon ausgegangen, dass keine N_2O-Emissionen auftreten (Tab. 6). Denn in Folge der Aufbereitung kommt es bei diesen Produkten anders als beim Gärrest nicht zur Ausbildung einer Schwimmdecke, in der die Lachgasbildungsprozesse ablaufen.

Bei Gärresten und dem Großteil der Aufbereitungsprodukte können Restmethanemissionen bei nicht gasdichter Lagerung auch nach den vorgeschriebenen 150 Tagen Verweildauer nicht ausgeschlossen werden. Lediglich bei getrockneten Materialien und die Ammoniumsulfatlösung treten keine Restgasemissionen auf (s. oben). Allerdings existieren für Aufbereitungsprodukte bisher keine Emissionsfaktoren für die Methanbildung während der Lagerung. Daher wurde in den Berechnungen auf den im landwirtschaftlichen Emissionsinventar verwendeten Faktor für vergorene Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger von 1 % des ursprünglichen Methanbildungspotenzials der Biogassubstrate zurückgegriffen (Tab. 6). Dieser wurde aus den Ergebnissen des Bundesmessprogramms Biogas (FNR 2009) abgeleitet.

Tabelle 6: Emissionsfaktoren bei der Lagerung von unbehandeltem Gärrest und Aufbereitungsprodukten. Emissionsfaktoren aus dem Emissionsinventar für die deutsche Landwirtschaft wurden Haenel et al. (2016) entnommen.

Transportgut	**Emissionsfaktor**			**Quelle/Erläuterungen Emissionsfaktoren**
	N_2O-N kg/kg N_{tot}	**NH_3-N** kg/kg NH_4-N	**CH_4** m^3/m^3 CH_4-Richtwert	
unbehandelter Gärrest				
Lagerung an Biogasanlage	0	0	0	gasdichtes Gärrestlager: keine Emissionen
externes Gärrestlager in der Ackerbauregion	0,005	0,015	0,01	feste Abdeckung; nach Emissionsinventar: N-Spezies - EF für vergorene Wirtschaftsdünger feste Abdeckung CH_4 - EF für vergorene Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger
fest – Lagerung an der Anlage und Ackerbauregion				
Feststoffe frisch	0,013	0,4	0,01	überdacht, Folienabdeckung; N_2O und CH_4 nach Emissionsinventar: N_2O - EF für Festmist CH_4 - analog Gülle NH_3 nach Möller (2010)
Feststoffe getrocknet	0	0	0	überdacht; Stabilisierung durch Trocknung: keine Emissionen (nach FNR 2014)
flüssig – Lagerung an der Anlage und Ackerbauregion				
Flüssigphase nach Separation, N-reduzierte Flüssigphase Stripverfahren, Konzentrate Vakuumverdampfung und Membranverfahren	0	0,015	0,01	feste Abdeckung; nach Emissionsinventar: N_2O - keine Schwimmdecke, keine Emissionen NH_3 - EF für vergorene Wirtschaftsdünger CH_4 – EF für vergorene Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger
ASL	0	0	0	Lagerung in Edelstahltank, keine Emissionen

3.3 Transport

Der mögliche Beitrag der Gärrestaufbereitung zur regionalen Nährstoffentfrachtung stand im Fokus des Projekts. Aus diesem Grund wurde von einer zumindest teilweise überregionalen Verwertung des Gärrests bzw. der Aufbereitungsprodukte ausgegangen. Für die überregional verwerteten Anteile wurde eine Transportentfernung von 300 km angenommen. Dies entspricht etwa der Entfernung zwischen der Intensivtierhaltungsregion Weser-Ems und der Ackerbauregion Magdeburger Börde. Aufgrund der großen Entfernung erfolgt der Transport mit LKW, mit einer Leerfahrt auf dem Rückweg. Sämtliche transportbedingten Aufwendungen und Emissionen (Tab. 7) werden daher dem Gärrest bzw. den Aufbereitungsprodukten zugeschrieben. Die Kosten für den Transport in die Ackerbauregion wurden durch das KTBL ermittelt (Tab. 7) und der HfWU für die Wirtschaftlichkeitsbewertung im Teilvorhaben 1 zur Verfügung gestellt.

Tabelle 7: Energiebedarf, Treibhausgasemissionen und Kosten durch den Transport je Tonne Gärrest bzw. Aufbereitungsprodukt. Angenommene Transportentfernung von 300 km. Der Transport erfolgt durch LKW mit Leerfahrt auf dem Rückweg. Abschreibung der Maschinenkosten und der kumulierte Energieaufwand wurden mithilfe der KTBL-Datenbank ermittelt.

	Kosten				kumulierter Energieaufwand			Treibhausgas emissionen		
	Maschine	Diesel	Personal	Summe	Maschine	Diesel	Summe	Maschine	Diesel	Summe
	€/Tonne				MJ/Tonne			kg CO_2eq/Tonne		
Feste Produkte										
frisch	3,60	11,83	5,89	**21,32**	14,0	620	**634**	0,73	38,0	**38,8**
getrocknet	4,64	15,34	7,61	**27,60**	17,8	805	**822**	0,93	49,4	**50,3**
Flüssige Produkte										
unbehandelter Gärrest und Flüssigprodukte[1)] außer ASL	3,51	11,07	5,64	**20,22**	11,2	574	**585**	0,59	35,2	**35,8**
Ammoniumsulfatlösung	3,51	11,14	5,64	**20,29**	11,2	578	**589**	0,59	35,5	**36,1**

[1)] Flüssigphase nach Separation, N-reduzierte Flüssigphase Stripverfahren, Konzentrate Vakuumverdampfung und Membranverfahren

3.4 Ausbringung

Die Ausbringung des unbehandelten Gärrests und der flüssigen Aufbereitungsprodukte mit Ausnahme der ASL wurde auf KTBL-Standard-Produktionsverfahren für Maissilage zurückgegriffen und die Ausbringmengen der einzelnen Produkte auf Basis der dort getroffenen Annahmen zum Nährstoffbedarf berechnet. Lediglich für die Ammoniumsulfatlösung wurde von einer Verwendung zur gezielten Stickstoffdüngung in Getreide ausgegangen.

Die möglichen Aufwandmengen werden zum einen durch die Obergrenze von max. 170 kg N je Hektar und Jahr aus organischen Düngemitteln begrenzt, die mit der im März 2017 beschlossenen Novellierung der Düngeverordnung (DüV 2017) in Zukunft auch für Gärreste anzuwenden ist. Zum anderen müssen ab 2018 für Stickstoff wie für Phosphor betriebliche Nährstoffvergleiche aufgestellt werden, um die Einhaltung von Kontrollwerten zu dokumentieren. So muss bei dieser Bilanzierung für Stickstoff für die Jahre 2018 bis 2020 nachgewiesen werden, dass ein Überschuss von 60 kg je Hektar und Jahr im Mittel der letzten drei Düngejahre nicht überschritten wird. Ab 2021 sinkt dieser Wert nochmals auf 50 kg N je Hektar und Jahr im betrieblichen Mittel. Für Phosphor betragen die festgelegten Kontrollwerte 20 (2018-2020) bzw. 10 kg P je Hektar und Jahr (ab 2020).

Bei der Ammoniumsulfatlösung handelt es sich um ein hochkonzentriertes und gut dosierbares N-Düngemittel. Aus diesem Grund wird für die ASL davon ausgegangen, dass diese nicht für eine Grunddüngung, sondern für die gezielte Stickstoffdüngung im Getreide mit einer einmaligen Gabe von 60 kg N/ha und a eingesetzt wird. Da dadurch zugleich eine große Menge Schwefel in den Boden eingebracht wird, sollte keine jährliche Verwendung auf derselben Fläche erfolgen, um eine Schwefelüberdüngung zu vermeiden.

Für die festen Aufbereitungsprodukte orientieren sich die Berechnungen am Einsatz von Festmist in den KTBL-Produktionsverfahren für Mais. In der Regel wird dieser jedoch nur alle zwei bis drei Jahre auf derselben Fläche ausgebracht, um eine Überversorgung mit Phosphor zu vermeiden. Mögliche Nährstoffüberschüsse müssen auch bei den Aufbereitungsprodukten in den Folgejahren in der Düngeplanung berücksichtigt werden. Feste Aufbereitungsprodukte werden häufig wegen ihrer Humuswirkung eingesetzt.

Aufgrund der unterschiedlichen Nährstoffgehalte und Anwendungsgebiete ergeben sich für die einzelnen Aufbereitungsprodukte unterschiedliche Aufwandmengen (Tab. 8). Da für feste Produkte außer der Einarbeitung keine emissionsmindernde Ausbringtechnik zur Verfügung steht, wird angenommen, dass diese nur auf unbestelltem Ackerland ausgebracht und umgehend eingearbeitet werden. Beim Gärrest und den Flüssigprodukten können die NH_3-Emissionen auch im wachsenden Bestand durch den Einsatz eines Schleppschlauchverteilers deutlich reduziert werden. Da die erste der beiden Gaben noch vor der Aussaat erfolgt, kann hier zusätzlich eingearbeitet und die NH_3-Verluste so weitestgehend minimiert werden.

In Tabelle 8 sind die Kosten, der Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen aus der Ausbringung und ggf. Einarbeitung des Gärrests und der Aufbereitungsprodukte dargestellt. Wie bei Lagerung und Transport wurden die vom KTBL ermittelten Kosten für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen der HfWU im Teilvorhaben 1 zur Verfügung gestellt. Die in Tabelle 8 ausgewiesenen Treibhausgasemissionen beinhalten nur die Emissionen aus der Bereitstellung der Technik und dem Dieselverbrauch. Die NH_3-Emissionsfaktoren sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Auch nach der Ausbringung des Gärrests und der Aufbereitungsprodukte kommt es zu Ammoniakemissionen, die zum einen den Mineraldüngerersatz reduzieren und zum anderen indirekte Lachgasemissionen bewirken. Wie für die Lagerung wurden im landwirtschaftlichen Emissionsinventar bisher nur für den unbehandelten Gärrest Emissionsfaktoren festgelegt (Haenel et al. 2016). Wegen des vergleichbaren Trockenmassegehalts wird der Emissionsfaktor für Rindergülle verwendet (Tab. 9). Für die Aufbereitungsprodukte wurden die Emissionsfaktoren für vergleichbare Düngemittel herangezogen, die es in der Zukunft zu überprüfen gilt. Für die frischen Feststoffe wird auf den Emissionsfaktor für Festmist zurückgegriffen, während für die getrockneten Feststoffe wie bei der Lagerung davon ausgegangen wird, dass es zu keinen Emissionen kommt, wenn diese nach Ausbringung rasch eingearbeitet werden. Für die Flüssigprodukte mit Ausnahme des Membrankonzentrats wird der Faktor für Schweingülle verwendet. Aufgrund des im Vergleich zum Gärrest geringeren Trockenmassegehalts kann von einer besseren Fließfähigkeit und Infiltration ausgegangen werden, wodurch die Emissionen geringer ausfallen als beim unbehandelten Gärrest. Dieser Effekt ist beim Membrankonzentrat noch ausgeprägter, weshalb hier auf den Emissionsfaktor für Jauche zurückgegriffen wird. Für die Ammoniumsulfatlösung wird in Anlehnung an Flessa et al. (2013) der EMEP-Faktor für Ammoniumsulfat (aktualisierter Wert aus EMEP 2016) verwendet (Tab. 9).

Tabelle 8: Kosten, Energiebedarf und Treibhausgasemissionen aus der Bereitstellung der Technik und dem Dieselverbrauch für die Ausbringung und Einarbeitung von unbehandeltem Gärrest und der Aufbereitungsprodukte. Angaben je Tonne ausgebrachter Gärrest oder ausgebrachtes Produkt.

Produkte Mechanisierung	**Menge je Gabe**	**Kosten**				**Kumulierter Energieaufwand**			**Treibhausgasemissionen**		
		Ma-schine	**Diesel**	**Personal**	**Summe**	**Maschine**	**Diesel**	**Summe**	**Maschine**	**Diesel**	**Summe**
	t/ha	**€/Tonne**				**MJ/Tonne**			**kg CO_2eq/Tonne**		
Feste Produkte – 1 Gabe, nur unbestellter Acker mit Einarbeitung innerhalb einer Stunde[1)]											
Stalldungstreuer, 16 t; 120 kW[2)]											
Trockengut Band- und solargestützte Trocknung	8	2,67	3,19	1,47	**7,35**	19,3	81,7	**102**	7,99	5,02	**13,1**
Festphase aus der Pressschneckenseparation	20	1,86	1,84	0,88	**4,58**	13,7	43,3	**57,0**	3,51	2,66	**6,17**
Festphase Membranverfahren (PSS und Dekanter)	20	1,73	1,73	0,80	**4,26**	12,8	40,1	**52,8**	3,46	2,46	**5,92**
unbehandelter Gärrest und Flüssigphase (nicht aufbereitet / aufbereitet) – 2 Gaben: 1. Gabe auf unbestellten Acker mit Einarbeitung innerhalb einer Stunde, 2. Gabe in den Bestand											
Pumptankwagen, 20 m³; Schleppschlauchverteiler, 24 m; 176 kW											
Membrankonzentrat											
1. Gabe mit Einarbeitung	7	3,17	1,24	0,74	**3,47**	23,29	82,00	**105**	15,5	5,03	**20,5**
2. Gabe	7	1,49	1,24	0,74	**3,47**	8,24	34,43	**42,7**	0,43	2,11	**2,54**
Summe	14	4,66	2,49	1,48	**6,94**	31,5	116	**148**	15,9	7,15	**23,1**
Konzentrat Verdampfung											
1. Gabe mit Einarbeitung	10	2,59	1,13	0,67	**3,22**	18,3	62,1	**80,4**	10,94	3,82	**14,76**
2. Gabe	10	1,42	1,13	0,67	**3,22**	7,8	28,8	**36,6**	0,41	1,77	**2,18**
Summe	20	4,01	2,26	1,35	**6,44**	26,1	90,9	**117**	11,3	5,59	**17,0**
unbehandelter Gärrest											
1. Gabe mit Einarbeitung	15	2,15	1,05	0,62	**3,04**	14,4	47,2	**61,6**	7,41	2,90	**10,31**
2. Gabe	15	1,37	1,05	0,62	**3,04**	7,42	25,0	**32,4**	0,39	1,54	**1,92**
Summe	30	3,51	2,09	1,25	**6,07**	21,9	72,2	**94,0**	7,80	4,44	**12,2**
N-reduzierte Flüssigphase Stripverfahren											
1. Gabe mit Einarbeitung	20	1,92	1,00	0,60	**2,93**	12,5	39,3	**51,8**	5,65	2,42	**8,06**
2. Gabe	20	1,33	1,00	0,60	**2,93**	7,21	22,7	**29,9**	0,38	1,39	**1,77**
Summe	40	3,26	2,00	1,19	**5,86**	19,7	62,0	**81,7**	6,02	3,81	**9,83**
Ammoniumsulfatlösung, 1 Gabe in den wachsenden Getreidebestand											
Anhängepflanzenschutzspritze, 24 m, 3 000 l; 83 kW											
ASL Verdampfung / Stripverfahren	1	5,60	2,59	2,82	**11,01**	25,0	57,0	**82,0**	1,30	3,53	**4,83**
ASL Abluftreinigung Trocknung	2	4,00	1,85	2,01	**7,86**	17,8	40,7	**58,6**	0,93	2,52	**3,45**

[1)] Einarbeitung Festprodukte: Stoppelgrubbern, tief. Einarbeitung Gärrest und Flüssigprodukte Eggen mit Scheibenegge, tief

[2)] Werte beinhalten das Beladen mit Radlader (83 kW; Leichtgutschaufel, 3 m³).

Tabelle 9: Verwendete Emissionsfaktoren für NH3-Verluste nach der Ausbringung von unbehandeltem Gärrest und den Aufbereitungsprodukten. Emissionsfaktoren aus dem Emissionsinventar für die deutsche Landwirtschaft wurden Haenel et al. (2016) entnommen.

Produkt	NH_3-N kg/kg NH_4-N	Quelle/Erläuterung Emissionsfaktor
Feste Aufbereitungsprodukte		
Feststoffe frisch		
Breitverteiler, Einarbeitung ≤ 1 h unbestellter Acker	0,09	nach Emissionsinventar: EF für Festmist Breitverteiler, Einarbeitung ≤ 1 h
Feststoffe getrocknet		
Breitverteiler, Einarbeitung ≤ 1 h unbestellter Acker	0	Stabilisierung durch Trocknung: keine Emissionen (vgl. FNR 2014)
Gärrest und flüssige Aufbereitungsprodukte		
unbehandelter Gärrest		
Schleppschlauch, Einarbeitung ≤ 1 h unbestellter Acker	0,04	nach Emissionsinventar: Emissionsfaktor für Rindergülle (TM-Gehalt vergleichbar)
Schleppschlauch, unterhalb der Vegetation	0,35	
Flüssigphase der Feststoffseparation, N-reduzierte Flüssigphase Stripverfahren, Konzentrat Vakuumverdampfung		
Schleppschlauch, Einarbeitung ≤ 1 h unbestellter Acker	0,02	nach Emissionsinventar: Emissionsfaktor für Schweinegülle (TM-Gehalt vergleichbar: erhöhte Fließfähigkeit im Vgl. zu Rindergülle)
Schleppschlauch, unterhalb der Vegetation	0,125	
Konzentrat Membranverfahren		
Schleppschlauch, Einarbeitung ≤ 1 h	0,01	nach Emissionsinventar: EF für Jauche (sehr gut fließfähiges Material mit höherer Infiltration als Schweinegülle)
Schleppschlauch, unterhalb der Vegetation	0,1	
Ammoniumsulfatlösung	0,074	nach Flessa et al. (2013: Emissionsfaktor angepasst nach EMEP 2016

3.5 Mineraldüngerersatz und Nährstofferlöse

Durch den unbehandelten Gärrest und die Aufbereitungsprodukte können mineralische Düngemittel teilweise ersetzt werden. Die Einsparungen an Energieaufwand für die Herstellung der Mineraldünger können ebenso wie die vermiedenen Treibhausgasemissionen aus deren Herstellung den Verfahren gutgeschrieben werden. Werden der Gärrest oder die Aufbereitungsprodukte im Rahmen der überregionalen Verwertung an andere Landwirte abgegeben, können außerdem Erlöse für die Nährstoffe erzielt werden. In den Berechnungen werden nur Stickstoff und Phosphor berücksichtigt, für die das Problem zum Teil hoher regionaler Überschüsse besteht.

Bei der Ermittlung des Mineraldüngerersatzes wird nur die Nährstoffmenge berücksichtigt, die tatsächlich in den Boden gelangt und dort pflanzenverfügbar ist. N-Verluste aus der Aufbereitung, Lagerung und Ausbringung werden von der ursprünglich im Gärrest enthaltenen N-Menge abgezogen. Da sich die Verluste je nach Verfahren und Produkt unterscheiden, ergeben sich für jedes Verfahren unterschiedliche Mengen an Stickstoff, die für den Mineraldüngerersatz anrechenbar sind. Für Phosphor treten demgegenüber keine Verluste auf.

In den Berechnungen wird die Düngewirkung des organischen Stickstoffs nur anteilsmäßig für das Jahr der Anwendung berücksichtigt. Während der als NH_4-N vorliegende mineralische Stickstoff noch im Anwendungsjahr pflanzenverfügbar ist, wird nur ein kleiner Teil des organischen Stickstoffs bereits im ersten Jahr mineralisiert. Es wird von einer Mineralisierungsrate von 5 % im Anwendungsjahr ausgegangen (Tab. 10).

Die Ergebnisse der Universität Hohenheim Teilvorhaben 3 konnten für die Bewertung der Düngewirkung nicht verwendet werden, da aus diesen nur für einen Teil der Produkte ein produktspezifisches Mineraldüngeräquivalent abgeleitet werden konnte. Um die Aussage der Berechnungen nicht durch verschiedene Bewertungsgrundlagen zu verzerren, wurde auf die o.g. abgesicherten Literaturwerte zurückgegriffen. Eine umfassendere Analyse der Düngewirkung von Aufbereitungsprodukten sollte jedoch in Zukunft erfolgen.

Tabelle 10: Bewertung der Nährstoffe in den Gärresten und Aufbereitungsprodukten. Anrechnung der Düngewirkung, Nährstoffwert, sowie kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen bei der Bereitstellung des Nährstoffes als Mineraldünger.

Nährstoff	**Anrechnung für Mineraldünger-ersatz im Jahr der Anwendung**	**Nährstoffwert[1)]**	**Mineraldüngerherstellung**	
			KEA[2)]	**THG[3)]**
	%	**€**	**MJ**	**kg CO_2eq**
			je t N bzw. P_2O_5	
Phosphor	100 %	382	5,29	1,72
Stickstoff				
N_{org}	5 %	843	81,6	62,1
N_{min} (=NH_4-N)	100 %			

1) Nach KTBL (2016a)

2) Nach ecoinvent© (2015)

3) Stickstoff nach TI (2016); Phosphor nach KTBL (2016b)

Die Mengen an eingespartem Stickstoff- bzw. Phosphor aus Mineraldüngern werden in der Energie- und Treibhausgasbilanzierung berücksichtigt und mit den KEA- und THG-Kennwerten für die Mineraldüngerherstellung (Tab. 10) verrechnet. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wird davon ausgegangen, dass lediglich mit den überregional verwerteten Nährstoffen Erlöse erzielt werden können. Außerdem wird bei der Ermittlung der Nährstofferlöse die Zahlungsbereitschaft der Landwirte in den Ackerbauregionen berücksichtigt, die i.A. für die Nährstoffe in organischen Düngemitteln geringer ist als für die Nährstoffe in mineralischen Düngemitteln. Dies liegt vor allem daran, dass die Nachlieferung aus dem organischen N-Pool in den Folgejahren ist schwer einzuschätzen ist, ein gewisser Anteil bei der Nährstoffbilanzierung jedoch angerechnet werden muss.

Da sich Gärrest und Aufbereitungsprodukte nicht nur hinsichtlich der Nährstoffgehalte, sondern auch der sonstigen Eigenschaften unterscheiden, hat das KTBL produktspezifische Faktoren abgeleitet, die Abschläge in der Zahlungsbereitschaft für die verschiedenen Produkte einbeziehen. Für den unbehandelten, nicht hygienisierten Gärrest wird davon ausgegangen, dass aufgrund der fehlenden Hygienisierung lediglich 50 % der pflanzenverfügbaren Nährstoffe vergütet werden (Tab. 11). Demgegenüber sind Landwirte auch bei frischen, nicht hygienisierten Feststoffen aus der Separierung durchaus bereit, 90 % des Nährstoffwerts für das erste Jahr zu bezahlen, da sie die Humuswirkung der Feststoffe stark honorieren. Bei den stabilisierten getrockneten Feststoffen wird davon ausgegangen, dass sich Abschläge sogar völlig vermeiden lassen.

Mit der Ammoniumsulfatlösung, die keinen organischen Stickstoff mehr enthält und hygienisch unbedenklich ist, lassen sich ebenfalls deutlich höhere Erlöse bezogen auf den enthaltenen N erzielen als für den unbehandelten Gärrest. Da jedoch gegebenenfalls in neue Technik investiert oder die ASL durch Lohnunternehmer ausgebracht werden muss, ist je nach N-Gehalt von geringen Abschlägen auf den eigentlichen Nährstoffwert der ASL auszugehen.

Die weiteren Flüssigprodukte werden nach Einschätzung des KTBL nur geringfügig besser vergütet als der unbehandelte Gärrest, da entweder keine Hygienisierung erfolgte oder Stickstoff zu höheren Anteilen in organischer Form vorliegt (Tab. 11).

Tabelle 11: Erlöspotenzial für den unbehandelten Gärrest und die Aufbereitungsprodukte bei der überregionalen Verwertung. Faktor Nährstoffwert drückt den Anteil an Nährstoffen aus, für den voraussichtlich ein Erlös erzielt wird. Die Erlöse beziehen sich nur auf die im Anwendungsjahr verfügbaren Nährstoffe (vgl. Tab. 10).

Produkt	Vor-/Nachteile	Faktor Nährstoff-wert	anzuwenden auf
Rohgärrest	nicht hygienisiert	**0,5**	unbehandelter Gärrest
Feste Aufbereitungsprodukte			
Festphase frisch	nicht hygienisiert jedoch positive Humuswirkung	**0,9**	unbehandelte Festphase Pressschnecke Festphase Membranverfahren (Press-schnecke plus Flockung/Dekanter)
Festphase ge-trocknet	stabilisiert zusätzlich positive Humuswirkung	**1**	Trockengut Bandtrocknung und solare Trocknung
Flüssige Aufbereitungsprodukte			
Flüssigphase Pressschnecke	nicht hygienisiert günstigeres N_{min}/N_{org}-Verhältnis im Vergleich zu unbehandeltem Gärrest	**0,6**	unbehandelte Flüssigphase Pressschnecke
Flüssigphase aufbereitet	hygienisiert schlechteres N_{min}/N_{org}-Verhältnis im Vergleich zu unbehandeltem Gärrest	**0,6**	N-reduzierte Flüssigphase Stripverfahren Konzentrate Vakuumverdampfung und Membranverfahren
Ammoniumsulfatlösung			
ASL 17%	hygienisch unbedenklich nur verfügbarer N_{min} geringer N- und S-Gehalt als 30% ASL ggf. zusätzliche Technik	**0,8**	ASL Bandtrocknung
ASL 30%	hygienisch unbedenklich nur verfügbarer N_{min} ggf. zusätzliche Technik	**0,9**	ASL Stripverfahren und Vakuumverdampfung

3.6 Berücksichtigung der Wärmenutzung

Für die Nutzung der Abwärme aus der Verstromung des Biogases werden in vielen Treibhausgasbilanzierungen keine Emissionen angerechnet. Damit wird davon ausgegangen, dass die Wärme als „Abfall“ anfällt und keiner anderweitigen Nutzung zugeführt werden kann, bei der dadurch fossile Energieträger ersetzt werden, z. B durch ein Nahwärmenetz. Nach EEG ist aber der Einsatz der Wärme als Ersatz für andere Formen der Wärmeerzeugung gewünscht bzw. gefordert. Daher wurde bei der Ermittlung der Energie- und Treibhausgasbilanz auch der Fall betrachtet, dass bereits eine Nutzung der BHKW-Abwärme besteht, durch die fossile Ressourcen ersetzt werden. Als Referenz für die Höhe der Emissionen bzw. Energieaufwendungen je Kilowattstunde thermisch wurde Erdgas als fossiler Energieträger herangezogen (Tab. 12). Solare Wärme verursacht im Gegensatz dazu keine Treibhausgasemissionen bzw. Energieaufwand.

Tabelle 12: Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit Erdgas (KEA nach ecoinvent© (2015); THG nach probas-Datenbank des Umweltbundesamtes)

	KEA MJ/kWh_{th}	THG $kg\ CO_2eq/kWh_{th}$
Wärme (Erdgas)	4,6	0,24

In den Berechnungen wurden zwei Varianten gegenübergestellt:

a) bestehende maximale externe Wärmenutzung
   Es wird davon ausgegangen, dass vor Inbetriebnahme der Aufbereitung bereits eine externe Nutzung der gesamten verfügbaren BHKW-Abwärme[2] stattfindet. Aufbereitungsverfahren mit Wärmebedarf verdrängen bei dieser Betrachtungsweise die externe Wärmenutzung, je nach Wärmebedarf des Verfahrens teilweise oder vollständig. Die für eine externe Nutzung nicht mehr zur Verfügung stehende Wärme muss daher durch konventionelle/fossile Ressourcen bereitgestellt werden. Dadurch entstehen zusätzliche Emissionen, die dem Verfahren angerechnet werden müssen.

b) keine Verdrängung einer externe Wärmenutzung
   Es wird davon ausgegangen, dass die BHKW-Abwärme vor Inbetriebnahme der Aufbereitung nicht extern genutzt wird. In diesem Fall werden keine zusätzlichen Emissionen für die Wärmenutzung zur Aufbereitung der Gärreste angerechnet.

3.7 Szenarien der Nährstoffentfrachtung

Neben Stickstoffüberschüssen besteht in vielen Regionen mit Intensivtierhaltung das Problem der Phosphorüberschüsse. Je nach regionaler Situation wäre eine spürbare Entlastung bereits mit einer Teilentfrachtung, gegebenenfalls auch nur für einen der beiden Nährstoffe, zu erreichen. Es müssen also nicht immer zwingend alle Gärreste bzw. Aufbereitungsprodukte überregional verwertet werden. Die Gärrestaufbereitung bietet hier mit einigen der betrachteten Verfahren die Möglichkeit, die Nährstoffströme aufzutrennen und z. B. Stickstoff in Form einer aufkonzentrierten Ammoniumsulfatlösung gezielt und mit geringem Transportaufwand aus der Region zu bringen. Daher wurden neben einer vollständigen Entfrachtung auch Szenarien betrachtet, bei denen das Entfrachtungsziel entweder auf Stickstoff oder auf Phosphor ausgerichtet ist (Tab. 13). So sollte geprüft werden, ob sich in Abhängigkeit von der regionalen Nährstoffsituation Vorteile für bestimmte Aufbereitungsverfahren zeigen.

Tabelle 13: Betrachtete Entfrachtungsszenarien

Szenario	Entfrachtungsziel
100%	überregionale Verwertung aller Nährstoffe = Transport des gesamten Gärrests bzw. aller Aufbereitungsprodukte
P50	überregionale Verwertung von 50% der P-Fracht im Gärrest
N50	überregionale Verwertung von 50% der N-Fracht im Gärrest

Während beim unbehandelten Gärrest immer gleiche Anteile an Stickstoff und Phosphor in die überregionale Verwertung gelangen, ist dies bei den Aufbereitungsverfahren für die Szenarien P50 und N50 aufgrund der unterschiedlichen Auftrennung der Nährstoffe in die Produkte nicht der Fall. Je nach Zielgröße werden andere Produkte aus der Region exportiert und damit auch unterschiedliche Mengen am jeweils anderen Nährstoff. Dies wirkt sich auf die erzielbaren Erlöse aus, da lediglich der überregional verwertete Anteil vergütet wird (vgl. Kap. 3.5).

[2] verfügbare BHKW-Abwärme: 75 % nach Abzug von 25 % für Fermenterbeheizung

4 Ergebnisse und Diskussion

Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich, soweit nicht explizit ausgewiesen, auf eine Anlagengröße von 2 MW_{el}. Für einen Großteil der Abbildungen finden sich Datentabellen im Anhang.

4.1 Aufbereitungsverfahren: Stoffströme, Energiebedarf und Treibhausgasemissionen

Massenströme

Je nach Aufbereitungsverfahren fallen zwei oder mehr Produkte in unterschiedlichen Massenanteilen an: Bei der Feststoffseparation mittels Pressschnecke wird der Gärrest zunächst in eine feste und eine flüssige Phase aufgetrennt, wobei nur ca. 13 Massen-% auf die feste Phase entfallen (Abb. 7). Bei den beiden betrachteten Trocknungsverfahren wird sowohl die Festphase als auch ein Teil der Flüssigphase weiter aufbereitet: Dadurch kann das ursprüngliche Masse des Gärrestes um 23 (Bandtrocknung) bzw. 30 % (solare Trocknung) reduziert werden, die in Form von Wasserdampf mit der Abluft entzogen wird. Die Nutzung der solaren zusätzlich zur BHKW-Abwärme beim Solarverfahren ermöglicht also eine weitergehende Volumenreduktion, ohne dass Energieaufwand oder Treibhausgasemissionen durch die Wärmenutzung im Fall einer Bilanzierung unter Berücksichtigung der Wärmenutzung angerechnet werden müssen. Durch die Abluftreinigung beim Bandtrocknungsverfahren entsteht zudem eine geringe Menge Ammoniumsulfatlösung, die ca. 2 % der ursprünglichen Gärrestmasse ausmacht. Der entstehende Feststoff entspricht 5 bzw. 6 % (Band- bzw. solare Trocknung) der ursprünglichen Masse an Gärrest, während 70 bzw. 64 % als nicht weiter aufbereitete Flüssigphase verbleiben.

Strippung und Vakuumverdampfung bereiten lediglich die Flüssigphase aus der Separation weiter auf, weshalb der Anteil der Festphase bei diesen beiden Verfahren dem aus der Pressschneckenseparation entspricht (13 %; Abb. 7). Durch die Strippung kommt es nur in sehr geringem Umfang zu einer Volumenreduktion der Flüssigphase, so dass diese noch immer ca. 80 % der ursprünglichen Gärrestmenge ausmacht. Lediglich 1 % entweicht in Form von Wasserdampf, ca. 5 % liegen in Form einer Ammoniumsulfatlösung vor. Bei der Vakuumverdampfung hingegen können 45 % des Gärrestvolumens als Wasserdampf bzw. Kondensat abgetrennt werden, die verbleibende Flüssigphase entspricht nur noch 37 % der Ausgangsmenge. Zusätzlich fällt auch hier eine Ammoniumsulfatlösung an, in vergleichbarem Umfang wie bei der Strippung (Abb. 7).

Für das Membranverfahren bedarf es einer aufwendigeren Feststoffabtrennung. Durch die zusätzlichen Verfahrensschritte mit Flockung und Dekanterzentrifuge erhöht sich der Massenanteil der Festphase bei diesem Verfahren auf 22 % des ursprünglichen Gärrestanfalls. Die entstehende Flüssigphase wird anschließend weiter reduziert, so dass lediglich ca. 40 % der Ausgangsmenge verbleiben, während ungefähr dieselbe Menge an Permeat entsteht, dass ggf. sogar Direkteinleiterqualität aufweist (Abb. 7).

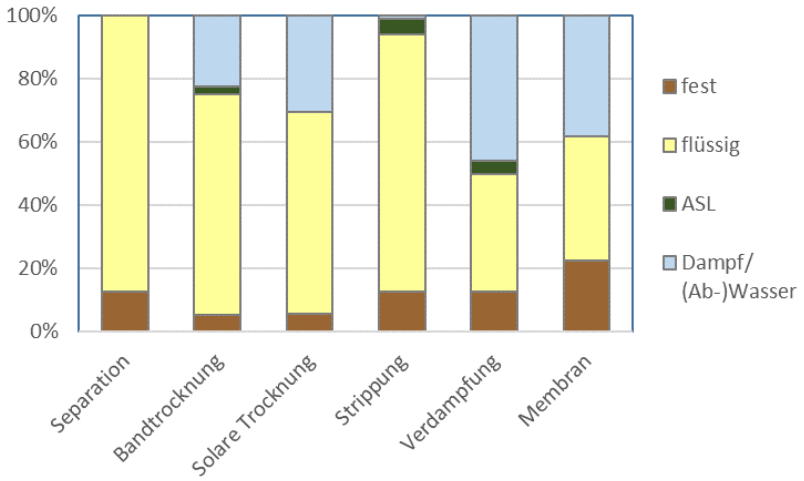


Abbildung 7: Massenverteilung der einzelnen Produkte bei den betrachteten Aufbereitungsverfahren. Prozentuale Anteile beziehen sich auf die ursprünglich angefallene Menge an unbehandeltem Gärrest.
Bei Band- und solarer Trocknung wird zur Ausnutzung der verfügbaren BHKW-Abwärme neben der Festphase auch ein Teil der Flüssigphase der Separation getrocknet.

Nährstoffgehalte der Aufbereitungsprodukte

Die in den einzelnen Verfahren anfallenden Fest- bzw. Flüssigprodukte unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Nährstoffgehalte, zum einen durch die Aufkonzentration in Folge der Volumenreduktion, zum anderen durch die gezielte Abtrennung z. B. von Stickstoff in einigen Verfahren. Bereits durch den in allen Verfahren stattfindenden ersten Aufbereitungsschritt, die Separation mit der Pressschnecke, kommt es zu Verschiebungen in der Nährstoffzusammensetzung aufgrund unterschiedlicher Abscheidegrade der einzelnen Nährstoffe (Tab. 4). So liegen organischer Stickstoff und Phosphor im Vergleich zum Ausgangsgärrest in höheren Konzentrationen in der Festphase vor, die löslichen Kationen, wie Ammoniumstickstoff und Kalium hingegen verstärkt in der Flüssigphase (Abb. 8).

Durch die Trocknung kommt es zu einer sehr starken Aufkonzentration in den Feststoffen von Band- und solarer Trocknung, es ergeben sich entsprechend hohe Konzentrationen an allen Nährstoffen mit Ausnahme des Ammoniumstickstoffs: Dieser geht zum überwiegenden Teil in Form von NH_3 in die Abluft über. In den getrockneten Feststoffen liegt Stickstoff daher vor allem in organisch gebundener Form vor. Wird die Abluft der Trocknung in einem Abluftwäscher behandelt, kann NH_3 fast vollständig durch zurückgehalten und in eine Ammoniumsulfatlösung überführt werden. Bei der solaren Trocknung ist eine Abluftwäsche in der Regel nicht möglich und es kommt zu deutlichen Ammoniakverlusten in die Atmosphäre, die in Abbildung 8 jedoch nicht dargestellt werden können.

Die Gehalte in den Flüssigphasen der beiden Trocknungsverfahren unterscheiden sich nicht von denen der Pressschneckenseparation, da sie nicht weiterbehandelt werden. Ebenso entsprechen die Gehalte in den Festphasen des Stripverfahrens und der Vakuumverdampfung denen nach der Separation mit der Pressschnecke. Beim Stripverfahren mit der nur geringen Volumenreduktion kommt es zu einer kaum merklichen Aufkonzentration von N_{org}, P und K in der Flüssigphase. Der Ammoniumstickstoff hingegen wird durch die Strippung zu einem großen Teil in eine Ammoniumsulfatlösung überführt, die eine höhere NH_4-N-Konzentration aufweist als bei der Abluftreinigung.

Bei der Vakuumverdampfung wird das Volumen der Flüssigphase um mehr als die Hälfte reduziert, so dass sich die Konzentrationen an N_{org}, P und K mehr als verdoppeln. Das größtenteils als NH_3 in den Brüden übergegangene NH_4-N findet sich nach der Brüdenwäsche in einer Ammoniumsulfatlösung.

Die Nährstoffkonzentrationen in der Festphase im Membranverfahren sind durch die aufwendigere Feststoffabtrennung höher als bei den Feststoffen der anderen Verfahren, abgesehen von der Trocknung. Dies ist insbesondere für Phosphor der Fall, für den durch die Dekanterzentrifuge eine sehr hohe Abscheidung in die Festphase erreicht werden kann. Entsprechend gering ist, trotz der deutlichen Volumenreduktion der Flüssigphase, der P-Gehalt der Membrankonzentrate. Anders als bei Strippung und Verdampfung verbleibt NH_4-N in den Konzentraten und liegt, wie auch Kalium, aufgrund der Volumenreduktion in deutlich höheren Konzentrationen vor als in der ursprünglichen Flüssigphase. Die Aufkonzentration ist jedoch geringer als bei der Vakuumverdampfung.

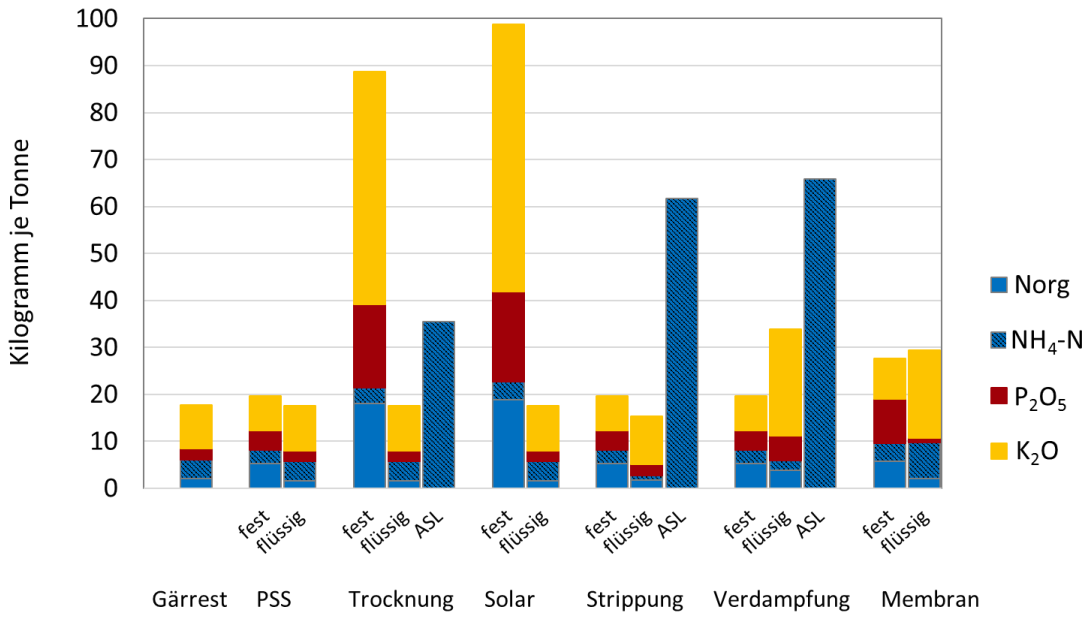


Abbildung 8: Nährstoffgehalte des unbehandelten Gärrests und der einzelnen Produkte der betrachteten Gärrestaufbereitungsverfahren. Bei Band- und solarer Trocknung wird zur Ausnutzung der verfügbaren BHKW-Abwärme neben der Festphase auch ein Teil der Flüssigphase der Separation getrocknet.

Nährstofffrachten der Aufbereitungsprodukte

Für die Beurteilung der Nährstoffflüsse reichen die Nährstoffgehalte alleine nicht aus, da diese für unterschiedlich große Massenflüsse gelten. Zusätzlich muss auch die Verteilung der Nährstofffrachten betrachtet werden, die in Abbildung 9 dargestellt ist. Der Großteil der Nährstoffe befindet sich bei allen Verfahren - mit Ausnahme des Membranverfahrens - in den Flüssigprodukten einschließlich der Ammoniumsulfatlösung, sofern diese anfällt. Die Feststoffabtrennung mit der Pressschnecke führt z. B. für P und N_{org} zu einer Aufkonzentration in der Festphase. Es wird jedoch nur ein geringer Massenanteil abgetrennt, und somit ist der Anteil dieser in der Festphase enthaltenen Nährstoffe an der Gesamtfracht der entsprechenden Nährstoffe vergleichsweise gering. Lediglich durch die Dekanterzentrifuge ist für P und in weniger ausgeprägtem Umfang für N_{org} eine deutliche Entfrachtung der Flüssigphase erreichbar. Auch durch die teilweise Trocknung der Flüssigphase kann bei Band- und solarer Trocknung ein zusätzlicher, jedoch begrenzter Teil der Nährstofffracht in feste Form überführt werden.

Bei Strippung und Verdampfung wird ein Großteil des NH_4-N aus der Flüssigphase entfernt, der überwiegende Teil ist in der Ammoniumsulfatlösung gebunden. Für die anderen Nährstoffe und auch N_{org} ergeben sich für die beiden Verfahren keine Änderungen der Fracht im Vergleich zur Flüssigphase der Separation. Bei der Bandtrocknung, für die das NH_4-N aus der Festphase und damit dem deutlich kleineren Massenstrom stammt, liegt ein entsprechend geringerer Anteil an der gesamten NH_4-N-Fracht in der Ammoniumsulfatlösung vor.

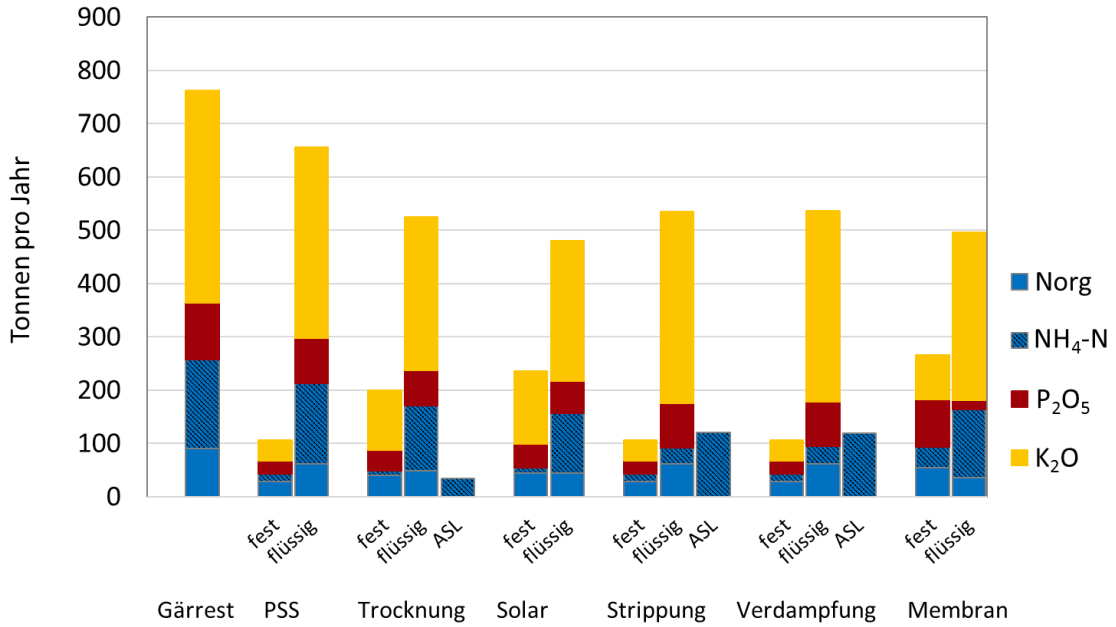


Abbildung 9: Verteilung der Nährstofffrachten im unbehandelten Gärrest auf die einzelnen Produkte der betrachteten Gärrestaufbereitungsverfahren. Bei Band- und solarer Trocknung wird zur Ausnutzung der verfügbaren BHKW-Abwärme neben der Festphase auch ein Teil der Flüssigphase der Separation getrocknet.

Kumulierter Energieaufwand der Aufbereitungsverfahren

Für den kumulierten Energieaufwand (KEA) der betrachteten Gärrestaufbereitungsverfahren (nur Aufbereitungsschritt, ohne Lagerung und landwirtschaftliche Verwertung) zeigen sich deutliche Unterschiede für die Verfahren (Tab. 14). Insgesamt tragen Anlagenerrichtung und Betriebsmittelbedarf nur zu einem geringen Teil des KEA der Aufbereitungsverfahren bei. Die geringsten Aufwendungen sind für die Pressschneckenseparation notwendig, die mit geringem Technikaufwand verbunden ist, keiner weiteren Betriebsmittel bedarf, keine Wärme benötigt und einen vergleichsweise geringen Strombedarf (Tab. 4) hat. Die Verfahren für die weitere Aufbereitung der Fest- und Flüssigphase sind demgegenüber mit deutlich höheren Energieaufwendungen verbunden. Wird durch die Aufbereitung eine zuvor bestehende Wärmenutzung verdrängt, so dass fossile Ressourcen aufgewendet werden müssen, um diese zu ersetzen, entstehen durch den Wärmebedarf der Aufbereitung die höchsten Energieaufwendungen. Die beiden auf die maximale Wärmenutzung ausgelegten Trocknungsverfahren weisen in diesem Fall in der Summe entsprechend den höchsten Energieaufwand auf. Wird für die Wärmenutzung kein Energieaufwand berücksichtigt, verursacht der Strombedarf den Großteil des KEA der Aufbereitungsverfahren und das stromintensive Membranverfahren benötigt dann mit Abstand die meiste Gesamtenergie. Bei der solargestützten Trocknung wird zusätzlich solare Wärme genutzt, die 22 % der insgesamt eingesetzten Wärme ausmacht. Diese ist jedoch nicht mit einem Energieaufwand verbunden.

Tabelle 14: Kumulierter Energieaufwand der betrachteten Aufbereitungsverfahren

Aufbereitungs-verfahren	**Anlagen-errichtung**	**Aufbereitung Betriebsmittel**	**Aufbereitung Strom**	**Aufbereitung Wärme**	**Summe**	***Summe ohne Wärme***
	MJ / m³ unbehandeltem Gärrest					
Gärrest	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,00**	***0,00***
Separation - PSS	0,39	0,00	5,72	0,00	**6,12**	***6,12***
Bandtrocknung	8,28	2,85	183	1350	**1544**	***194***
Solare Trocknung	18,9	0,00	118	1350	**1486**	***136***
Strippung	12,2	10,8	78,9	350	**452**	***102***
Verdampfung	12,2	10,6	87,3	951	**1061**	***110***
Membran	16,9	9,86	255	0,00	**282**	***282***

Treibhausgasemissionen der Aufbereitungsverfahren

Wird nur der Aufbereitungsschritt betrachtet, gelten für die Treibhausgasemissionen die gleichen Aussagen wie für den kumulierten Energieaufwand: Anlagenerrichtung und Betriebsmittel spielen nur eine untergeordnete Rolle, Wärme- (sofern zu berücksichtigen) bzw. Strombedarf stellen den höchsten Anteil an den Emissionen (Tab. 15). Für die Treibhausgasemissionen sind jedoch auch die gasförmigen Emissionen zu berücksichtigen, die direkt oder indirekt treibhausgaswirksam sind. Bei der Aufbereitung selbst kommt es bei keinem der Verfahren zur Emissionen von direkt wirksamen Treibhausgasen wie Lachgas oder Methan. Allerdings treten bei der Trocknung NH_3-Verluste auf, die eine indirekte Treibhausgaswirkung haben. Auch durch die Abluftreinigung bei der Bandtrocknung kann nicht der gesamte Ammoniak aus der Abluft aufgefangen werden, so dass hier geringe Treibhausgasemissionen anzurechnen sind. Bei der solaren Trocknung, für die hier keine Abluftreinigung berücksichtigt wurde und das NH_3 aus der Festphase in die Atmosphäre gerät, entstehen klimawirksame Emissionen in der Größenordnung der Emissionen aus dem Strombedarfs. Wie für den KEA ergeben sich aus der Nutzung der solaren Wärme bei diesem Verfahren keine Treibhausgasemissionen.

Tabelle 15: Treibhausgasemissionen der betrachteten Aufbereitungsverfahren

Aufbereitungs-verfahren	Anlagen-errichtung	Aufbereitung Betriebsmittel	Aufberei-tung Strom	Aufberei-tung Wärme	gasförmige Emissionen	Summe mit Wärme	Summe *ohne Wärme*
	kg CO_2eq / m³ unbehandeltem Gärrest						
Gärrest	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,00**	***0,00***
Separation - PSS	0,01	0,00	0,29	0,00	0,00	**0,30**	***0,30***
Bandtrocknung	0,23	0,17	9,32	71,6	0,51	**81,8**	***10,2***
Solare Trocknung	1,09	0,00	6,01	71,6	6,19	**84,9**	***13,3***
Strippung	0,34	0,65	4,03	18,6	0,00	**23,6**	***5,00***
Verdampfung	0,34	0,64	4,45	50,4	0,00	**55,9**	***5,50***
Membran	0,47	0,59	13,0	0,00	0,00	**14,1**	***14,1***

4.2 Entfrachtungsziel alle Nährstoffe (Entfrachtungsszenario „100%“)

Ziel im vorliegenden Projekt war es, zu prüfen, ob sich durch die Aufbereitung Vorteile für die Lagerung und Verwertung der Produkte ergeben, die die zusätzlichen Energieaufwendungen oder Emissionen aus der Aufbereitung selbst ausgleichen können. Einsparungspotenzial wird von Befürwortern der Gärrestaufbereitung vor allem in der zum Teil deutlichen Volumenreduktion gesehen, durch die sich Lager- und Transportkapazitäten verringern lassen. Dieser Effekt kommt vor allem zum Tragen, wenn davon ausgegangen wird, dass alle Nährstoffe und damit der gesamte Gärrest- bzw. Produktanfall überregional verwertet werden müssen. Daher wird zunächst das Szenario „100%“ betrachtet.

Tabelle 16: Anfallmengen und Nährstoffgehalte des unbehandelten Gärrests und der Aufbereitungsprodukte für die betrachtete Modellanlage

Verfahren	Produkt	Menge m³ FM/Jahr	Menge t FM/Jahr	TM % FM	N_{tot} g/kg FM	davon NH_4-N g/kg FM	P_2O_5 g/kg FM	K_2O g/kg FM	S g/kg FM
ohne Behandlung	Gärrest	42.860	42.860	7,9	6,00	3,90	2,50	9,30	0,40
Separation	PSS fest	15.491	5.422	30	8,06	2,84	4,31	7,35	0,71
	PSS flüssig	37.438	37.438	4,7	5,70	4,05	2,24	9,58	0,35
Bandtrocknung	PSS - flüssig	29.950	29.950	4,7	5,70	4,05	2,24	9,58	0,35
	Tr - Trockengut	12.528	2.255	86	21,4	3,35	17,8	49,5	1,72
	Tr - ASL	968	968	17	35,5	35,5	0,00	0,00	40,6
solare Trocknung	PSS - flüssig	27.438	27.438	5	5,70	4,05	2,24	9,58	0,35
	Sol - Trockengut	13.235	2.382	86	22,7	3,87	19,2	57,0	1,63
Stripverfahren	PSS - fest	15.491	5.422	30	8,06	2,84	4,31	7,35	0,71
	St - N-red flüssig	34.898	34.898	5	2,64	0,87	2,40	10,3	0,38
	St - ASL	1.969	1.969	35	61,7	61,7	0,00	0,00	81,0
Vakuumverdampfung	PSS - fest	15.491	5.422	30	8,06	2,84	4,31	7,35	0,71
	VV - Konzentrat	15.872	15.872	10	5,94	2,06	5,28	22,6	0,84
	VV - ASL	1.808	1.808	35	65,9	65,9	0,00	0,00	86,6
Membranverfahren	DZ/PSS - fest	19.564	9.640	28	9,63	3,96	9,38	8,60	1,66
	M - Konzentrat	16.863	16.863	7	9,73	7,64	0,99	18,72	8,68

Treibhausgasemissionen bei einer überregionalen Verwertung aller Nährstoffe (Entfrachtungs szenario 100%)

Die wichtigsten Faktoren, die bei einer Bilanzierung unter Einbeziehung der Verwertung von Gärrest und Aufbereitungsprodukten Treibhausgasemissionen verursachen, sind der Ferntransport, Strom- und ggf. Wärmebedarf, gasförmige Verluste sowie die Gärrest- bzw. Produktausbringung (Maschinenherstellung und Dieselverbrauch) (Abb. 10). Die Anlagenerrichtung hat, wie auch die Errichtung von Gärrest- oder Produktlagern, hat für die Gesamtbilanz eine geringe Bedeutung. Zugleich ergeben sich sowohl für die Gärrest- wie auch für die Verwertung der Aufbereitungsprodukte deutliche Treibhausgaseinsparungen durch den Ersatz von Mineraldünger. In allen Fällen übersteigen die Emissionen jedoch diese Einsparung, d.h. es ergibt sich immer eine positive Gesamtbilanz.

Wenn keine Emissionen für die Wärmenutzung durch die Aufbereitung angerechnet werden (Abb. 10 links), werden mit der Vakuumverdampfung die geringsten Nettoemissionen erreicht, der deutlich unter dem für die Verwertung des unbehandelten Gärrests liegt. Dies ist vor allem durch geringe Emissionen aus dem Ferntransport aufgrund der hohen Volumenreduktion begründet. Bei den anderen Verfahren mit einer nennenswerten Volumenreduktion (Trocknungs-, Membranverfahren) gleichen höhere Stromverbräuche oder zusätzliche gasförmige Verluste Vorteile der Volumenreduktion teilweise wieder aus.

Die Treibhausgasemissionen aus gasförmigen Verlusten von Stickstoff und Methan liegen mit Ausnahme der Bandtrocknung bei allen Verfahren in einer vergleichbaren Größenordnung (Abb. 10 links). Die geringeren Emissionen bei der Bandtrocknung beruhen auf zwei Effekten: Zum einen entstehen geringere Emissionen aus der Lagerung und Ausbringung der Aufbereitungsprodukte (Tab. 6 und 9). Zum anderen werden durch die Abluftreinigung NH_3-Verluste aus der Trocknung vermieden. Die Wirkung der Abluftreinigung wird am Beispiel der solaren Trocknung deutlich. Da diese hier nicht vorhanden ist, verringert der NH_3-Verlust die Einsparung an Mineraldünger merklich. Auch für die anderen Verfahren ergeben sich Unterschiede zu den Emissionen bei der Verwertung des unbehandelten Gärrest. Hier werden vor allem Lachgasemissionen während der Lagerung der Flüssigphase sowie geringere Feldemissionen nach der Ausbringung vermieden.

Wird die genutzte Wärme in der Bilanz berücksichtigt (Abb. 10 rechts), erhöht dies die Brutto- wie auch die Nettoemissionen der Verfahren mit Wärmebedarf z. T. um ein Vielfaches im Vergleich zum unbehandelten Gärrest oder den Verfahren, die nur Strom benötigen.

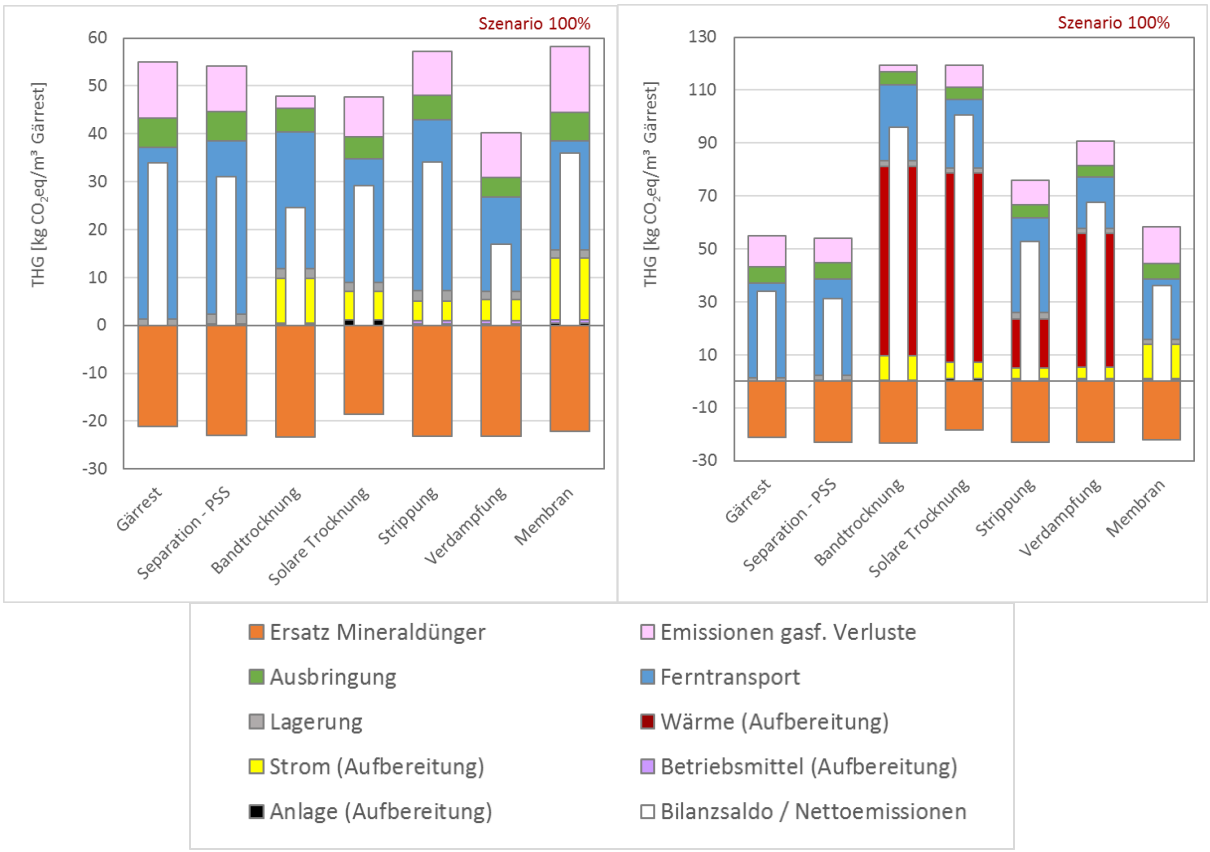


Abbildung 10: Treibhausgasemissionen der Verwertung des unbehandelten Gärrests und der Aufbereitungsprodukte bei einer vollständigen überregionalen Verwertung.
Links: Berechnung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung; rechts: Berechnung mit Emissionen aus der Wärmenutzung. Unterschiedliche Skalierung ist zu beachten.

Die Unterschiede zwischen den Verfahren zeigen sich deutlicher, wenn statt der absoluten Treibhausgasemissionen oder -einsparungen die Differenz der einzelnen Faktoren zum unbehandelten Gärrest betrachtet wird (Abb. 11). Negative Werte bedeuten Einsparung im Vergleich zum unbehandelten Gärrest, positive Werte zusätzliche Emissionen.

Wie schon in Abbildung 10 werden auch in Abbildung 11 die zum Teil hohen Einsparungen beim Ferntransport ersichtlich. Unterschiede bei den gasförmigen Verlusten sowie der Mineraldüngereinsparung und auch bei der Ausbringung sind in deutlicher erkennbar (Abbildung 11, links).

Alle Verfahren außer dem Membranverfahren führen zu einer Verringerung der Emissionen aus gasförmigen Verlusten gegenüber dem unbehandelten Gärrest. Dennoch wird auch beim Membranverfahren Mineraldünger eingespart, während bei der solaren Trocknung zusätzlicher Mineraldünger aufgewendet werden muss. Im Membranverfahren enthält die mit dem Dekanter abgeschiedenen Festphase deutlich mehr Stickstoff als nach der Pressschneckenseparation, was zu höheren NH_3 und N_2O-Emissionen führt. Für Lachgas wirken sich aufgrund dessen hoher Treibhausgaswirksamkeit die zusätzlichen Verluste überproportional aus. Daher ergeben sich beim Membranverfahren deutlich höhere verlustbedingte Emissionen als bei den anderen Aufbereitungsverfahren.

Für den Mineraldüngerersatz hingegen spielt es keine Rolle, in welcher Form die Stickstoffverluste erfolgen. Daher können beim Membranverfahren die höheren N-Verluste aus der Feststofflagerung durch die bei der

Ausbringung der sehr ausgeglichen gut fließfähigen Membrankonzentrate erreichte Emissionsminderung ausgeglichen werden. Insgesamt ergibt sich so eine Mineraldüngereinsparung gegenüber dem unbehandelten Gärrest.

Bei der solaren Trocknung übersteigt der NH_3-Verlust aus der Trocknung die Menge an eingespartem Stickstoff bei Lagerung und Ausbringung der Produkte, so dass im Vergleich zum Gärrest mehr Mineraldünger eingesetzt werden muss. Bei der Lagerung der getrockneten und somit stabilisierten Feststoffe wird deutlich weniger stark klimawirksames Lachgas freigesetzt, was die indirekten Treibhausgasemissionen durch NH_3-Verluste aus der Trocknung ausgleicht.

Das Verfahren mit Bandtrockner zeigt, dass sich durch die Reinigung der Trocknerabluft deutlich mehr gasförmige Emissionen vermeiden lassen und eine höhere Düngeeffizienz erreicht wird. Auch bei den Verfahren mit der nicht getrockneten Festphase der Pressschneckenseparation wiegen geringere Emissionen bei der Lagerung (N_2O) und nach der Ausbringung (NH_3) der Flüssigphase die hohen NH_3-Emissionen aus der Lagerung der Festphase auf, so dass mehr Mineraldünger ersetzt werden kann als durch den Gärrest selbst.

Ohne Anrechnungen der Emissionen aus der Wärmenutzung und unter der Voraussetzung einer vollständigen Nährstoffentfrachtung durch die Aufbereitung ergeben sich je nach Verfahren sowohl zusätzliche als auch geringere Treibhausgasemissionen im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests (Abb. 11 links). Die Separation mit einer Pressschnecke führt zu geringfügig niedrigeren Emissionen. Die weitere Aufbereitung der dabei entstehenden Massenströme hat unterschiedliche Auswirkungen auf die Gesamtbilanz: Insbesondere durch die Vakuumverdampfung ist eine deutliche Treibhausgaseinsparung realisierbar, vor allem durch die starke Verringerung der Masse und des damit verbundenen Transportbedarfs. Auch durch die Bandtrocknung werden erheblich geringere Treibhausgasemissionen erreicht, wenn durch die Abluftreinigung NH_3-Verluste minimiert werden. Selbst die solare Trocknung ohne Abluftreinigung kann in geringem Umfang Emissionen vermeiden. Demgegenüber kommt es bei einer Strippung der Gärreste in der Summe der Emissionen weder zu einer Einsparung noch zu einer Zusatzemission. Lediglich für das Membranverfahren ergeben sich unter den genannten Bedingungen deutliche Mehremissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest, da die hohen Emissionen für die Strombereitstellung die Einsparungen beim Transport und durch den Mineraldüngerersatz ausgleichen.

Werden Emissionen aus der Wärmenutzung berücksichtigt, so dominieren die Aufwendungen hierfür das Ergebnis. Alle Verfahren mit Wärmebedarf produzieren deutlich mehr Treibhausgasemissionen als die Verwertung des unbehandelten Gärrests (Abb. 11 rechts).

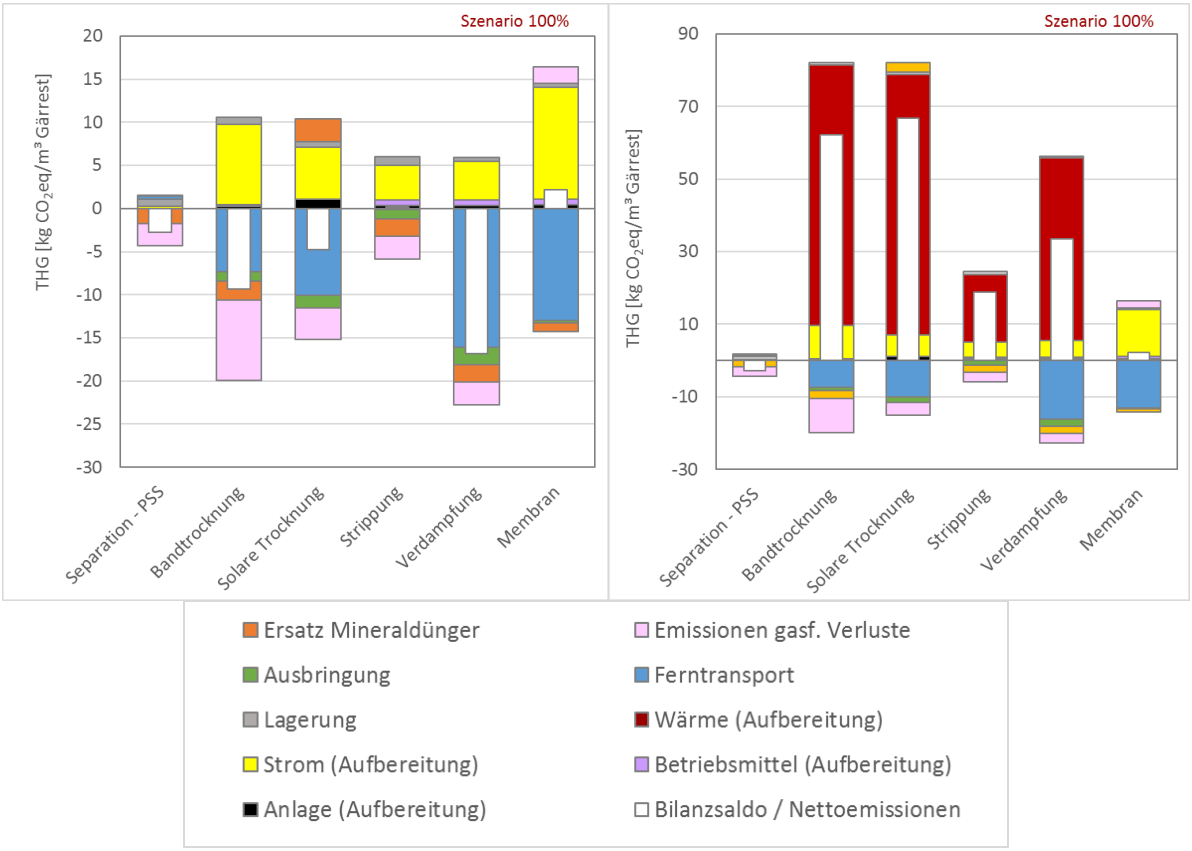


Abbildung 11: Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte bei einer vollständigen überregionalen Verwertung. Darstellung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests.
Links: Berechnung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung; rechts: Berechnung mit Emissionen aus der Wärmenutzung. Unterschiedliche Skalierung ist zu beachten.

Kumulierter Energieaufwand bei einer überregionalen Verwertung aller Nährstoffe (Entfrachtungsszenario 100%)

Da ein Großteil der Treibhausgasemissionen energiebedingt sind, entspricht die Bilanz des kumulierten Energieaufwands in weiten Teilen der Bilanz der Treibhausgasemissionen. Ausnahme sind die nicht energiebedingten Treibhausgasemissionen aus gasförmigen Verlusten. Durch die Vakuumverdampfung lässt sich eine deutliche Energieeinsparung aufgrund des geringen Transportaufwands erreichen, wenn der Wärmebedarf nicht berücksichtigt wird (Abb. 12 links). Unter Berücksichtigung der Wärmenutzung überlagern die dafür nötigen Aufwendungen wie bei den Treibhausgasemissionen die anderen Bilanzfaktoren (Abb. 12 rechts).

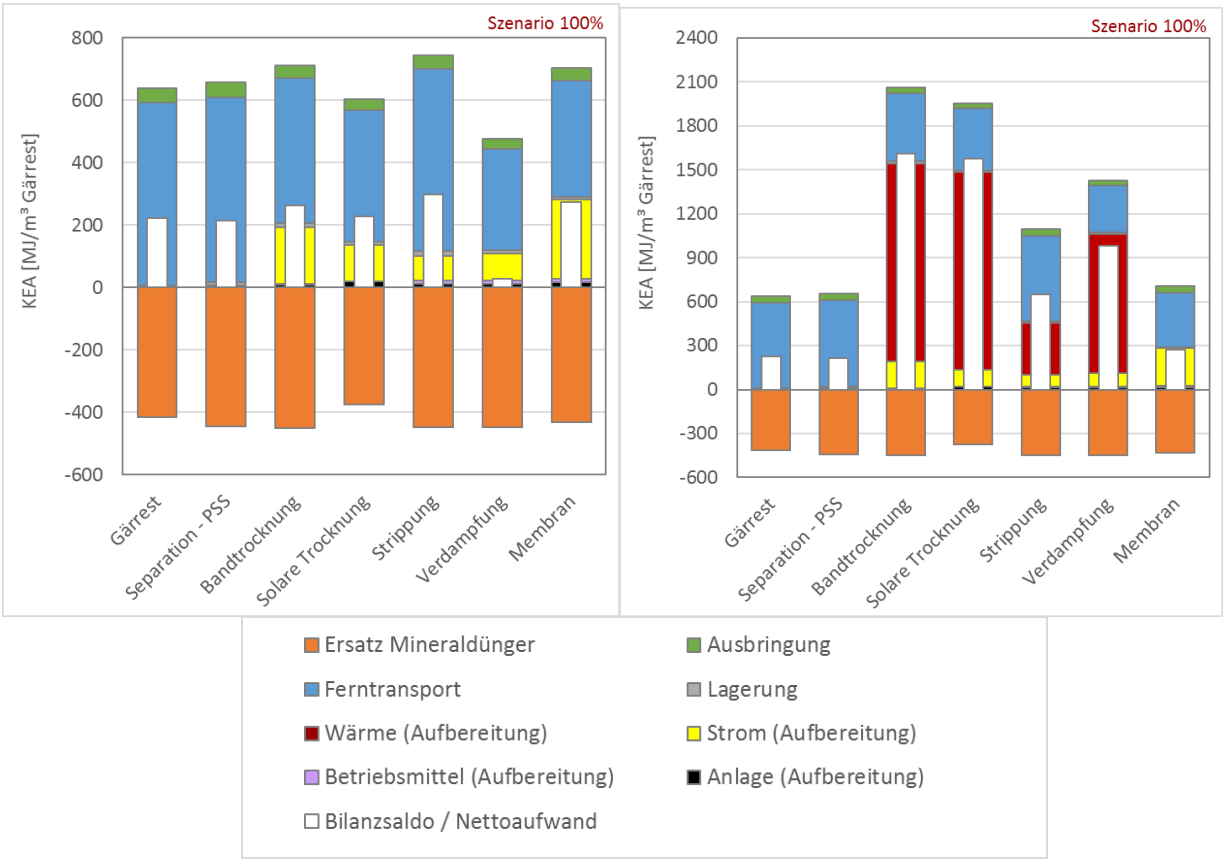


Abbildung 12: Kumulierter Energieaufwand der Verwertung des unbehandelten Gärrests und der Aufbereitungsprodukte bei einer vollständigen überregionalen Verwertung.
Links: Berechnung ohne Energieaufwand aus der Wärmenutzung; rechts: Berechnung mit Energieaufwand aus der Wärmenutzung. Unterschiedliche Skalierung ist zu beachten.

Im Vergleich zum unbehandelten Gärrest hat für den KEA, im Gegensatz zu den Treibhausgasemissionen die Pressschneckenseparation kaum eine Auswirkung, weder auf die einzelnen Faktoren, noch auf das Bilanzergebnis. Auch für die solare Trocknung ergibt sich, sofern die Wärmenutzung nicht berücksichtigt wird (Abb. 13 rechts), in der Bilanz keine Einsparung gegenüber dem unbehandelten Gärrest. Hier heben zusätzliche Aufwendungen v. a. für Strom und Mineraldünger die deutlichen Einsparungen beim Ferntransport auf. Hohe Stromverbräuche für Bandtrocknung und Membranverfahren sind bestimmen auch die Bilanzergebnisse dieser beiden Verfahren im Vergleich zum unbehandelten Gärrest. Das Stripverfahren, durch das keine Volumenreduktion und damit auch keine Einsparung beim Ferntransport erreicht werden kann, weist trotz des vergleichsweise geringen Stromverbrauchs den höchsten kumulierten Energieaufwand aller Verfahren ohne Berücksichtigung der Wärmenutzung auf. Die hohe Energieeinsparung in der Gesamtbilanz der Vakuumverdampfung im Vergleich zum unbehandelten Gärrest ist durch den geringsten Transportaufwand bedingt, dem zudem nur ein relativ niedriger Strombedarf gegenübersteht (Abb. 13 links).

Wie bei den Treibhausgasen überlagert die Berücksichtigung der Wärmenutzung auch die Bilanzergebnisse im Vergleich zum Energieaufwand für die Verwertung des unbehandelten Gärrests (Abb. 13 rechts).

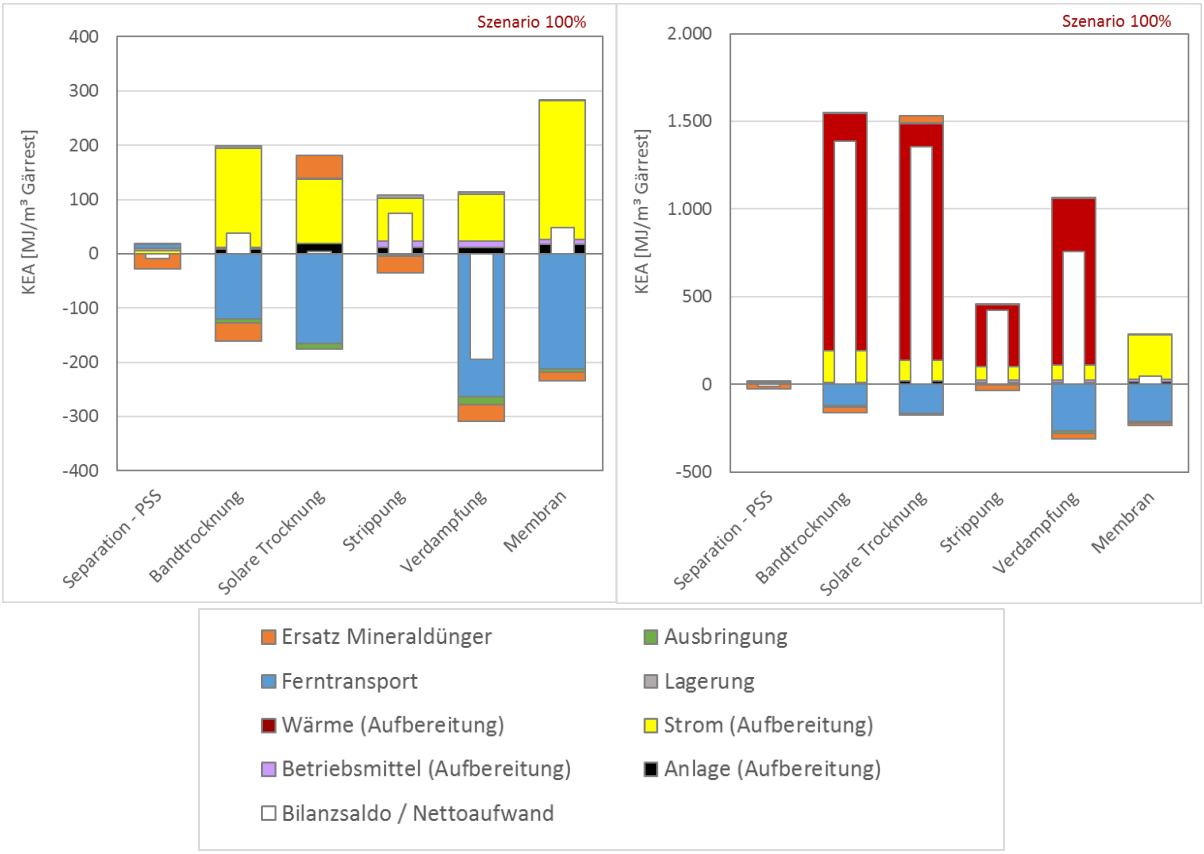


Abbildung 13: Kumulierter Energieaufwand der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte bei einer vollständigen überregionalen Verwertung. Darstellung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests.
Links: Berechnung ohne Energieaufwand aus der Wärmenutzung; rechts: Berechnung mit Energieaufwand aus der Wärmenutzung. Unterschiedliche Skalierung ist zu beachten.

Effekt der Aufbereitung auf die Treibhausgasbilanz des Biogasstroms bei einer überregionalen Verwertung aller Nährstoffe (Entfrachtungsszenario 100%)

Werden die oben dargestellten Treibhausgasemissionen aus der Aufbereitung und Verwertung des Gärrests in die Treibhausgasbilanz der Stromerzeugung aus Biogas integriert, zeigt sich, dass vor allem die Berücksichtigung der Wärme einen Einfluss hat (Abb. 14). Während ohne Aufbereitung bzw. für Verfahren ohne Wärmebedarf lediglich ca. 0,13 kg CO_2eq für die Produktion einer Kilowattstunde Biogasstrom anfallen (Abb. 14 rechts), erhöht sich dieser Wert für die Verfahren mit Wärmebedarf drastisch: Die Wärmegutschrift auf den Biogasstrom für den Ersatz fossiler Ressourcen, die ohne Behandlung oder bei Verfahren ohne Wärmebedarf erzielt werden kann, verringert sich dadurch oder entfällt ganz. Für die solare Trocknung werden mit 0,31 kg CO_2eq/kWh$_{el}$ die höchsten Nettoemissionen in der Gesamtbilanz Bilanzwert erreicht. Der deutsche Strommix verursachte im Vergleich dazu im Jahr 2014 laut dem Umweltbundesamt (UBA 2017) 0,548 kg CO_2eq/kWh$_{el}$. Bei Berücksichtigung von Emissionen für die Wärmenutzung verringert sich für Aufbereitungsverfahren mit Wärmebedarf die mögliche Treibhausgaseinsparung durch Biogasstrom deutlich.

Die weiteren durch die Aufbereitung bedingten Unterschiede in den Treibhausgasemissionen haben demgegenüber vergleichsweise geringen Einfluss auf die Treibhausgasbilanz des Biogasstroms: Die Emissionen aus Substratbereitstellung und Betrieb der Biogasanlage übersteigen die Emissionen aus der Gärrestaufbereitung und –verwertung deutlich. Lediglich wenn die Wärmenutzung nicht berücksichtigt und keine Wärmegutschrift angerechnet wird, (Abb. 14 links), lassen sich durch die Vakuumverdampfung und in geringerem Ausmaß durch die Bandtrocknung Treibhausgaseinsparungen erreichen, die einen sichtbaren Einfluss auf die Treibhausgasbilanz des Biogasstroms haben. Im Vergleich zu einer Biogasanlage ohne Aufbereitung, bei der eine Kilowattstunde Biogasstrom ohne Berücksichtigung der Wärme 0,325 kg CO_2eq verursacht, können durch

eine Gärrestaufbereitung mit Vakuumverdampfung 0,045 kg CO_2eq/kWh$_{el}$ eingespart werden und damit immerhin 14 %. Bei der Bandtrocknung beträgt diese Einsparung 8 %, alle anderen Verfahren bewirken nur geringfügige Änderungen in der Treibhausgasbilanz des Biogasstroms.

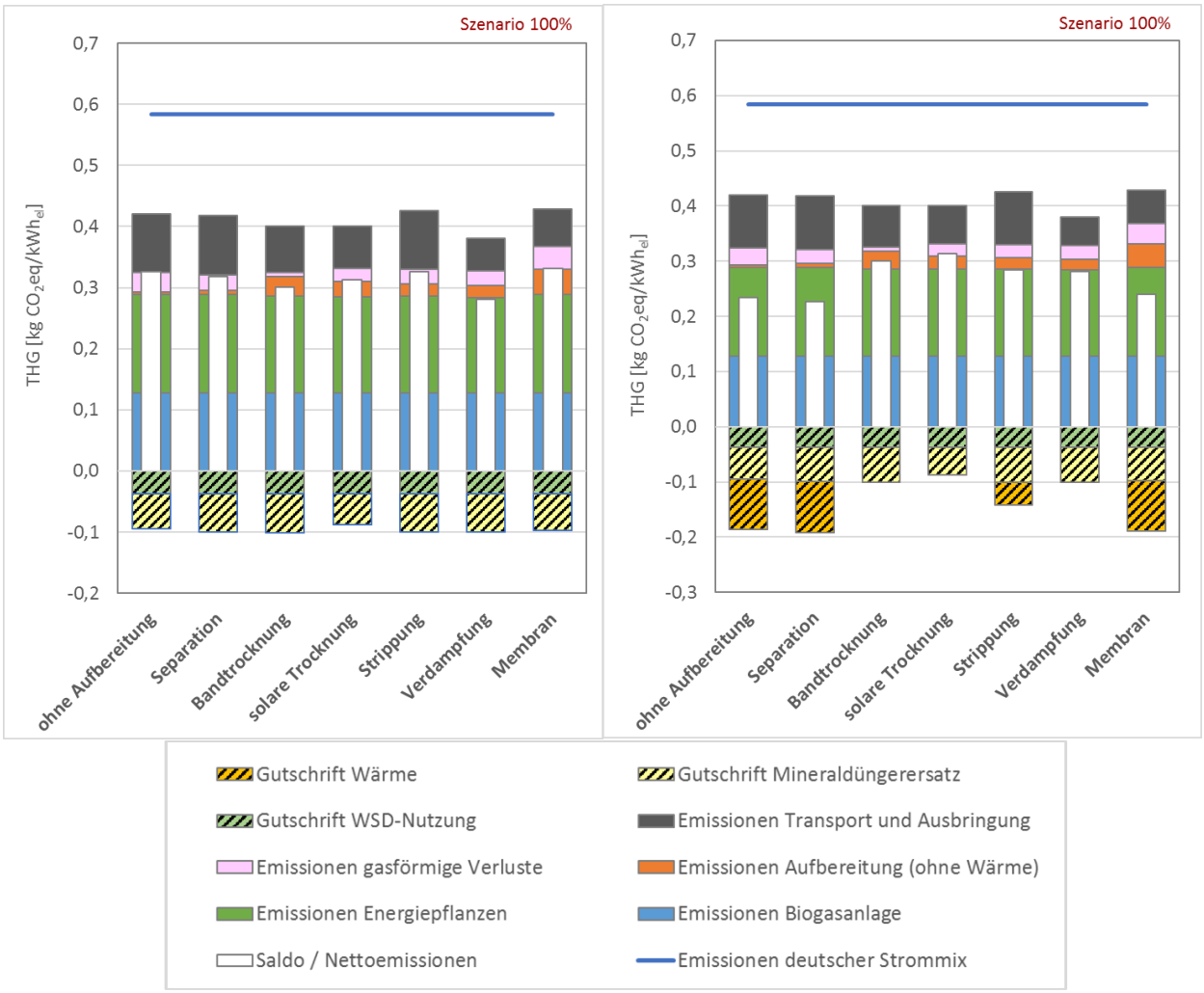


Abbildung 14: Effekt der Gärrestaufbereitung und -verwertung auf die Treibhausgasbilanz des Biogasstroms bei einer vollständigen überregionalen Verwertung.
Links: Berechnung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung; rechts: Berechnung mit Emissionen aus der Wärmenutzung. Unterschiedliche Skalierung ist zu beachten.

4.1 Entfrachtungsziel 50% des anfallenden Phosphors (Entfrachtungsszenario „P50“)

Soll nur ein Teil der Nährstoffe überregional verwertet werden, muss geprüft werden, welches der Produkte in einem Aufbereitungsverfahren für den Zielnährstoff das transportwürdigste ist. Zum einen spielt hier die Nährstoffkonzentration eine Rolle, zum anderen das Erlöspotenzial. Für Phosphor weisen die Festprodukte in allen Verfahren bis auf die Vakuumverdampfung den höchsten Phosphorgehalt auf. Bei der Verdampfung liegt der P-Gehalt im Konzentrat etwas über dem in der Festphase. Da aber für die Festprodukte das Erlöspotenzial deutlich höher ist als für die aufbereiteten Flüssigphasen (Tab. 11), ist davon auszugehen, dass für alle Verfahren die Festphase prioritär für den Nährstoffexport verwendet wird.

Wird durch die überregionale Verwertung der Festprodukte das Entfrachtungsziel von 50 % des Phosphors nicht erreicht, muss zusätzlich ein Teil der unaufbereiteten Flüssigphase bzw. der Flüssigprodukte in die Ackerbauregion transportiert werden. Dies ist für das hier betrachtete Szenario bei allen Verfahren bis auf das Membranverfahren der Fall, bei dem über 60 % des Phosphors in der Festphase vorliegen (Tab. 17).

Neben den Mengen der einzelnen Aufbereitungsprodukte, die regional bzw. überregional verwertet werden, wurden die jeweils damit verbundenen P- und N-Frachten ermittelt und dienen unter anderem als Basis für die

Errechnung der überregional erzielbaren Erlöse (vgl. Kap. 3.5). Die Erlöse sowie die zugrundeliegenden Inputdaten wurden der HfWU für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen im Teilvorhaben 1 übermittelt. Aus Tabelle 17 wird deutlich, dass sich nicht nur die zu transportierenden Mengen zwischen den einzelnen Verfahren deutlich unterscheiden, sondern auch die Stickstoffmengen, die mit den festgesetzten 50 % des Phosphors in die Ackerbauregion gelangen. Daraus ergeben sich Unterschiedeim Erlöspotenzial.

Auch für die Lagerung wird zwischen regionaler und überregionaler Verwertung unterschieden: Zum einen wird der unbehandelte Gärrest in der Ackerbauregion in nicht gasdichten Behältern gelagert, was zu gasförmigen Emissionen aus dem überregional verwerteten Anteil führt. Darüber hinaus müssen größere Anteile des Gärrests und der Aufbereitungsprodukte an der Anlage gelagert werden und weniger in der Ackerbauregion. Es müssen also an der Anlage selbst größere Lagerkapazitäten geschaffen werden, in der Ackerbauregion wiederum geringere im Vergleich zu einer vollständigen Nährstoffentfrachtung.

Tabelle 17: Produktmengen zur regionalen bzw. überregionalen Verwertung bei einem Entfrachtungsziel von 50 % der Phosphorfracht im unbehandelten Gärrest und in den einzelnen Produkten vorliegende Nährstofffrachten

Verfahren	Produkt	regionale Verwertung			überregionale Verwertung		
		Menge t/a	P kg/a	N kg/a	Menge t/a	P kg/a	N kg/a
ohne Behandlung	Gärrest	21.430	53.575	128.580	**21.430**	**53.575**	**128.580**
Separation	PSS fest	0	0	0	**5.422**	**23.359**	**43.717**
	PSS flüssig	23.937	53.575	136.472	**13.501**	**30.216**	**76.970**
Bandtrocknung	PSS - flüssig	23.937	53.575	136.472	**6.013**	**13.458**	**34.282**
	Tr - Trockengut	0	0	0	**2.255**	**40.117**	**48.218**
	Tr - ASL	968	0	34.369	**0**	**0**	**0**
solare Trocknung	PSS - flüssig	21.424	47.951	122.145	**6.013**	**13.458**	**34.282**
	Sol - Trockengut	0	0	0	**2.382**	**45.741**	**54.039**
Stripverfahren	PSS - fest	0	0	0	**5.422**	**23.359**	**43.717**
	St - N-red flüssig	22.313	53.575	58.838	**12.585**	**30.216**	**33.184**
	St - ASL	1.969	0	121.421	**0**	**0**	**0**
Vakuumverdampfung	PSS - fest	0	0	0	**5.422**	**23.359**	**43.717**
	VV - Konzentrat	10.149	53.575	60.294	**5.724**	**30.216**	**34.006**
	VV - ASL	1.808	0	119.143	**0**	**0**	**0**
Membranverfahren	DZ/PSS - fest	3.926	36.817	37.801	**5.713**	**53.575**	**55.008**
	M - Konzentrat	16.863	16.741	164.005	**0**	**0**	**0**

Treibhausgasemissionen bei einem Entfrachtungsziel von 50 % der Phosphorfracht des unbehandelten Gärrest (Szenario P50)

Auch bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Phosphors können selbst ohne Berücksichtigung der Wärmenutzung die Treibhausgasemissionen für die Verwertung des unbehandelten Gärrests wie für die Aufbereitungsverfahren nicht durch die Einsparungen aus dem Mineraldüngersatz ausgeglichen werden, so dass sich positive Nettoemissionen ergeben (Abb. 15 links). Da aber nur ein Teil der Produkte in die Ackerbauregion transportiert werden muss, liegt die Summe der Brutto-Emissionen auf einem niedrigeren Niveau, als für das 100%-Szenario. Insgesamt zeigt sich bei der Treibhausgasbilanz für die 50%ige Phosphorentfrachtung ohne Berücksichtigung der Wärmenutzung ein deutlicher Vorteil der Bandtrocknung und auch der Verdampfung gegenüber der Verwertung des unbehandelten Gärrests und den anderen Aufbereitungsverfahren (Abb. 15 links).

Werden Emissionen aus der Wärmenutzung berücksichtigt, dominieren diese die Ergebnisse (Abb. 15 rechts). Für die beiden Trocknungsverfahren und die Verdampfung entstehen Nettoemissionen, die um ein Vielfaches über denen der Verwertung des unbehandelten Gärrests liegen. Für die Strippung ist dieser Effekt aufgrund

des vergleichsweise geringen Wärmebedarfs weniger ausgeprägt. Dennoch ergeben sich deutlich höhere Nettoemissionen als beim Membranverfahren, das ohne Berücksichtigung der Wärme die höchsten Emissionen aufweist.

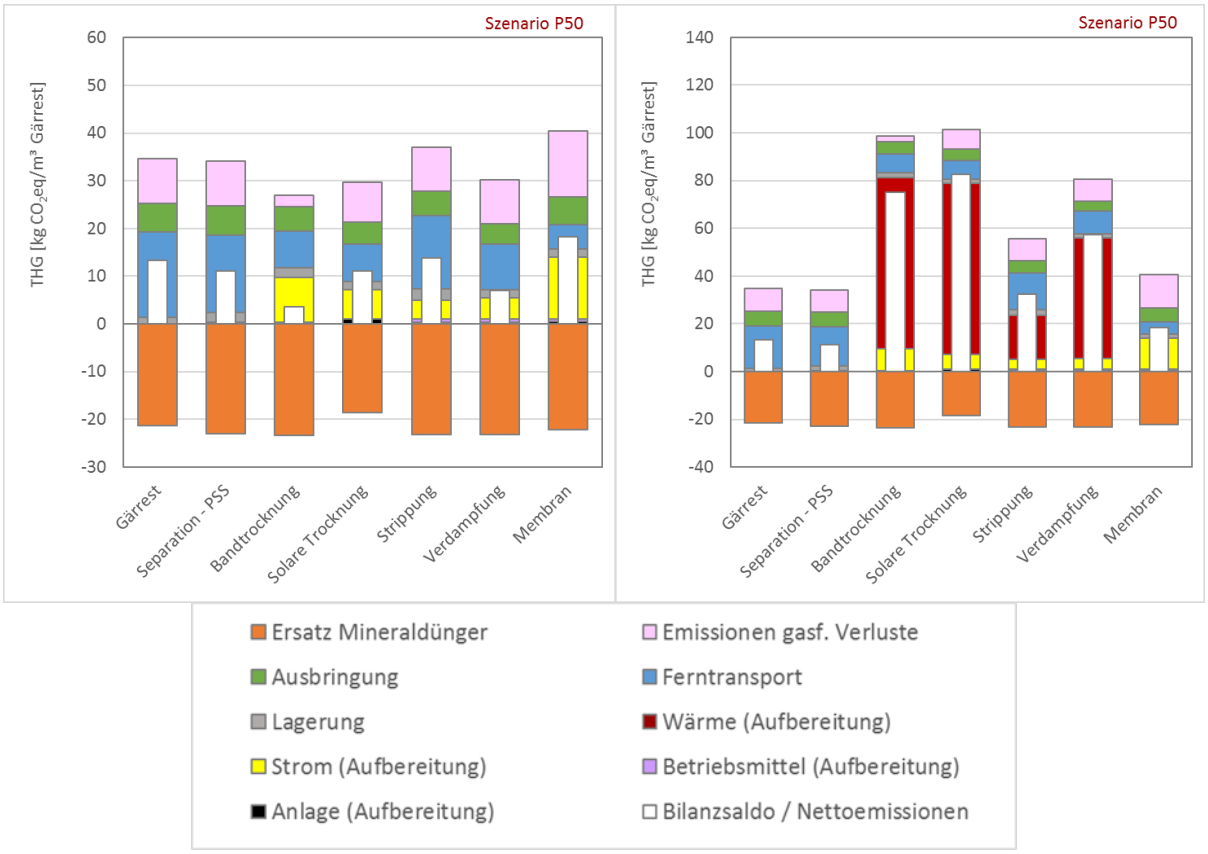


Abbildung 15: Treibhausgasemissionen der Verwertung des unbehandelten Gärrests und der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Phosphors. .
Links: Berechnung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung; rechts: Berechnung mit Emissionen aus der Wärmenutzung. Unterschiedliche Skalierung ist zu beachten.

Werden statt der absoluten Treibhausgasemissionen die Unterschiede zum unbehandelten Gärrest betrachtet, wird wie beim 100%-Szenario durch die Pressschneckenseparation deutlich, dass eine geringe Menge an Treibhausgasen eingespart werden kann, wenn keine Emissionen aus der Wärmenutzung in die Berechnungen einbezogen werden (Abb. 16 links). Auch hier gleichen sich beim Stripverfahren die Einsparungen und die zusätzlichen Emissionen aus. Bei den Trocknungsverfahren werden aufgrund der hohen Phosphorgehalte in den getrockneten Feststoffen in erheblichem Umfang transportbedingte Emissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest eingespart. Dieser Vorteil wird bei der solaren Trocknung jedoch zu einem Großteil durch die Verluste an NH_3 und der damit verbundenen Düngewirkung und die in diesem Szenario kaum vorhandenen Einsparungen an Emissionen aufgrund gasförmiger Verluste ausgeglichen, so dass in der Summe nur eine geringe Einsparung gegenüber dem Gärrest erreicht wird. Mit der Vakuumverdampfung wird nach der Bandtrocknung die höchste Emissionsminderung erzielt, da deutliche Einsparungen beim Transport möglich sind. Die höchsten Emissionen weist wie bereits im 100%-Szenario das Membranverfahren auf.

Bei Berücksichtigung der Emissionen aus der Wärmnutzung erreichen die wärmenutzenden Verfahren keine Einsparungen mehr im Vergleich zum unbehandelten Gärrest, sondern verursachen z. T. hohe Nettoemissionen (Abb. 16 rechts). Dies gilt besonders für die wärmeintensiven Trocknungsverfahren und die Verdampfung.

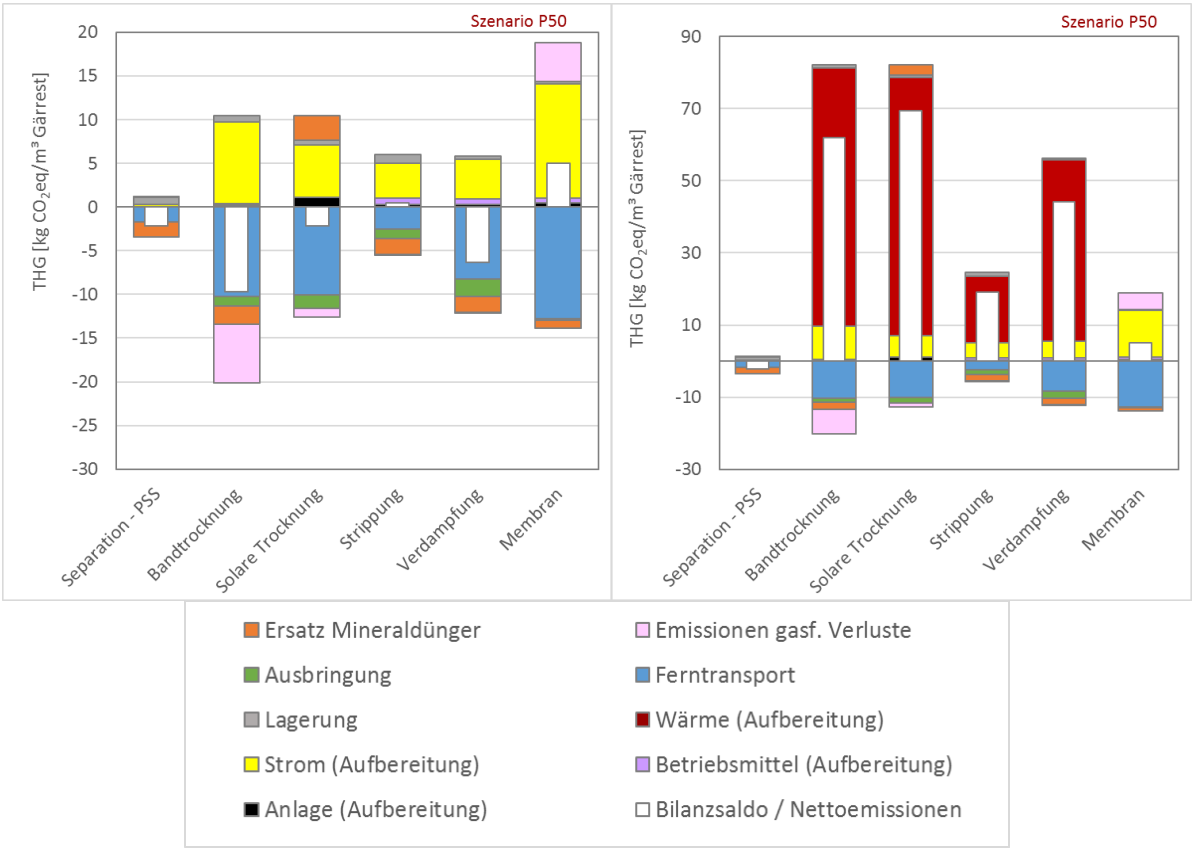


Abbildung 16: Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Phosphors. Darstellung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests.
Links: Berechnung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung; rechts: Berechnung mit Emissionen aus der Wärmenutzung. Unterschiedliche Skalierung ist zu beachten.

Kumulierter Energieaufwand bei einem Entfrachtungsziel von 50 % der Phosphorfracht des unbehandelten Gärrest (Szenario P50)

Für den kumulierten Energieaufwand werden beim Entfrachtungsziel von 50 % der Phosphorfracht die Einsparungen durch den Mineraldüngerersatz den Energieaufwand für Aufbereitung und Verwertung der Produkte in allen Fällen ausgeglichen, sofern die Wärmenutzung nicht berücksichtigt wird (Abb. 17 links). Der hohe Strombedarf des Membranverfahrens wirkt sich in diesem Fall besonders stark aus: Im P50-Szenario gehen fast zwei Drittel des Energiebedarfs darauf zurück.

Wird der Energieaufwand durch die Wärmenutzung berücksichtigt, wird diese Netto-Energieeinsparung bei den Verfahren mit Wärmebedarf durch den hohen Energieaufwand für die Wärmebereitstellung ausgeglichen (Abb. 17 rechts).

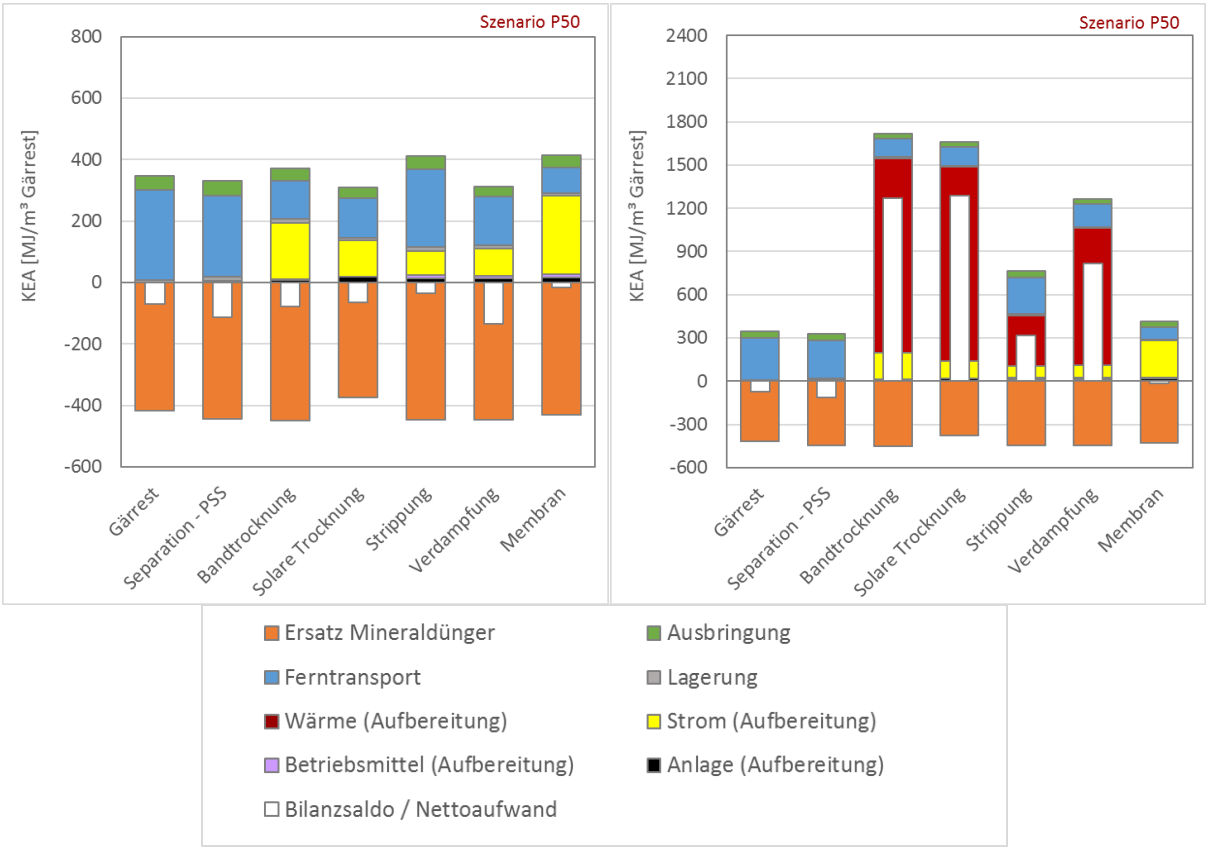


Abbildung 17: Kumulierter Energieaufwand der Verwertung des unbehandelten Gärrests und der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Phosphors.
Links: Berechnung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung; rechts: Berechnung mit Emissionen aus der Wärmenutzung. Unterschiedliche Skalierung ist zu beachten.

Im Vergleich zum unbehandelten Gärrest ergeben sich ohne Berücksichtigung der Wärme jedoch nur für die Pressschneckenseparation und die Verdampfung Vorteile beim kumulierten Energieaufwand durch die Aufbereitung (Abb. 18 links). Für die Bandtrocknung und das Membranverfahren gleichen die Einsparungen beim Transport und durch den Mineraldüngerersatz die Aufwendungen für die Strombereitstellung nicht aus. Bei der solaren Trocknung wird der im Vergleich dazu geringere Strombedarf durch Mehraufwendungen beim Mineraldünger wettgemacht, der sich aus den hohen NH_3-Verlusten bei der Trocknung ohne Abluftreinigung ergibt. Daher ergibt sich auch hier in der Bilanz keine Energieeinsparung im Vergleich zum unbehandelten Gärrest.

Die Energieeinsparung beim Verdampfungsverfahren im Vergleich zum unbehandelten Gärrest entfällt, wenn für die Wärme ein Energieaufwand angenommen wird (Tab. 18 rechts). Alle Verfahren mit Wärmebedarf verursachen dann einen deutlichen zusätzlichen Netto-Energieaufwand gegenüber der Verwertung des unbehandelten Gärrests.

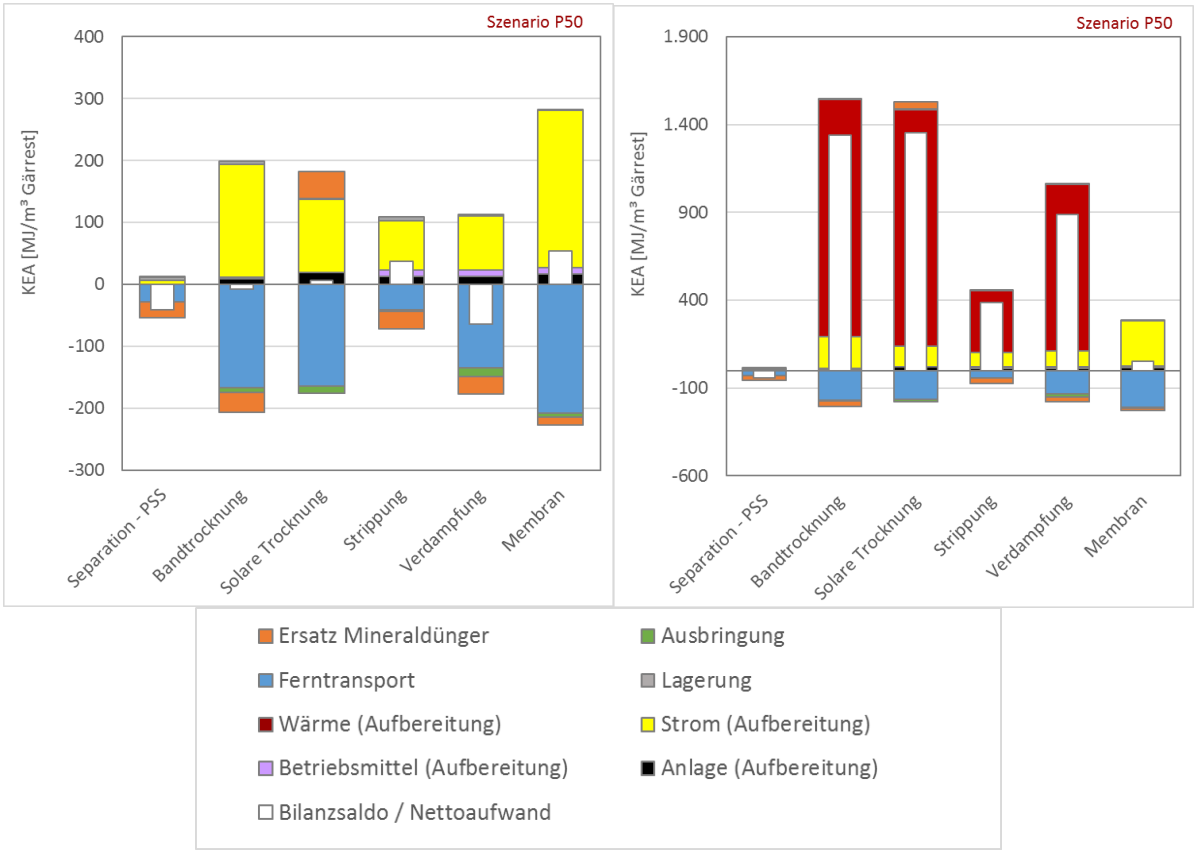


Abbildung 18: Kumulierter Energieaufwand der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Phosphors. Darstellung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests.
Links: Berechnung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung; rechts: Berechnung mit Emissionen aus der Wärmenutzung. Unterschiedliche Skalierung ist zu beachten.

Effekt der Aufbereitung auf die Treibhausgasbilanz des Biogasstroms bei einem Entfrachtungsziel von 50 % der Phosphorfracht des unbehandelten Gärrest (Szenario P50)

Die Treibhausgasemissionen für das P50-Szenario verhalten sich ähnlich wie für die vollständige Nährstoffentfrachtung. Aufgrund geringerer Transportmengen liegen sie jedoch in der Summe auf einem geringeren Niveau. Dies schwächt den auch bei einer vollständigen überregionalen Verwertung bereits wenig ausgeprägten Effekt auf die Treibhausgasbilanz des Biogasstroms weiter nochmal deutlich ab. Daher wird hier auf eine Darstellung verzichtet. Abbildungen hierzu finden sich jedoch im Anhang.

4.2 Entfrachtungsziel 50% des anfallenden Stickstoffs („N50“)

Wie im P50-Szenario wird auch für das Entfrachtungsziel von 50 % der Stickstofffracht im Gärrest zunächst festgelegt, welche Produkte prioritär transportiert werden. Anders als für Phosphor fallen in einigen Aufbereitungsverfahren hochkonzentrierte Produkte (ASL) an. Zunächst werden diese Ammoniumsulfatlösungen für die N-Entfrachtung herangezogen. Dies ist für die Bandtrocknung, die Strippung und die Vakuumverdampfung der Fall. Wird dadurch das Entfrachtungsziel von 50 % des Stickstoffs noch nicht erreicht, erfolgt die weitere Entfrachtung über die jeweiligen Festprodukte, da deren N-Gehalte höher liegen als die der Flüssigphasen. Lediglich beim Membranverfahren wird mit dem Konzentrat erst das Flüssigprodukt überregional verwertet. Hier liegen ähnliche N-Gehalte in Fest- und Flüssigphase vor. Allerdings ist der NH_4-N-Gehalt im Konzentrat höher und damit mit einer besseren Akzeptanz bei den Abnehmern in der Ackerbauregion zu rechnen. Daher erhält für dieses Verfahren das Flüssigprodukt Priorität bei der Entfrachtung.

Die regional bzw. überregional verwerteten Produktmengen sowie die damit verbundenen Nährstofffrachten sind in Tabelle 18 dargestellt. Durch die Aufkonzentration des Phosphors in den Festprodukten ergibt sich dort, wo ein großer Anteil überregional verwertet wird, mit der 50%igen N- auch eine relevante P-Entfrachtung.

Diese übersteigt teilweise 50 % des P-Anfalls und liegt damit über der mit dem unbehandelten Gärrest abtransportierte Menge. Dies ist z. B. bei den Trocknungsverfahren oder auch der Pressschneckenseparation der Fall. Für Strippung und Verdampfung, bei denen ein Großteil des Stickstoffs in der ASL vorliegt, werden nur geringe P-Frachten überregional verwertet. Auch beim Membranverfahren ist die P-Entfrachtung vergleichsweise gering, da der Phosphor vornehmlich in der Festphase aufkonzentriert ist, die anlagennah verwertet wird.

Tabelle 18: Produktmengen zur regionalen bzw. überregionalen Verwertung bei einem Entfrachtungsziel von 50 % der Stickstofffracht im unbehandelten Gärrest und in den einzelnen Produkten vorliegende Nährstofffrachten

Verfahren	Produkt	regionale Verwertung			überregionale Verwertung		
		Menge	P	N	Menge	P	N
		t/a	kg/a		t/a	kg/a	
ohne Behandlung	Gärrest	21.430	53.575	128.580	**21.430**	**53.575**	**128.580**
Separation	PSS fest	0	0	0	**5.422**	**23.359**	**43.717**
	PSS flüssig	22.553	50.477	128.580	**14.885**	**33.315**	**84.863**
Bandtrocknung	PSS - flüssig	21.883	48.978	124.761	**8.067**	**18.055**	**45.993**
	Tr - Trockengut	0	0	0	**2.255**	**40.117**	**48.218**
	Tr - ASL	0	0	0	**968**	**0**	**34.369**
solare Trocknung	PSS - flüssig	14.363	32.146	81.886	**13.075**	**29.263**	**74.541**
	Sol - Trockengut	0	0	0	**2.382**	**45.741**	**54.039**
Stripverfahren	PSS - fest	4.534	19.533	36.558	**888**	**3.825**	**7.159**
	St - N-red flüssig	34.898	83.791	92.022	**0**	**0**	**0**
	St - ASL	0	0	0	**1.969**	**0**	**121.421**
Vakuumverdampfung	PSS - fest	4.252	18.317	34.281	**1.170**	**5.042**	**9.437**
	VV - Konzentrat	15.872	83.791	94.299	**0**	**0**	**0**
	VV - ASL	0	0	0	**1.808**	**0**	**119.143**
Membranverfahren	DZ/PSS - fest	9.640	90.392	92.809	**0**	**0**	**0**
	M - Konzentrat	3.642	3.616	35.425	**13.221**	**13.125**	**128.580**

Treibhausgasemissionen bei einem Entfrachtungsziel von 50 % der Stickstofffracht des unbehandelten Gärrest (Szenario N50)

Für das Entfrachtungsziel von 50 % des Stickstoffs wird, wenn die Wärmenutzung unberücksichtigt bleibt, bei der Strippung und der Verdampfung fast eine ausgeglichene Treibhausgasbilanz erreicht, da nur sehr geringe Emissionen für den Transport anfallen (Abb. 19 links). Für die Strippung fällt bei diesem Szenario die fehlende Volumenreduktion nicht ins Gewicht. Es zeigt sich ein erheblicher Vorteil der N-Abtrennung in eine hochkonzentrierte Lösung. Dieser kommt bei der Bandtrocknung nur bedingt zum Tragen: Da die Festphase der Separation, die nur einen geringen Teil des Gärrests und des darin enthaltenen Stickstoffs ausmacht, und auch die Flüssigphase nur teilweise behandelt wurde, wird ein geringerer Teil des Stickstoffs als bei den Verfahren zur Flüssigaufbereitung in die ASL-Lösung überführt. Es müssen noch verhältnismäßig große Mengen an den anderen Produkten transportiert werden. Für solare Trocknung und Membranverfahren, bei denen keine hochkonzentrierten Produkte für die N-Entfrachtung zur Verfügung stehen, werden zwar im Vergleich zum Gärrest ebenfalls Transportemissionen eingespart, aber bei weiten nicht in dem Ausmaß wie für die Strippung oder Verdampfung.

Treibhausgasemissionen aus der Wärmenutzung führen, wenn sie in die Bilanzierung einbezogen werden, wie bei den beiden zuvor betrachteten Szenarien auch für die 50%ige N-Entfrachtung vor allem bei den Trockungs- und beim Verdampfungsverfahren zu hohen Brutto- und auch Nettoemissionen (Abb. 19 rechts). Bei der Strippung ist dieser Effekt deutlich weniger ausgeprägt. Anders als für das 100%- und das P50-Szenario liegen die Emissionen durch das hohe N-Entfrachtungspotenzial dieses Verfahrens in Kombination mit einem geringen Wärmebedarf liegen unter denen des Membranverfahrens.

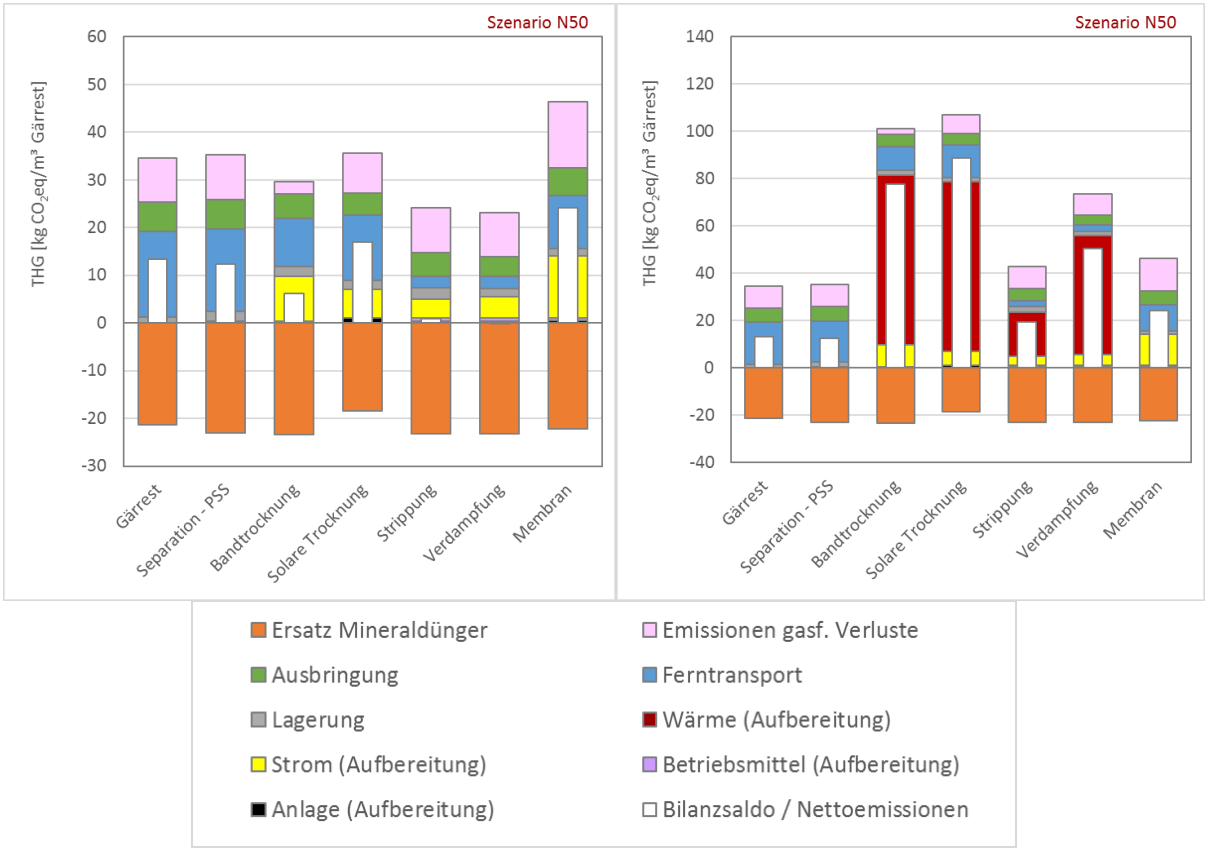


Abbildung 19: Treibhausgasemissionen der Verwertung des unbehandelten Gärrests und der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Stickstoffs.
Links: Berechnung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung; rechts: Berechnung mit Emissionen aus der Wärmenutzung. Unterschiedliche Skalierung ist zu beachten.

Die beschriebenen Unterschiede zwischen den Verfahren zeigen sich deutlicher beim direkten Vergleich mit dem unbehandelten Gärrest (Abb. 20 links). Das Ergebnis wird, wenn keine Emissionen aus der Wärmenutzung angerechnet werden, vor allem durch eingesparte Emissionen aus dem Transport bestimmt. Bei der Bandtrocknung führt auch hier die Vermeidung gasförmiger Emissionen entlang der Prozesskette einen wichtigen Beitrag zur Emissionsminderung. Strippung und Verdampfung ermöglichen die höchsten Treibhausgaseinsparungen gegenüber der Verwertung des unbehandelten Gärrests. Durch solare Trocknung und Membranverfahren entstehen Mehremissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest. Letzteres Verfahren weist wie bei den beiden anderen betrachteten Szenarien die höchsten Emissionen auf.

Die Vorteile von Bandtrocknung, Verdampfung und Strippung im N50-Szenario werden, wenn Treibhausgasemissionen durch die Wärmenutzung berücksichtigt werden, überkompensiert (Abb. 20 rechts) und keines der Verfahren erreicht noch eine Einsparung gegenüber dem Gärrest. Die Strippung verursacht von den Verfahren, die nach der Feststoffseparation die entstandene Fest- und/oder Flüssigfraktion weiter aufbereiten, die geringsten Mehremissionen im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests.

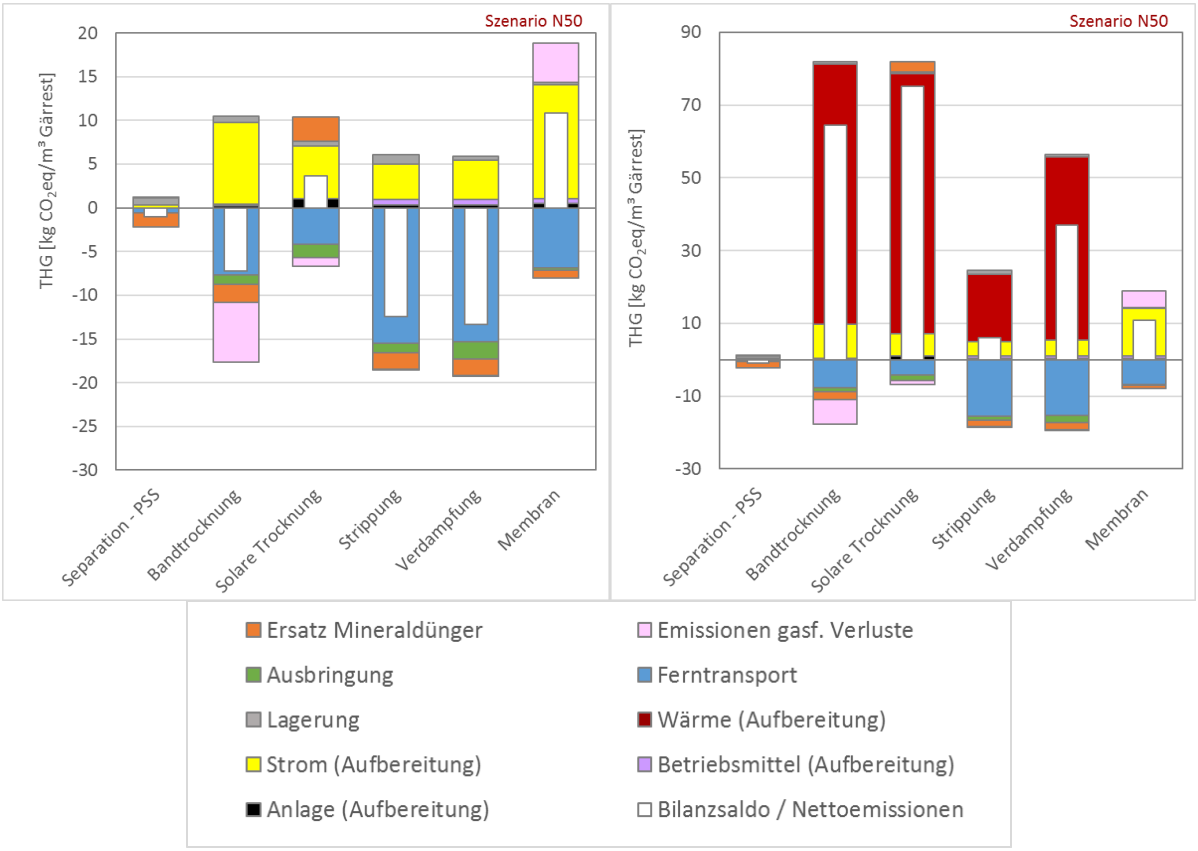


Abbildung 20: Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Stickstoffs. Darstellung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests.
Links: Berechnung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung; rechts: Berechnung mit Emissionen aus der Wärmenutzung. Unterschiedliche Skalierung ist zu beachten.

Kumulierter Energieaufwand bei einem Entfrachtungsziel von 50 % der Stickstofffracht des unbehandelten Gärrest (Szenario N50)

Auch im N50-Szenario gleichen sich für den Gärrest und einige Aufbereitungsverfahren die Emissionen und Einsparungen aus, sofern keine Aufwendungen für die Wärmenutzung angenommen werden (Abb. 21 links). Lediglich bei der solaren Trocknung und dem Membranverfahren ist der Energiebedarf durch Aufbereitung und Verwertung höher als die für Mineraldüngerproduktion eingesparte Energie. Besonders deutlich sind die Einsparungen bei den Treibhausgasemissionen für Strippung und Verdampfung, bei denen ein Großteil der Entfrachtung über die ASL erfolgt. Da im Gegensatz zu den Treibhausgasen gasförmige Verluste bei der Energiebilanz nicht relevant sind, wird bei einem Entfrachtungsziel von 50 % der Stickstofffracht durch die Bandtrocknung trotz reduzierter Transportaufwendungen in der Summe nur wenig Energie durch die Verwertung der Produkte eingespart.

Wie bei den Treibhausgasemissionen verursachen Verfahren mit Wärmebedarf bei Berücksichtigung des Energieaufwands durch die Wärmenutzung z. T. einen sehr hohen Energieaufwand, der durch die Einsparung beim Mineraldüngereinsatz nicht ausgeglichen werden kann (Abb. 21 rechts). Auch für die Strippung liegt der Netto-Energieaufwand über dem des Membranverfahrens.

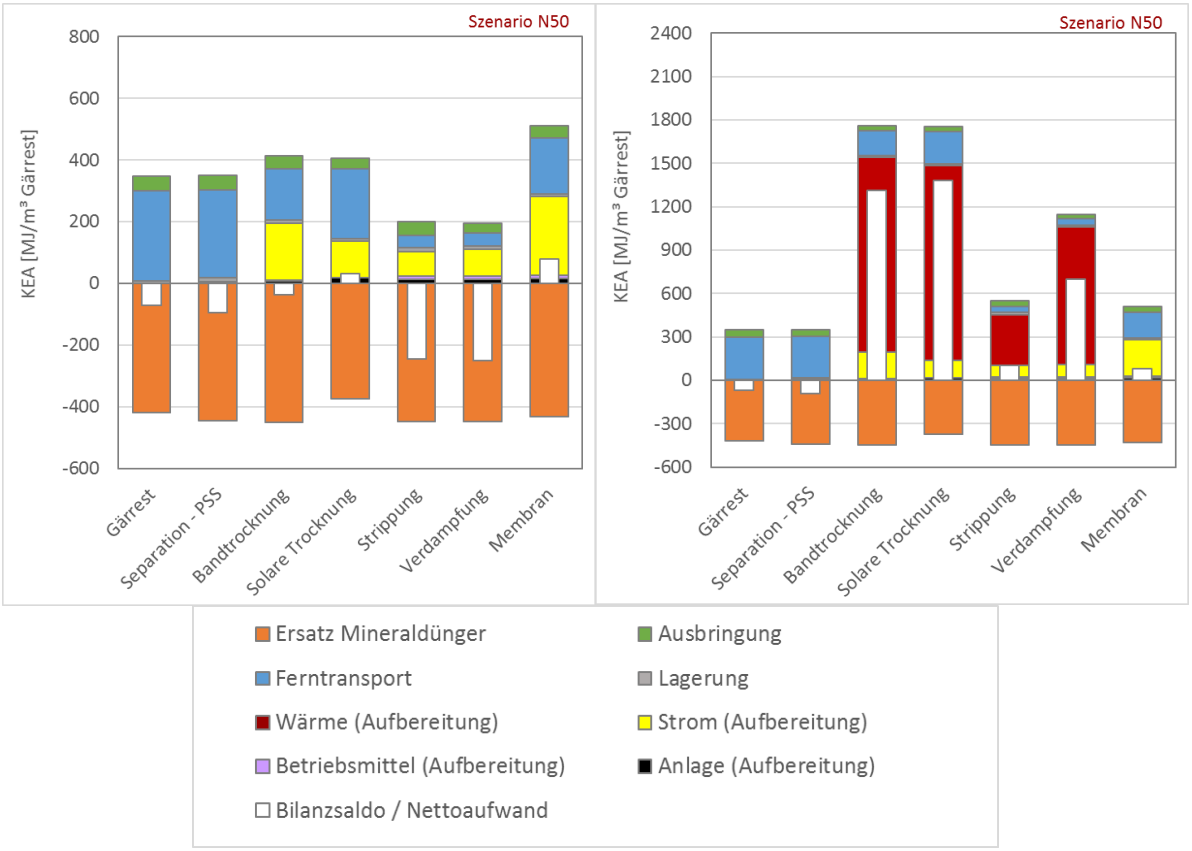


Abbildung 21: Kumulierter Energieaufwand der Verwertung des unbehandelten Gärrests und der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Stickstoffs.
Links: Berechnung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung; rechts: Berechnung mit Emissionen aus der Wärmenutzung. Unterschiedliche Skalierung ist zu beachten.

Während bei Strippung und Verdampfung im N50-Szenario deutliche Einsparungen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest erzielt werden, fallen bei den Trocknungs- und dem Membranverfahren Mehremissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest an, wenn die Wärmenutzung unberücksichtigt bleibt (Abb. 22 links). Der entscheidende Faktor sind auch hier die Einsparungen durch einen geringeren Transportaufwand.

Abgesehen von der Feststoffseparation verursachen bei Berücksichtigung des Energieaufwands für die Wärmebereitstellung alle anderen Verfahren einen höheren Energieaufwand als die Verwertung des unbehandelten Gärrests (Abb. 22 rechts). Der Einfluss der Wärme ist für die wärmeintensiven Trocknungs- und Verdampfungsverfahren besonders hoch. Wie bei den Treibhausgasen bleibt der Nettoenergieaufwand für Strippung unter dem des Membranverfahrens, das für Stickstoff ein geringeres Entfrachtungspotenzial aufweist und viel Strom benötigt.

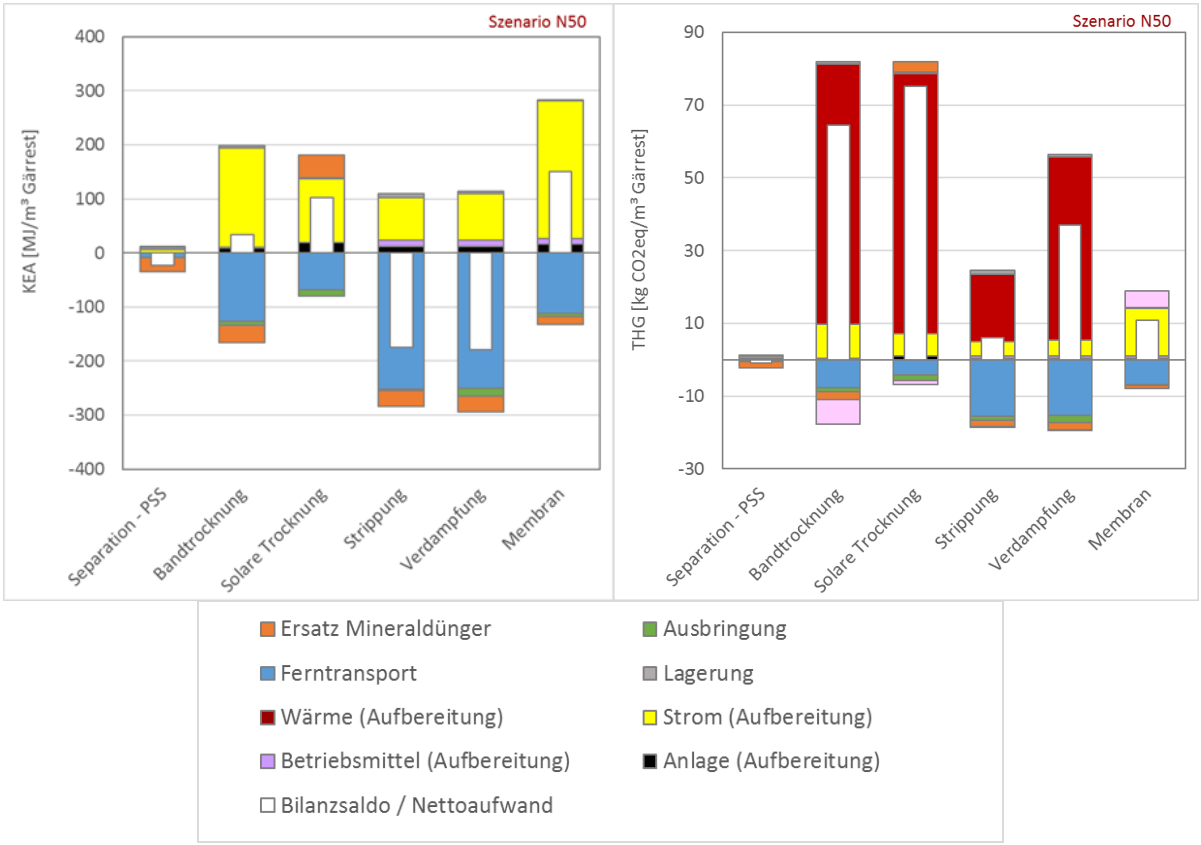


Abbildung 22: Kumulierter Energieaufwand der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte bei einem Entfrachtungsziel von 50 % des Stickstoffs. Darstellung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests.
Links: Berechnung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung; rechts: Berechnung mit Emissionen aus der Wärmenutzung.
Unterschiedliche Skalierung ist zu beachten.

Effekt der Aufbereitung auf die Treibhausgasbilanz des Biogasstroms bei einem Entfrachtungsziel von 50 % der Stickstofffracht des unbehandelten Gärrest (Szenario N50)

Wie beim P50—Szenario wird hier auf eine ausführliche Darstellung der Treibhausgasbilanz des Biogasstroms verzichtet und lediglich im Anhang illustriert. Einzige Unterschiede zum 100%-Szenario bestehen - wie für P50 - in insgesamt geringeren Emissionen aufgrund geringerer Transportvolumina und in einem ausgeprägteren Emissionsminderungseffekt bei der Vakuumverdampfung sowie einer Einsparung durch die Strippung, sofern keine Emissionen für die Wärmenutzung angenommen werden.

4.3 Gegenüberstellung der drei Szenarien

Je nach regionaler Nährstoffsituation eignen sich einzelne Verfahren besser für die angestrebte Nährstoffentfrachtung als andere. Um dies zu verdeutlichen, sind in Abbildung 23 die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest für besonders relevante Verfahren nebeneinander dargestellt. Die Pressschneckenseparation wird nicht aufgeführt, da sie in keinem der Szenarien zu signifikanten Einsparungen im Vergleich zum Gärrest führt. Als Trocknungsverfahren sind die Ergebnisse der Bandtrocknung dargestellt. Ist eine Abluftreinigung installiert, können diese auch auf die solare Trocknung übertragen werden, mit der Einschränkung, dass die Abluftreinigung aufgrund höherer Luftraten und geringerer NH_3-Konzentrationen anders ausgelegt werden müsste.

Auch auf die Darstellung der Strippung wird verzichtet, da nur für das N50-Szenario eine nennenswerte Einsparung erreicht wird. Für dieses Szenario sind die Ergebnisse mit denen für die Vakuumverdampfung vergleichbar.

Das Membranverfahren wird dargestellt, auch wenn es für alle Betrachtungen die höchsten Emissionen aufweist. Grund hierfür ist, dass es als einziges Aufbereitungsverfahren neben der alleinigen Feststoffabtrennung ohne Wärme betrieben werden kann. Zudem wird eine hohe Volumenreduktion erreicht.

Für alle drei Szenarien werden sowohl mit der Bandtrocknung als auch mit der Vakuumverdampfung Treibhausgasemissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest eingespart, wenn die Wärmenutzung nicht berücksichtigt wird (Abb. 23). Für eine vollständige Nährstoffentfrachtung wie auch für eine gezielte N-Entfrachtung empfiehlt sich vor allem die Verdampfung. Soll vornehmlich Phosphor aus der Region gebracht werden, so zeigen sich für die Bandtrocknung Vorteile. Mit dem Membranverfahren ergeben sich zwar in allen drei Fällen Mehremissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest, allerdings sind diese, wenn alle Nährstoffe überregional zu verwerten sind, vergleichsweise gering. Sollte es in der Zukunft gelingen, den Strombedarf dieses Verfahrens zu senken, könnte es nicht nur für Situationen, in den die Abwärme des BHKW bereits anderweitig genutzt wird, eine sinnvolle Alternative zu Verfahren mit Wärmenutzung darstellen.

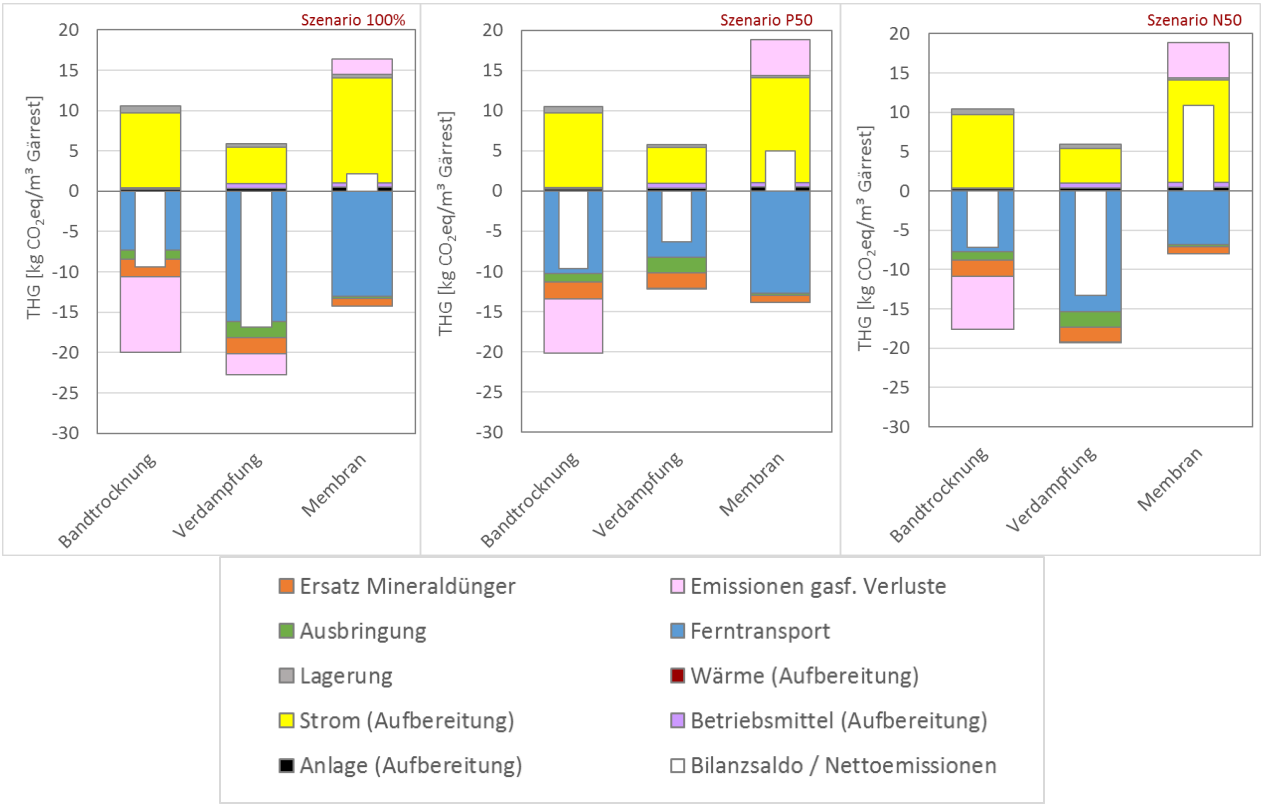


Abbildung 23: Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und Verwertung für verschiedene Entfrachtungsziele. Darstellung ausgewählter Aufbereitungsverfahren im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests. Annahme: Berechnung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung.

4.4 Sensitivitäten

Um den Einfluss von veränderten Rahmenbedingungen oder von abweichenden Grundannahmen zu prüfen, wurden Sensitivitätsrechnungen durchgeführt.

Anlagengröße

Die bisher gezeigten Ergebnisse beziehen sich alle auf eine Modellanlage mit 2 MW_{el} installierter Leistung. In einer Sensitivitätsrechnung wurde geprüft, ob sich die Größe der Biogasanlage auf die Ergebnisse auswirkt. Hierfür wurde eine Modellanlage mit lediglich 500 kW_{el} installierter Leistung betrachtet.

Die Anlagengröße hat nur marginale Auswirkungen auf die Ergebnisse, wenn diese wie hier auf den Kubikmeter unbehandelten Gärrest bezogen werden (Abb. 24). Bei der kleineren Anlage fallen aufgrund der Größendegression etwas höhere Treibhausgasemissionen aus der Errichtung der Aufbereitungsanlagen und der

Lagerstätten an. Da Anlage und Lagerstätten aber nur einen sehr kleinen Beitrag zu den Gesamtemissionen leisten, ist dies für das Gesamtergebnis vernachlässigbar. Alle anderen Faktoren weisen keine Änderungen im Vergleich zur 2 MW-Anlage auf, daher gelten die Aussagen aus den Kapiteln 4.1 bis 4.5 unabhängig von der Anlagengröße.

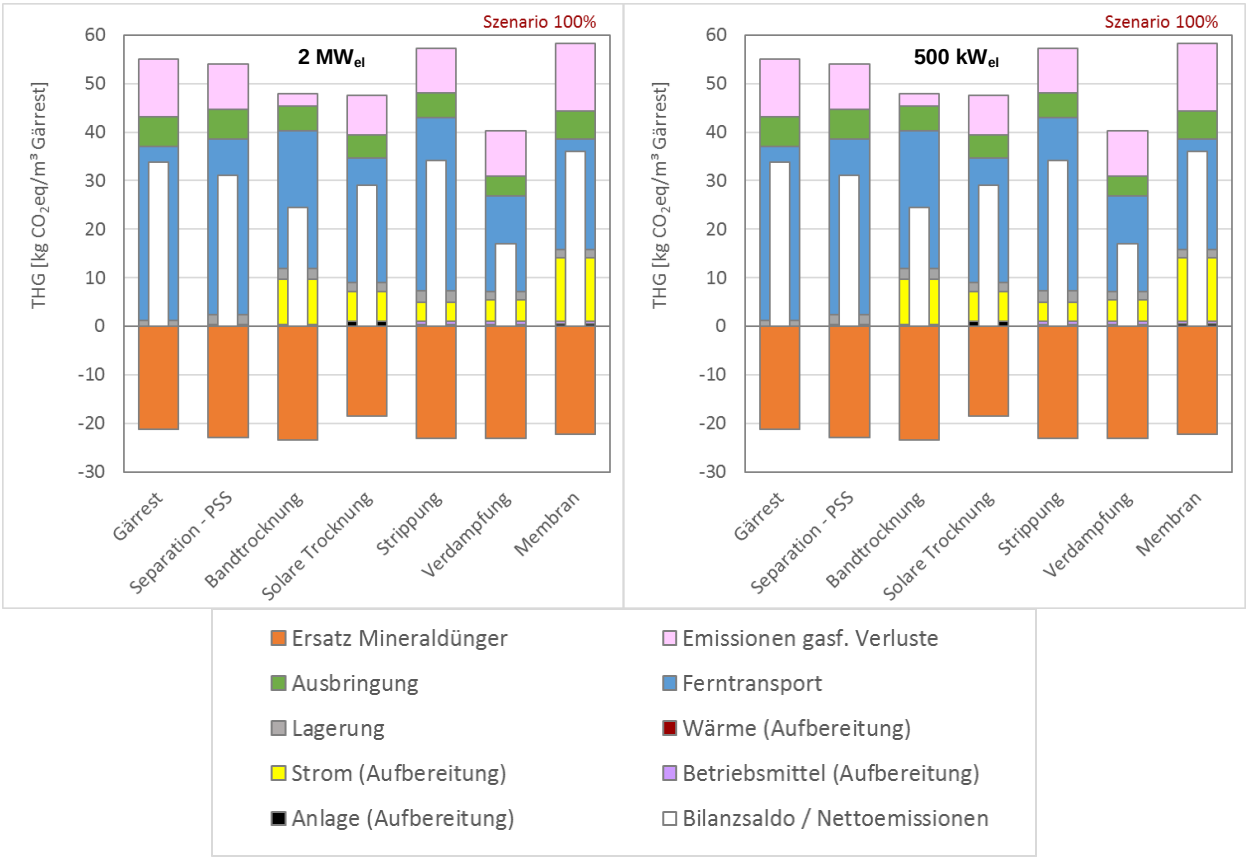


Abbildung 24: Einfluss der Anlagengröße auf die Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und -verwertung. Entfrachtungsziel: alle Nährstoffe
Links: 2 MW_{el} installierte Leistung; rechts: 500 kW_{el} installierte Leistung
Annahme: Berechnung ohne Energieaufwand aus der Wärmenutzung.

Transportentfernung

Den in Kapitel 4.2 bis 4.5 dargestellten Ergebnissen lag die Annahme zugrunde, dass der Gärrest und die Aufbereitungsprodukte über eine Entfernung von 300 km transportiert werden müssen. Dies entspricht ungefähr der Entfernung von Intensivtierhaltungsregion Weser-Ems in die Ackerbauregion der Magdeburger Börde. Allerdings kann in vielen Fällen eine Entfrachtung auch in näher gelegene Regionen möglich sein. Daher wurden die Berechnungen zusätzlich für eine Transportentfernung von nur 150 km durchgeführt.

Sowohl für die Treibhausgase als auch für den kumulierten Energieaufwand stellt für eine Transportentfernung von 300 km der Ferntransport den entscheidenden Faktor für eine Einsparung durch die Aufbereitung im Vergleich zum unbehandelten Gärrest dar (z. B. Abb. 23). Diese Einsparung halbiert sich für alle betrachteten Szenarien bei einer Entfernung von 150 km, was zu einem entsprechend höheren Energieaufwand bzw. Emissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest führt. Beispielhaft wird der kumulierte Energieaufwand ohne Berücksichtigung der Wärmenutzung für die beiden Entfernungen im P50-Szenario dargestellt (Abb. 25), da hier der beschriebene Effekt am stärksten ausgeprägt ist. In einigen Fällen kann durch die verminderte Transportentfernung das Bilanzergebnis von negativen (Einsparung) zu positiven Werten (zusätzliche/r Emissionen/Energieaufwand) wechseln.

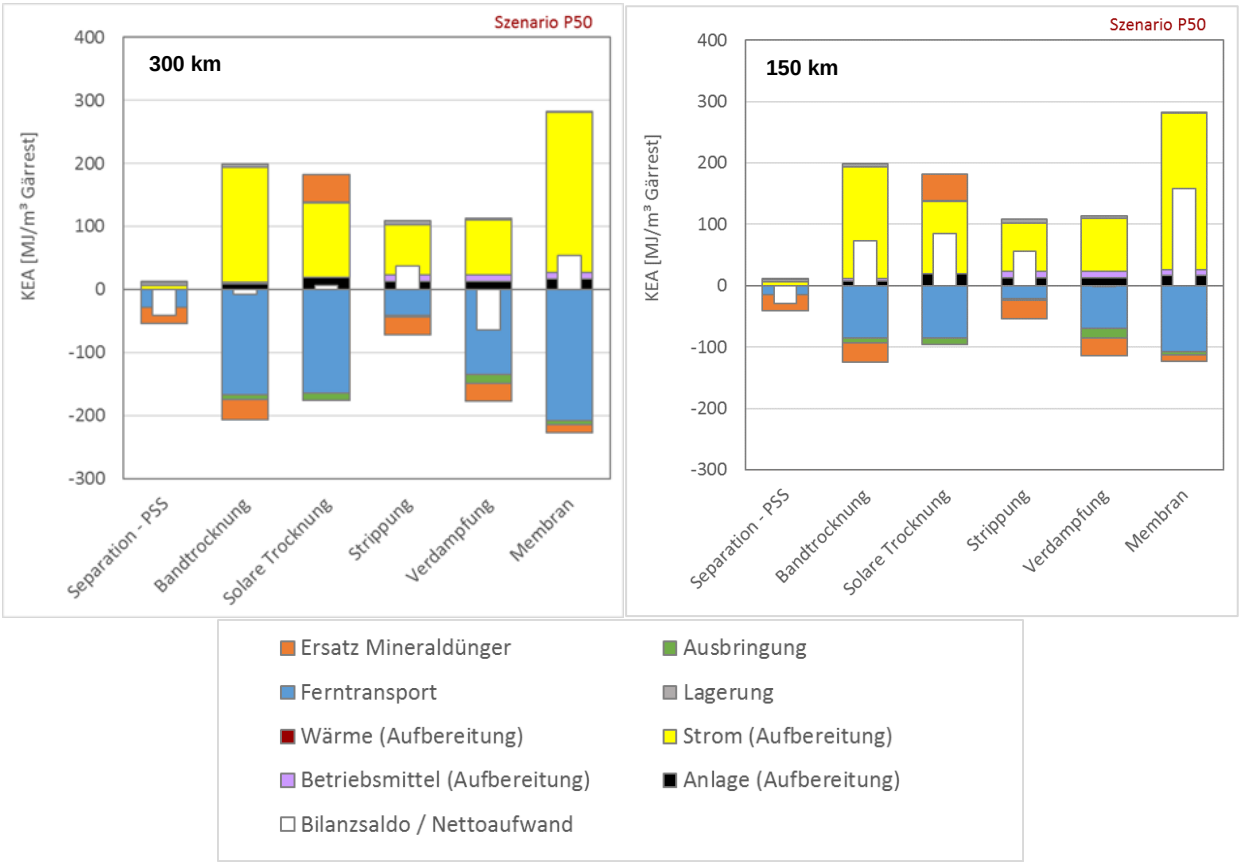


Abbildung 25: Einfluss der Transportentfernung auf den kumulierten Energieaufwand der Gärrestaufbereitung und -verwertung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests. Entfrachtungsziel: 50 % der Phosphorfracht im unbehandelten Gärrest. Links: Transportentfernung 300 km; rechts: Transportentfernung 150 km
Annahme: Berechnung ohne Energieaufwand aus der Wärmenutzung.

Abscheidegrade Feststoffabtrennung

Für die Berechnungen wurden für die beiden Verfahren zur Feststoffabtrennung zum Teil von den Projektergebnissen abweichende Abscheidegrade aus Erhebungen des KTBL verwendet, die für den Modellgärrest repräsentativ waren (vgl. Kap. 3.1). In einer Sensitivitätsrechnung sollte geklärt werden, ob Abweichungen in den zu Beginn der Prozesskette angenommenen Abscheidegrade die Ergebnisse maßgeblich beeinflussen.

Auf Basis der in Teilprojekt 2 abgeleiteten Abscheidegrade findet vor allem eine geringere Aufkonzentration der Stickstoffspezies in der Festphase der Pressschneckenseparation statt (Tab. 19). Bei der im Membranverfahren eingesetzten Dekanterzentrifuge ist der Effekt gegenläufig – hier gelangt deutlich mehr Stickstoff in die Festphase als bei einer Verwendung der Kennzahlen aus den KTBL-Erhebungen. Für Phosphor unterscheiden sich die Abscheidegrade nicht. Für beide Verfahren führt die Verwendung der Abscheidegrade aus Teilprojekt 2 zu einer erhöhten Massenabtrennung in die Festphase.

Tabelle 19: Für die Berechnungen in Kapitel 4.5 verwendete und im Projekt ermittelte Abscheidegrade für Verfahren der Feststoffabtrennung.

	Frischmasse-abscheidung	TM	N_{tot}	NH_4-N	P_2O_5
	% FM	Abscheidegrad in %			
Pressschneckenseparator					
Ergebnisse Projekt					
Feste Phase	12,4	33,0	13,1	8,8	21,6
Flüssige Phase	87,6	67,0	86,9	91,2	78,4
Erhebungen KTBL[1)]					
Feste Phase	10,0	48,1	17,0	9,2	21,8
Flüssige Phase	90,0	51,9	83,0	90,8	78,2
Dekanterzentrifuge[2)]					
Ergebnisse Projekt					
Feste Phase	14,4	74,3	30,3	18,0	81,3
Flüssige Phase	85,6	25,7	69,7	82,0	18,7
Erhebungen KTBL[2)]					
Feste Phase	12	60	23	15	80
Flüssige Phase	88	40	77	85	20

[1)] KTBL (2013)
[2)] KTBL (2017)

Diese Änderung in den Annahmen hat nur begrenzten Einfluss auf die Treibhausgasbilanz und zeigt sich besonders für die gasförmigen Verluste (Abb. 26). Für die Verfahren, in denen eine Festphase aus der Pressschneckenseparation anfällt, die nicht getrocknet wird (Separation, Strippung und Verdampfung), sinken die Emissionen aufgrund gasförmiger Verluste bei Verwendung der Abscheidegarde aus Teilprojekt 2. Stickstoff liegt hier zu einem geringeren Anteil in der Festphase vor, wodurch Lachgasemissionen geringer sind. Durch die zusätzliche Auftrennung mit der Dekanterzentrifuge, für die in Teilprojet 2 eine sehr hohe N-Abtrennung in die feste Phase ermittelt wurde, gelangt jedoch in der Summe mehr Stickstoff in die Festphase, was zu erhöhten Lachgasverlusten im Vergleich zu den KTBL-Erhebungen führt.

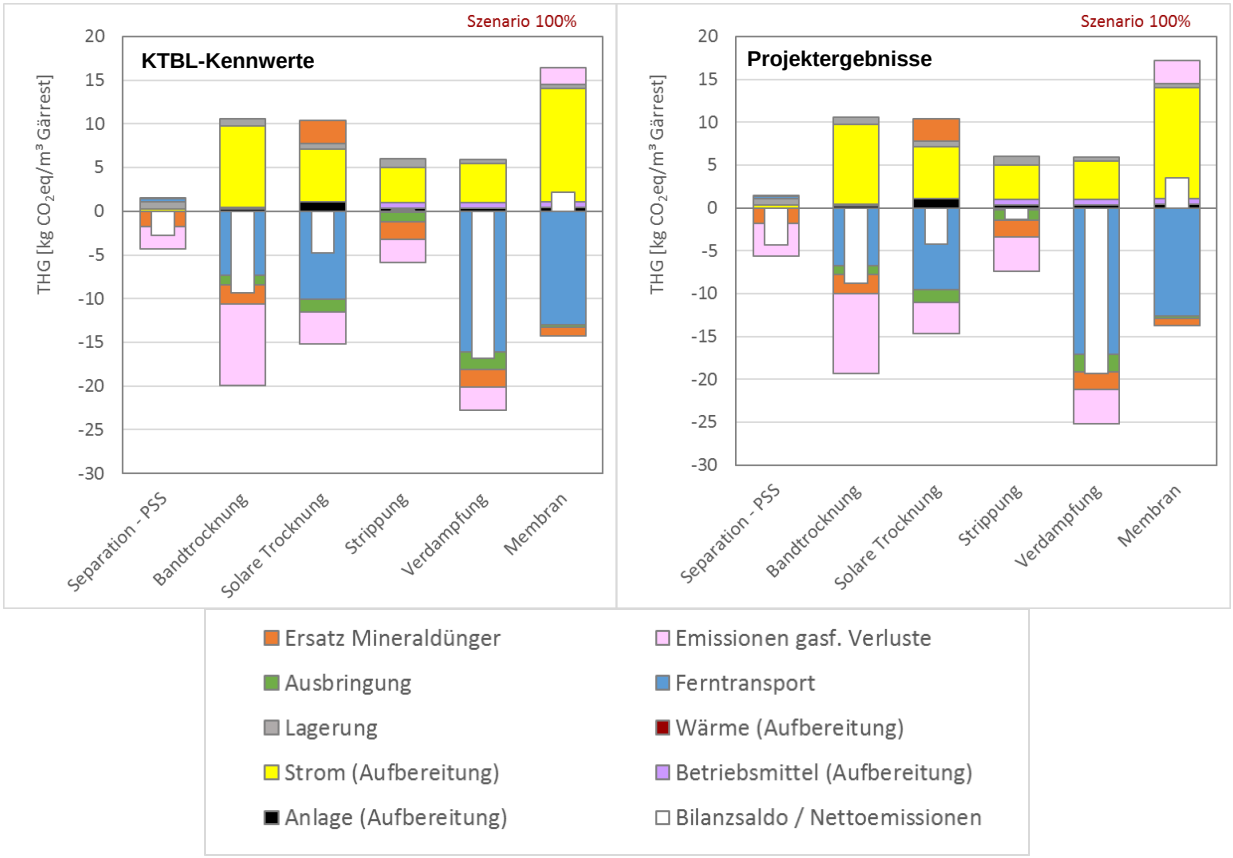


Abbildung 26: Einfluss der für die Feststoffseparation gewählten Abscheidegrade auf die Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und -verwertung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests. Entfrachtungsziel: alle Nährstoffe. Links: Abscheidegrade aus für Pressschneckenseparator nach KTBL (2013) und für Dekanterzentrifuge nach KTBL (2017); rechts: Projektergebnisse
Annahme: Berechnung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung.

Pelletierung des Trockenguts

Von der Pelletierung der getrockneten Gärreste versprechen sich viele Betreiber neben einer weiteren Volumenreduktion und einfacheren Handhabung auch bessere Absatzchancen – z. B. als Gartendünger, für den ein deutlich höherer Erlös erzielbar ist als für das Trockengut. Daher wurde auch der Effekt der Pelletierung am Beispiel der Bandtrocknungsverfahren geprüft.

Die Pelletierung wirkt sich vor allem auf zwei der Bilanzparameter für die Treibhausgasbilanzierung aus (analog für KEA, nicht dargestellt): Zum einen entstehen aufgrund der geringeren Volumina ein Drittel weniger Emissionen aus dem Ferntransport (Abb. 27). Zum anderen steigt der Strombedarf durch den zusätzlichen Verfahrensschritt an. Effekte bei Lagerung (Volumenreduktion) oder Ausbringung (Volumenreduktion, Technikwechsel zu Düngerstreuer) fallen weniger ins Gewicht. In Abbildung 27 sind die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Gärrest für das P50-Szenario dargestellt, da hier der Effekt beim Transport am stärksten zum Tragen kommt.

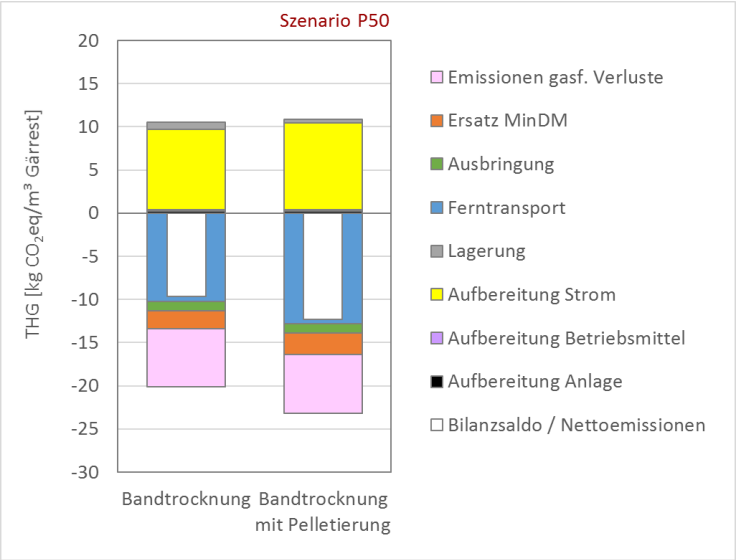


Abbildung 27: Einfluss der zusätzlichen Pelletierung des Trockenguts auf die Treibhausgasemissionen der Bandtrocknung. Entfrachtungsziel: 50 % der Phosphorfracht im unbehandelten Gärrest.
Annahme: Berechnung ohne Emissionen aus der Wärmenutzung.

5 Schlussfolgerungen

Durch die Gärrestaufbereitung und die überregionale Verwertung der Aufbereitungsprodukte lassen sich in der Regel Treibhausgasemissionen aus Transporten und der Einsatz von Mineraldüngemitteln in Ackerbauregionen verringern. Die Höhe dieser Minderung ist jedoch stark von dem eingesetzten Aufbereitungsverfahren und den Rahmenbedingungen der Nährstoffverwertung abhängig.

Die Aufbereitungsverfahren unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihres Energiebedarfs, sondern auch hinsichtlich der Eigenschaften der entstehenden Produkte. So handelt es sich beim Stripverfahren und der Vakuumverdampfung um Verfahren, die eine gezielte Abtrennung von Stickstoff ermöglichen. Bei der Vakuumverdampfung steht gleichzeitig wie bei anderen Verfahren, z. B. der Trocknung oder dem Membranverfahren, die Volumenreduktion im Vordergrund. Die Unterschiede in den Produkteigenschaften und –mengen müssen berücksichtigt werden, um das für die jeweiligen Bedingungen geeignete Verfahren zu identifizieren. Dies gilt für die Treibhausgasemissionen ebenso wie für den Energiebedarf oder die Wirtschaftlichkeit.

Die Rahmenbedingungen werden vor allem von der regionalen Nährstoffsituation bestimmt. In vielen Intensivtierhaltungsregionen bestehen Überschüsse sowohl an Stickstoff als auch an Phosphor, allerdings nicht immer für beide Nährstoffe in gleichem Ausmaß. Daher kann es in manchen Fällen ausreichen, bei der überregionalen Verwertung die Priorität auf den Nährstoff mit dem höheren Überschuss zu legen. Je nach Zielgröße bieten sich dann unterschiedliche Verfahren für die Aufbereitung der Gärreste an.

Für eine gezielte Phosphorentfrachtung eignen sich vor allem die Trocknungsverfahren. Dies gilt jedoch nur, wenn eine Abluftreinigung installiert ist, durch die Stickstoffverluste in Form von NH_3 minimiert werden. Auch durch die Vakuumverdampfung lassen sich unter diesen Bedingungen Treibhausgase im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests einsparen, allerdings in geringerem Umfang.

Soll vor allem Stickstoff aus der Überschussregion überregional verwertet werden, gelingen die höchsten Einsparungen an Treibhausgasen mit Verfahren, in denen eine hochkonzentrierte Ammoniumsulfatlösung produziert wird, vor allem durch die Vakuumverdampfung oder das Stripverfahren. Auch mit Trocknungsverfahren, bei denen die verfügbare BHKW-Wärme vollständig zur Trocknung der Gärreste genutzt wird, bestehen deutliche Vorteile gegenüber dem unbehandelten Gärrest.

Für eine vollständige Nährstoffentfrachtung sind Verfahren mit einer hohen Volumenreduktion von Vorteil. Auch hier sind die Vakuumverdampfung und Trocknungsverfahren zu nennen, die deutliche Minderemissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest möglich machen.

Diese Aussagen gelten nur, wenn Emissionen aus der Wärmenutzung nicht berücksichtigt werden. Verdrängt die Gärrestaufbereitung eine andere Wärmenutzung, bei der Wärme aus fossilen Energieträgern ersetzt wird, so müssen Emissionen für die Wärmenutzung in den Bilanzen berücksichtigt werden.

Werden Emissionen für die Wärmenutzung angerechnet, führt dies zu deutlich erhöhten Emissionen bei allen Verfahren mit Wärmenutzung. Nur Verfahren ohne Wärmenutzung, wie z. B. das Membranverfahren, weisen dann, je nach Szenario, geringe zusätzliche Emissionen gegenüber einer Verwertung der unbehandelten Gärreste auf. Hier ist der Strombedarf der derzeit auf dem Markt befindlichen Technik eine der Hautquellen für Emissionen in der Treibhausgasbilanz. Optimierungspotenzial für die Minderung des Strombedarfs in Membranverfahren besteht, so dass auch bei Berücksichtigung der Emissionen aus der Wärmenutzung eine emissionsarme Technik zur Aufbereitung von Gärresten zur Verfügung steht. Derzeit werden in verschiedenen Vorhaben vielversprechende Alternativen zur stromintensiven Ultrafiltration untersucht. Die alleinige Feststoffabtrennung mit dem Pressschneckenseparator bietet unter dem Gesichtspunkt der Treibhausgasminderung für keines der betrachteten Entfrachtungsziele Vorteile gegenüber der Verwertung des unbehandelten Gärrests.

Werden Emissionen aus der Wärmenutzung nicht berücksichtigt, ist die Einsparung von Treibhausgasemissionen aus der Aufbereitung der Gärreste für die Gesamtbilanz der Stromerzeugung aus Biogas unbedeutend. Die Emissionen, die durch die Substratbereitstellung sowie bei Errichtung und Betrieb der Biogasanlage entstehen, sind um ein Vielfaches höher als die für die Gärrestaufbereitung und –verwertung. Werden Emissionen aus der Wärmenutzung für die Aufbereitung angerechnet, so steigen die Nettoemissionen in der Gesamtbilanz des Biogasstroms für Wärme nutzende Verfahren deutlich an.

Allgemeingültige Aussagen zur Vorzüglichkeit einzelner Verfahren sind also nicht möglich. Vielmehr müssen im Einzelfall die regionalen wie die anlagenspezifischen Rahmenbedingungen in die Bewertung einbezogen werden, wenn durch die Gärrestaufbereitung eine umweltschonende und auch wirtschaftliche Verwertung der Gärreste erreicht werden soll.

6 Verwertung der Ergebnisse

Die im Vorhaben entwickelten Stoffstrom- und Bilanzierungsmodule für Treibhausgase und den Energieaufwand der Gärrestaufbereitung können in weiteren Projekten Anwendung finden. Derzeit führt das KTBL ein von der Landwirtschaftlichen Rentenbank gefördertes wissenschaftliches Begleitprogramm zur Gülleaufbereitung durch, bei dem zunächst die Wirtschaftlichkeit einer geplanten Gülleaufbereitungsanlage geprüft werden sollte. Die in beiden Projekten erarbeiteten Berechnungsmodule sollen zusammengeführt und vereinheitlicht werden, so dass ein Berechnungsmodell zur Verfügung steht, mit dem sowohl eine ökonomische als auch eine ökologische Bewertung von Aufbereitungsverfahren auf Basis eines gemeinsamen Datensatzes möglich ist. Die Methodik kann soll prinzipiell für Gülle wie für Gärreste angewendet werden.

Veröffentlichungen

Da das Teilprojekt erst im späteren Verlauf des Projekts begonnen wurde und zunächst die Ergebnisse der anderen Teilvorhaben abgewartet werden mussten, können die Ergebnisse vornehmlich nach Ende der Projektlaufzeit publiziert werden.

Vorträge

- **S. Wulf**, U. Roth, M. Fechter, J. Dahlin: Verfahren zur Aufbereitung von Gärprodukten. GGG Fachseminar „Gärprodukte im Wandel der Zeit, Leipzig, 14.03.2017

angemeldet:

- **U. Roth**, S. Wulf, M. Fechter, J. Dahlin: Biogas digestate processing – a cost efficient and climate friendly strategy for nutrient export from surplus regions? ManuResource 2017: International conference on manure management and valorization, 27.-28. November 2017, Eindhoven, Niederlande

Poster (angemeldet)

- U. Roth, S. Wulf, M. Fechter, J. Dahlin: Biogas digestate processing – a cost efficient and climate friendly strategy for nutrient export from surplus regions? 17. Internationale Ramiran Konferenz: Sustainable utilisation of manures and residue resources in agriculture, 4.-6. September 2017, Wexford, Irland (akzeptiert)
- U. Roth, S. Wulf, M. Fechter, J. Dahlin: Gärrestaufbereitung als Beitrag zur Nährstoffentfrachtung in Überschussregionen - Kosten und Treibhausgasemissionen. KTBL/FNR Biogaskongress 2017: Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven, 26.-27. September 2017, Bayreuth

Veröffentlichungen

- geplant für 2017: Fachartikel in Landtechnik online; https://www.landtechnik-online.eu/

Literatur

DüV (2017): Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305)

ecoinvent (2015): ecoinvent (2015): The ecoinvent Database, Version 3.2. http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-32/ecoinvent-32.html, Zugriff am 15.03.2017

EMEP (2016): EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. EEA Report No 21/2016. http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016, Zugriff am 22.04.2017

Flessa, H.; Müller, D.; Plassmann, K.; Osterburg, B.; Techen, A.-K.; Nitsch, H.; Nieberg, H.; Sanders, J.; Meyer zu Hartlage, O., Beckmann, E.; Anspach, V. (2012): Studie zur Vorbereitung einer effizienten und gut abgestimmten Klimaschutzpolitik für den Agrarsektor. Landbauforschung Sonderheft 361, Braunschweig

FNR (2009): Biogas-Messprogramm II – 61 Biogasanlagen im Vergleich. Projektbericht, Gülzow

FNR (2014): Verbundvorhaben: Effiziente energetische Verwertung von Pferdemist durch den Einsatz innovativer Techniken der kontinuierlichen Feststofffermentation und Gärreststabilisierung - Teilvorhaben 1, Gülzow

Haenel, H.-D.; Rösemann, C.; Dämmgen, U.; Freibauer, A.; Döring, U.; Wulf, S.; Eurich-Menden, B.; Döhler, H.; Schreiner, C.; Osterburg, B. (2016): Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990–2014. Thünen Report 39, Braunschweig

IPCC (2006): IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use

KTBL (2013): Faustzahlen Biogas. Darmstadt, 3. Ausgabe

KTBL (2015): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. KTBL-Heft 107, Darmstadt, 3. Auflage

KTBL (2016a): Betriebsplanung Landwirtschaft 20165/17, Datensammlung, Darmstadt

KTBL (2016b): Berechnungsparameter Klimagasbilanzierung (BEK), Onlineanwendung. http://daten.ktbl.de/bek/#start; Zugriff am 22.04.2017

KTBL (2017): Eindicken und Transportieren von Schweinegülle und Gärresten; Auftrag im Rahmen des KTBL-Arbeitsprogramms „Kalkulationsunterlagen 2016“ (unveröffentlicht)

Möller, K.; Schulz, R.; Müller, T (2010): Substrate inputs, nutrient flows and nitrogen loss of two centralized biogas plants in southern Germany. Nutrient Cycling in Agroecosystems 87, pp 307–325

Flessa, H.; Müller, D.; Plassmann, K.; Osterburg, B.; Techen, A.-K.; Nitsch, H.; Nieberg, H.; Sanders, J.; Meyer zu Hartlage, O., Beckmann, E.; Anspach, V. (2012): Studie zur Vorbereitung einer effizienten und gut abgestimmten Klimaschutzpolitik für den Agrarsektor. Landbauforschung Sonderheft 361, Braunschweig

TI (Thünen Institut) (2016): Persönliche Mitteilung von Heiner Flessa mit aktualisierten Berechnungen zu Flessa et al. (2012)

UBA (2017): Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen. Wie viel CO_2 verursacht eine Kilowattstunde Strom? https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/bilder/ strommix_1545x775.png, Zugriff am 05.04.2017

VDI (2012): „VDI 4600: Kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden“, VDI-Richtline, Düsseldorf

Anhang

Tabelle A-1: Massenverteilung

	fest	flüssig	ASL	Dampf/ (Ab-)Wasser
Separation (PSS)	13%	87%	0%	0%
Bandtrocknung	5%	70%	2%	23%
Solare Trocknung	6%	64%	0%	30%
Strippung	13%	81%	5%	1%
Verdampfung	13%	37%	4%	46%
Membran	22%	39%	0%	38%

Tabelle A-2: Nährstoffgehalte von unbehandeltem Gärrest und den Aufbereitungsprodukten

		N_{org}	NH_4-N	P_2O_5	K_2O
		g/kg FM			
Gärrest		2,10	3,90	2,50	9,30
Separation (PSS)	fest	5,23	2,84	4,31	7,35
	flüssig	1,65	4,05	2,24	9,58
Bandtrocknung	fest	18,0	3,35	17,8	49,5
	flüssig	1,65	4,05	2,24	9,58
	ASL	0,00	35,5	0,00	0,00
Solare Trocknung	fest	18,8	3,87	19,2	57,0
	flüssig	1,65	4,05	2,24	9,58
Strippung	fest	5,23	2,84	4,31	7,35
	flüssig	1,77	0,87	2,40	7,35
	ASL	0,00	0,87	0,00	0,00
Verdampfung	fest	5,23	2,84	4,31	7,35
	flüssig	3,89	2,06	5,28	7,35
	ASL	0,00	2,06	0,00	0,00
Membran	fest	5,67	3,96	9,38	8,60
	flüssig	2,09	7,64	0,99	8,60

Tabelle A-3: Nährstofffrachten mit dem unbehandelten Gärrest und den Aufbereitungsprodukten

		N_{org}	NH_4-N	P_2O_5	K_2O
		Tonnen/Jahr			
Gärrest		90,0	167	107	399
Separation (PSS)	fest	28,3	15,4	23,4	39,9
	flüssig	61,7	152	83,8	359
Bandtrocknung	fest	40,7	7,55	40,1	112
	flüssig	49,3	121	67,0	287
	ASL	0,00	34,4	0,00	0,00
Solare Trocknung	fest	44,8	9,23	45,7	136
	flüssig	45,2	111	61,4	263
Strippung	fest	28,3	15,4	23,4	39,9
	flüssig	61,7	30,4	83,8	359
	ASL	0,00	121	0,00	0,00
Verdampfung	fest	28,3	15,4	23,4	39,9
	flüssig	61,7	32,6	83,8	359
	ASL	0,00	119	0,00	0,00
Membran	fest	54,7	38,1	90,4	82,9
	flüssig	54,7	129	90,4	316

Tabelle A-4: Kumulierter Energieaufwand der Verwertung des unbehandelten Gärrest und der Aufbereitungsprodukte in den verschiedenen Szenarien
2 MW_{el} Biogasanlage mit 35 % Rindergülle und 65 % Maissilage im Frischmasse-Substratinput; Transportentfernung überregionale Verwertung 300 km

	Anlage	Betriebs-mittel	Strom	Wärme	Lagerung	Fern-transport	Aus-bringung	Ersatz MinDM	Nettoaufwand Gesamtprozess	
	Aufbereitung				Verwertung				ohne Wärme	mit Wärme
	MJ/m³ unbehandelter Gärrest									
Szenario P50										
Gärrest	0,00	0,00	0,00	0,00	7,5	293	47,0	-418	**-70,6**	**-70,6**
Separation - PSS	0,39	0,00	5,72	0,00	12,3	265	48,3	-444	**-112**	**-112**
Bandtrocknung	8,28	2,85	183	1.350	12,2	125	39,6	-450	**-78,7**	**1.271**
Solare Trocknung	18,9	0,00	118	1.350	9,33	128	35,8	-375	**-64,9**	**1.285**
Strippung	12,2	10,8	78,9	350	14,2	252	44,2	-446	**-33,9**	**317**
Verdampfung	12,2	10,6	87,3	951	10,6	158	32,3	-446	**-135**	**816**
Membran	16,9	9,86	255	0,00	7,92	84,5	41,0	-431	**-16,4**	**-16**
Szenario N50										
Gärrest	0,00	0,00	0,00	0,00	7,49	293	47,0	-418	**-70,6**	**-70,6**
Separation - PSS	0,39	0,00	5,72	0,00	12,1	283	48,3	-444	**-93,6**	**-93,6**
Bandtrocknung	8,28	2,85	183	1.350	12,0	167	39,6	-450	**-37,5**	**1.312**
Solare Trocknung	18,9	0,00	118	1.350	8,99	224	35,8	-375	**31,2**	**1.381**
Strippung	12,2	10,8	78,9	350	14,5	40,2	44,2	-446	**-246**	**105**
Verdampfung	12,2	10,6	87,3	951	11,3	42,2	32,3	-446	**-250**	**701**
Membran	16,9	9,86	255	0,00	7,86	181	41,0	-431	**79,6**	**79,6**
Szenario 100%										
Gärrest	0,00	0,00	0,00	0,00	7,20	585	47,0	-416	**224**	**224**
Separation - PSS	0,39	0,00	5,72	0,00	11,7	591	48,3	-444	**214**	**214**
Bandtrocknung	8,28	2,85	183	1.350	12,5	466	39,6	-450	**262**	**1.612**
Solare Trocknung	18,9	0,00	118	1.350	9,76	420	35,8	-375	**228**	**1.578**
Strippung	12,2	10,8	78,9	350	14,0	584	44,2	-446	**298**	**648**
Verdampfung	12,2	10,6	87,3	951	10,8	322	32,3	-446	**28,8**	**980**
Membran	16,9	9,86	255	0,00	8,32	373	41,0	-431	**272**	**272**

Tabelle A-5: Treibhausgasemissionen der Verwertung des unbehandelten Gärrest und der Aufbereitungsprodukte in den verschiedenen Szenarien
2 MW_{el} Biogasanlage mit 35 % Rindergülle und 65 % Maissilage im Frischmasse-Substratinput; Transportentfernung überregionale Verwertung 300 km

	Anlage	Betriebs-mittel	Strom	Wärme	Lagerung	Fern-transport	Aus-bringung	Ersatz MinDM	gasförmige Verluste	Nettoaufwand Gesamtprozess	
	Aufbereitung				Verwertung					ohne Wärme	mit Wärme
	kg CO_2eq/m³ unbehandelter Gärrest										
Szenario P50											
Gärrest	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30	17,9	6,12	-21,3	9,31	**13,3**	**13,3**
Separation - PSS	0,01	0,00	0,29	0,00	2,14	16,2	6,12	-23,0	9,41	**11,2**	**11,2**
Bandtrocknung	0,23	0,17	9,32	71,6	2,06	7,68	5,04	-23,4	2,54	**3,64**	**75,2**
Solare Trocknung	1,09	0,00	6,01	71,6	1,84	7,82	4,64	-18,5	8,27	**11,1**	**82,7**
Strippung	0,34	0,65	4,03	18,6	2,30	15,4	5,00	-23,2	9,24	**13,8**	**32,4**
Verdampfung	0,34	0,64	4,45	50,4	1,67	9,69	4,12	-23,2	9,25	**6,98**	**57,4**
Membran	0,47	0,59	13,0	0,00	1,60	5,17	5,87	-22,2	13,8	**18,3**	**18,3**
Szenario N50											
Gärrest	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30	17,9	6,12	-21,3	9,31	**13,3**	**13,3**
Separation - PSS	0,01	0,00	0,29	0,00	2,11	17,4	6,12	-23,0	9,41	**12,3**	**12,3**
Bandtrocknung	0,23	0,17	9,32	71,6	2,03	10,2	5,04	-23,4	2,54	**6,14**	**77,7**
Solare Trocknung	1,09	0,00	6,01	71,6	1,78	13,7	4,64	-18,5	8,27	**17,0**	**88,6**
Strippung	0,34	0,65	4,03	18,6	2,34	2,46	5,00	-23,2	9,24	**0,88**	**19,5**
Verdampfung	0,34	0,64	4,45	50,4	1,80	2,58	4,12	-23,2	9,25	**0,00**	**50,4**
Membran	0,47	0,59	13,0	0,00	1,59	11,1	5,87	-22,2	13,8	**24,2**	**24,2**
Szenario 100%											
Gärrest	0,00	0,00	0,00	0,00	1,25	35,8	6,12	-21,2	11,9	**33,9**	**33,9**
Separation - PSS	0,01	0,00	0,29	0,00	2,06	36,2	6,12	-23,0	9,41	**31,1**	**31,1**
Bandtrocknung	0,23	0,17	9,32	71,6	2,11	28,5	5,04	-23,4	2,54	**24,5**	**96,1**
Solare Trocknung	1,09	0,00	6,01	71,6	1,92	25,7	4,64	-18,5	8,27	**29,1**	**101**
Strippung	0,34	0,65	4,03	18,6	2,26	35,7	5,00	-23,2	9,24	**34,1**	**52,7**
Verdampfung	0,34	0,64	4,45	50,4	1,70	19,7	4,12	-23,2	9,25	**17,0**	**67,5**
Membran	0,47	0,59	13,0	0,00	1,68	22,8	5,87	-22,2	13,8	**36,0**	**36,0**

Tabelle A-6: Kumulierter Energieaufwand der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests
2 MW_{el} Biogasanlage mit 35 % Rindergülle und 65 % Maissilage im Frischmasse-Substratinput; Transportentfernung überregionale Verwertung 300 km

	Anlage	Betriebs-mittel	Strom	Wärme	Lagerung	Fern-transport	Aus-bringung	Ersatz MinDM	Nettoaufwand Gesamtprozess	
	Aufbereitung				Verwertung				ohne Wärme	mit Wärme
	MJ/m³ unbehandelter Gärrest									
Szenario P50										
Separation - PSS	0,39	0,00	5,72	0,00	4,76	-28,1	1,26	-25,7	**-41,7**	**-41,7**
Bandtrocknung	8,28	2,85	183	1.350	4,69	-167	-7,48	-31,9	**-8,06**	**1.342**
Solare Trocknung	18,9	0,00	118	1.350	1,84	-165	-11,3	43,2	**5,69**	**1.355**
Strippung	12,2	10,8	78,9	350	6,74	-40,6	-2,80	-28,5	**36,7**	**387**
Verdampfung	12,2	10,6	87,3	951	3,12	-134	-14,7	-28,5	**-64,2**	**887**
Membran	16,9	9,86	255	0,00	0,43	-208	-6,05	-13,6	**54,2**	**54,2**
Szenario N50										
Separation - PSS	0,39	0,00	5,72	0,00	4,57	-9,22	1,26	-25,7	**-23,0**	**-23,0**
Bandtrocknung	8,28	2,85	183	1.350	4,50	-126	-7,48	-31,9	**33,1**	**1.383**
Solare Trocknung	18,9	0,00	118	1.350	1,50	-68,4	-11,3	43,2	**102**	**1.452**
Strippung	12,2	10,8	79	350	6,96	-252	-2,80	-28,5	**-175**	**176**
Verdampfung	12,2	10,6	87,3	951	3,85	-251	-14,7	-28,5	**-180**	**771**
Membran	16,9	9,86	255	0,00	0,37	-112	-6,05	-13,6	**150**	**150**
Szenario 100%										
Separation - PSS	0,39	0,00	5,72	0,00	4,53	6,11	1,26	-27,6	**-9,60**	**-9,60**
Bandtrocknung	8,28	2,85	183	1.350	5,26	-120	-7,48	-33,8	**38,1**	**1.388**
Solare Trocknung	18,9	0,00	118	1.350	2,56	-165	-11,3	41,2	**4,39**	**1.354**
Strippung	12,2	10,8	78,9	350	6,81	-1,51	-2,80	-30,5	**74,0**	**424**
Verdampfung	12,2	10,6	87,3	951	3,61	-264	-14,7	-30,4	**-195**	**756**
Membran	16,9	9,86	255	0,00	1,12	-213	-6,05	-15,6	**48,6**	**48,6**

Tabelle A-7: Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests
2 MW_{el} Biogasanlage mit 35 % Rindergülle und 65 % Maissilage im Frischmasse-Substratinput; Transportentfernung überregionale Verwertung 300 km

	Anlage	Betriebs-mittel	Strom	Wärme	Lagerung	Fern-transport	Aus-bringung	Ersatz MinDM	gasförmige Verluste	Nettoemissionen Gesamtprozess	
	Aufbereitung				Verwertung					ohne Wärme	mit Wärme
	kg CO_2eq/m³ unbehandelter Gärrest										
Szenario P50											
Separation - PSS	0,01	0,00	0,29	0,00	0,84	-1,72	0,01	0,09	-1,67	**-2,15**	**-2,15**
Bandtrocknung	0,23	0,17	9,32	71,6	0,76	-10,2	-1,08	-6,78	-2,07	**-9,68**	**61,9**
Solare Trocknung	1,09	0,00	6,01	71,6	0,54	-10,09	-1,48	-1,05	2,80	**-2,17**	**69,4**
Strippung	0,34	0,65	4,03	18,6	1,00	-2,49	-1,11	-0,07	-1,85	**0,48**	**19,1**
Verdampfung	0,34	0,64	4,45	50,4	0,37	-8,23	-2,00	-0,07	-1,85	**-6,34**	**44,1**
Membran	0,47	0,59	13,0	0,00	0,30	-12,7	-0,25	4,50	-0,88	**4,98**	**4,98**
Szenario N50											
Separation - PSS	0,01	0,00	0,29	0,00	0,81	-0,57	0,01	0,09	-1,67	**-1,02**	**-1,02**
Bandtrocknung	0,23	0,17	9,32	71,59	0,73	-7,71	-1,08	-6,78	-2,07	**-7,18**	**64,4**
Solare Trocknung	1,09	0,00	6,01	71,6	0,48	-4,19	-1,48	-1,05	2,80	**3,67**	**75,3**
Strippung	0,34	0,65	4,03	18,6	1,04	-15,5	-1,11	-0,07	-1,85	**-12,4**	**6,15**
Verdampfung	0,34	0,64	4,45	50,4	0,50	-15,3	-2,00	-0,07	-1,85	**-13,3**	**37,1**
Membran	0,47	0,59	13,0	0,00	0,29	-6,86	-0,25	4,50	-0,88	**10,9**	**10,9**
Szenario 100%											
Separation - PSS	0,01	0,00	0,29	0,00	0,81	0,37	0,01	-2,48	-1,79	**-2,78**	**-2,78**
Bandtrocknung	0,23	0,17	9,32	71,6	0,86	-7,33	-1,08	-9,35	-2,19	**-9,37**	**62,2**
Solare Trocknung	1,09	0,00	6,01	71,6	0,67	-10,1	-1,48	-3,62	2,67	**-4,75**	**66,8**
Strippung	0,34	0,65	4,03	18,6	1,01	-0,09	-1,11	-2,64	-1,98	**0,19**	**18,8**
Verdampfung	0,34	0,64	4,45	50,4	0,45	-16,1	-2,00	-2,64	-1,97	**-16,9**	**33,6**
Membran	0,47	0,59	13,0	0,00	0,42	-13,0	-0,25	1,93	-1,01	**2,14**	**2,14**

Tabelle A-8: Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests für eine 500 kW_{el}-Biogasanlage
Transportentfernung überregionale Verwertung 300 km; Entfrachtungsziel 50 % der Phosphorfracht; Wärme nicht berücksichtigt
Sensitivitätsrechnung; zum Vergleich: 2 MW_{el} P50 in Tabelle A-7

500 kW_{el} P50	**Anlage**	**Betriebs-mittel**	**Strom**	**Lagerung**	**Fern-transport**	**Aus-bringung**	**Ersatz MinDM**	**gasförmige Verluste**	**Nettoemissionen Gesamtprozess ohne Wärme**
	Aufbereitung			**Verwertung**					
	kg CO_2eq/m³ unbehandelter Gärrest								
Separation - PSS	0,01	0,00	0,29	1,06	-1,72	-0,26	-1,67	0,09	**-2,20**
Bandtrocknung	0,23	0,17	9,32	1,50	-10,2	-1,35	-2,07	-6,78	**-9,22**
Solare Trocknung	1,09	0,00	6,01	0,84	-10,1	-1,77	2,80	-1,05	**-2,17**
Strippung	0,34	0,65	4,03	1,86	-2,49	-1,38	-1,85	-0,07	**1,08**
Verdampfung	0,34	0,64	4,45	1,32	-8,23	-2,26	-1,85	-0,07	**-5,65**
Membran	0,47	0,59	13,0	0,72	-12,7	-0,54	-0,88	4,50	**5,13**

Tabelle A-9: Kumulierter Energieaufwand der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests für eine Transportentfernung zur überregionale Verwertung von 150 km
2 MW_{el} Biogasanlage mit 35 % Rindergülle und 65 % Maissilage im Frischmasse-Substratinput; Entfrachtungsziel 50 % der Phosphorfracht; Wärme nicht berücksichtigt
Sensitivitätsrechnung; zum Vergleich: 300 km P50 in Tabelle A-6

150 km P50	**Anlage**	**Betriebs-mittel**	**Strom**	**Lagerung**	**Fern-transport**	**Aus-bringung**	**Ersatz MinDM**	**Nettoaufwand Gesamtprozess ohne Wärme**
	Aufbereitung			**Verwertung**				
	MJ/m³ unbehandelter Gärrest							
Separation - PSS	0,39	0,00	5,72	4,76	-14,5	0,87	-26,1	**-28,9**
Bandtrocknung	8,28	2,81	183	4,69	-85,9	-7,13	-31,9	**73,6**
Solare Trocknung	18,9	0,00	118	1,84	-84,7	-10,9	42,5	**85,5**
Strippung	12,2	10,9	78,9	6,74	-21,0	-3,38	-29,0	**55,4**
Verdampfung	12,2	10,7	87,3	3,12	-69,1	-16,0	-28,9	**-0,60**
Membran	16,9	9,55	255	0,43	-107	-5,75	-10,7	**158**

Tabelle A-10: Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und Verwertung der Aufbereitungsprodukte im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests unter Verwendung der im Projekt ermittelten Abscheidegrade für die Verfahren der Feststoffseparation
2 MW_{el} Biogasanlage mit 35 % Rindergülle und 65 % Maissilage im Frischmasse-Substratinput; Transportentfernung überregionale Verwertung 300 km; Entfrachtungsziel alle Nährstoffe; Wärme nicht berücksichtigt
Sensitivitätsrechnung; zum Vergleich: 100% in Tabelle A-7 (Basis Abscheidegrade KTBL 2013 und 2017)

Abscheidegrade Projektergebnisse 100%	**Anlage**	**Betriebs-mittel**	**Strom**	**Lagerung**	**Fern-transport**	**Aus-bringung**	**Ersatz MinDM**	**gasförmige Verluste**	**Nettoemissionen Gesamtprozess ohne Wärme**
	Aufbereitung			**Verwertung**					
	kg CO_2eq/m³ unbehandelter Gärrest								
Separation - PSS	0,01	0,00	0,29	0,81	0,26	0,00	-3,82	-1,82	**-4,28**
Bandtrocknung	0,23	0,17	9,32	0,86	-6,76	-1,03	-9,34	-2,20	**-8,75**
Solare Trocknung	1,09	0,00	6,01	0,67	-9,57	-1,43	-3,67	2,63	**-4,26**
Strippung	0,34	0,65	4,03	1,01	-0,23	-1,17	-3,99	-2,01	**-1,37**
Verdampfung	0,34	0,64	4,45	0,45	-17,1	-2,10	-3,98	-2,00	**-19,3**
Membran	0,47	0,57	13,0	0,42	-12,6	-0,25	2,75	-0,82	**3,53**

Tabelle A-11: Treibhausgasemissionen der Gärresttrocknung und Pelltierung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests; Bandtrocknung mit Abluftreinigung
2 MW_{el} Biogasanlage mit 35 % Rindergülle und 65 % Maissilage im Frischmasse-Substratinput; Transportentfernung überregionale Verwertung 300 km; Entfrachtungsziel 50 % der Phosphorfracht; Wärme nicht berücksichtigt
Sensitivitätsrechnung; zum Vergleich: P50 Bandtrocknung in Tabelle A-7

Pelletierung P50	**Anlage**	**Betriebs-mittel**	**Strom**	**Lagerung**	**Fern-transport**	**Aus-bringung**	**Ersatz MinDM**	**gasförmige Verluste**	**Nettoemissionen Gesamtprozess ohne Wärme**
	Aufbereitung			**Verwertung**					
	kg CO_2eq/m³ unbehandelter Gärrest								
Bandtrocknung mit Pelletierung	0,23	0,17	10,08	0,38	-12,84	-1,04	-6,78	-2,53	-12,3

Danksagung

Die Forschungsarbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes GÄRWERT (FKZ 22402213) durchgeführt. Die Förderung des Projektes erfolgte durch finanzielle Unterstützung des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe. Für die Förderung bedanken wir uns herzlich.

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages