

Gärrestaufbereitung als Beitrag zur Nährstoffentfrachtung von Überschussregionen – Kosten und Treibhausgasemissionen

Ursula Roth, Sebastian Wulf, Maximilian Fechter, Carsten Herbes, Johannes Dahlin

Die Gülle- und Gärrestaufbereitung bietet durch Volumenreduktion und Auftrennung der Nährstoffströme insbesondere in Regionen mit Nährstoffüberschüssen die Möglichkeit, Transportkosten bei der überregionalen Verwertung zu reduzieren und passgenaue Produkte für verschiedene Abnehmer herzustellen. Allerdings können die zusätzlichen Kapital- und Betriebsmittelkosten in der Regel nur in Verbindung mit Erlösen aus dem KWK-Bonus für die Nutzung der BHKW-Abwärme einer Biogasanlage ausgeglichen werden; es sei denn, es lassen sich hohe Preise für die Produkte außerhalb der Landwirtschaft erzielen. Auch auf die Treibhausgasbilanz der Aufbereitung hat die Wärmenutzung erheblichen Einfluss: Werden Referenzemissionen angerechnet, weil die Wärme nicht mehr für den Ersatz fossiler Ressourcen zur Verfügung steht, wiegt dies Einsparungen aus dem Transport bei Weitem auf. Pauschale Aussagen sind aber aufgrund der vielfältigen anlagenindividuellen Rahmenbedingungen (Höhe und Art des Nährstoffüberschusses, Transportdistanz, Wärmeverfügbarkeit, Anlagengröße etc.) nicht möglich. Im Einzelfall kann die Gärrestaufbereitung durchaus wirtschaftlich sein, insbesondere bei langen Transportwegen.

Schlüsselwörter

Gärreste, Aufbereitung, Nährstoffüberschüsse, Nährstoffentfrachtung, Treibhausgasemissionen, Kosten

Der Bedarf zur überregionalen Verwertung von Nährstoffen aus Regionen mit Überschüssen an Stickstoff und Phosphor wird durch die Vorgaben der novellierten Düngeverordnung (DüV 2017) weiter ansteigen. Betroffen sind besonders Regionen mit Intensivtierhaltung, in denen sich zugleich zahlreiche Biogasanlagen befinden. Deren Gärreste werden in Zukunft noch stärker als bisher mit Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft um Flächen für die Ausbringung konkurrieren.

Aufgrund der Volumenreduktion und der gezielten Auftrennung der Nährstoffströme wird in der Gärrestaufbereitung eine Möglichkeit zur Nährstoffentfrachtung von Überschussregionen gesehen. Diesen Vorteilen der Aufbereitung stehen jedoch Kosten, Energieeinsatz und Treibhausgasemissionen aus der Errichtung und dem Betrieb der Aufbereitungsanlagen gegenüber. Daher wurde im Rahmen des Projektes „GärWert“ für verschiedene Ausgangssituationen mit unterschiedlichem Entfrachtungsbedarf geprüft, ob sich durch die Aufbereitung Kosten oder Treibhausgasemissionen im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests einsparen lassen. Es wurden nur Szenarien betrachtet, die eine Vermarktung in der Landwirtschaft vorsehen. Außerlandwirtschaftliche Kundengruppen mit einer erhöhten Zahlungsbereitschaft für gärproduktbasierte Gartendünger und -erden, wie z. B. Privatgärtner, wurden nicht einbezogen. Hier liegt, zumindest für Teilströme, in Zukunft noch ein zusätzliches Vermarktungspotenzial (DAHLIN et al. 2016, 2017).

Vorgehen

Für die Berechnungen wurden am Beispiel der Gärrestaufbereitung an einer Biogasanlage (Substratinput: 35 % Rindergülle, 65 % NawaRo) mit 2 MW elektrischer Leistung für die gängigsten Aufbereitungsverfahren (Tabelle 1) folgende Aufwendungen und Verbräuche erfasst: Baumaterialien, Betriebsmittel und Energie für den gesamten Prozess ab Verlassen der Biogasanlage (Überlauf Nachgärer bzw. nach 150 Tagen im gasdichten System) bis hin zur landwirtschaftlichen Verwertung. Dies schließt Vorleistungen für die Herstellung von Technik, Gebäuden oder Betriebsmitteln mit ein. Der Ersatz von Mineraldünger durch die im Gärrest und den Aufbereitungsprodukten enthaltenen Nährstoffe wurde ebenfalls in die Beurteilung einbezogen. Für Stickstoff wurde dabei nur das Jahr der Anwendung berücksichtigt, da die Nachlieferung aus dem organischen N-Pool in den Folgejahren schwer abzuschätzen ist. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass überregional verwertete Gärreste und Produkte ab einer Transportentfernung von 20 km aus logistischen Gründen über das gesamte Jahr hinweg in die abnehmende Ackerbauregion transportiert und dort bis zur Ausbringung gelagert werden können. So wird der punktuell hohe Bedarf an Transportkapazitäten während der Ausbringphase vermieden. Die Ausbringung erfolgt einphasig (ohne Umladen) im Umkreis von bis zu 15 km von der Anlage bzw. den externen Lagerstätten. Ab dieser Entfernung kommen absetzige Verfahren mit Trennung von Transport und Ausbringung zum Einsatz. Es wurden Transportentfernungen von 10 bis 300 km (10, 15, 20, 25, 50, 75, 150, 300 km) betrachtet. Dies ermöglicht Aussagen zu Vor- oder Nachteilen von Aufbereitungstechniken nicht nur bei weiträumigen, sondern auch bei regional begrenzten Nährstoffüberschüssen.

Tabelle 1: Betrachtete Verfahren und deren Produkte¹⁾

Kennung/Verfahren	Produkte	Wärmebedarf	
BT	Trocknung der Festphase aus der Separation (Pressschnecke; PSS) und eines Teils der Flüssigphase mit Bandrockner unter Nutzung der gesamten zur Verfügung stehenden BHKW-Abwärme ²⁾ und anschließender Abluftreinigung, bei der eine gering konzentrierte Ammoniumsulfatlösung (ASL) anfällt	Trockengut, Flüssigphase nach PSS, ASL (18 %)	ja
ST	Separation (PSS), Strippung der Flüssigphase und Gewinnung einer Ammoniumsulfatlösung	Festphase nach PSS, NH ₄ -freie Flüssigphase nach Separation (PSS), ASL (32 %)	ja
VV	Separation (PSS), Vakuumverdampfung der Flüssigphase mit anschließender Brüdenwäsche und Gewinnung einer Ammoniumsulfatlösung	Festphase nach PSS, NH ₄ -freies Konzentrat, ASL (32 %)	ja
M	Separation (PSS), zusätzliche Feststoffabtrennung aus der Flüssigphase durch Flockungshilfsmittel und Dekanterzentrifuge (DZ), anschließend Aufbereitung der verbleibenden Flüssigphase in einer Membrananlage mit Ultrafiltrations- (UF) und Umkehrosmostufe (UO)	Festphase nach PSS und DZ, Konzentrate aus Ultrafiltration und Umkehrosmostufe	nein

¹⁾ Eine genauere Beschreibung der betrachteten Verfahren findet sich im Abschlussbericht zum GärWert-Vorhaben (FNR 2017), Kapitel Teilvorhaben 3

²⁾ Nach Abzug der Prozesswärme für die Biogasanlage (pauschal 25 %).

Gemäß der Düngeverordnung (DüV 2017) wurde der Stickstoff aus Gärresten bzw. den daraus resultierenden Aufbereitungsprodukten auf die Obergrenze von 170 kg N aus Wirtschaftsdüngern angerechnet. Dadurch wird seit Juni 2017 auch für Gärreste die mögliche Aufbringmenge je Hektar begrenzt, was den Flächenbedarf der Anlagen erhöht.

Für den Anteil der überregional verwerteten Produkte wird davon ausgegangen, dass ein Erlös für die Nährstoffe erzielt werden kann. Je nach Produkt wird ein unterschiedliches Erlöspotenzial angesetzt. Der mögliche Einfluss von Erlösspannen wurde nicht berücksichtigt.

Bei der Bilanzierung der Treibhausgasemissionen wurden direkte Emissionen bei der Aufbereitung, Lagerung und Ausbringung der Gärreste und Aufbereitungsprodukte berücksichtigt. Neben den direkt klimawirksamen Gasen Lachgas (N_2O) und Methan (CH_4) ist auch das indirekt klimawirksame Ammoniak (NH_3) einbezogen worden. Bei den hier betrachteten Aufbereitungsverfahren selbst treten keine direkten Emissionen auf. Zwar geht bei der Trocknung ein Großteil des Ammoniumstickstoffs (NH_4-N) in die Gasphase über. Hier wird jedoch davon ausgegangen, dass eine Abluftreinigung vorhanden ist, mit der das freigesetzte NH_3 zu 90 % in einer Ammoniumsulfatlösung zurückgehalten wird.

Für einige Aufbereitungsverfahren wird Prozesswärme benötigt. Diese kann in der Regel aus der Abwärme des BHKW (Restwärme nach Abzug des Eigenwärmebedarfs der Biogasanlage) bereitgestellt werden. Die Nutzung dieser Wärme kann jedoch in Konkurrenz zu anderen Formen der Wärmenutzung stehen. Sie könnte vermarktet und so Einkünfte generiert bzw. Treibhausgasemissionen durch den Ersatz fossiler Ressourcen vermieden werden. Aus diesem Grund wurden für Verfahren mit Wärmenutzung jeweils zwei Varianten berechnet: Eine, in der die Wärme unberücksichtigt bleibt, sowie eine, in der bei Verfahren mit Wärmenutzung Opportunitätskosten bzw. Referenzemissionen für die benötigte Wärmemenge berücksichtigt sind. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wurde als dritte Möglichkeit der KWK-Bonus einbezogen, den viele bestehende Anlagen noch bis Ende ihrer EEG-Laufzeit erhalten. Dies gilt jedoch nur, wenn bisher keine Wärmenutzung stattgefunden hat, die zum Bezug des KWK-Bonus berechtigt.

Die in den Berechnungen zugrunde gelegten Abscheidegrade der einzelnen Aufbereitungsschritte sind in Tabelle 2 ausgewiesen. Diese wurden entweder im Rahmen des Projekts auf Praxisanlagen erhoben oder beruhen auf Angaben von Herstellern. Details können dem Abschlussbericht zum Gärwert-Vorhaben (Teilvorhaben 3) entnommen werden (FNR 2017).

Tabelle 2: Abscheidegrade der einzelnen Aufbereitungsschritte

Eingangsmaterial	Pressschnecken-separator	Dekanter-zentrifuge	Bandtrocknung mit Abluftreinigung		Strippung		Vakuumverdampfung		Membranverfahren	
	Gärrest unbehandelt	flüssig nach PSS	fest nach PSS, anteilig flüssig		flüssig nach PSS		Flüssigphase nach PSS		flüssig nach DZ	Filtrat nach UF
Produkt ¹⁾	PSS fest	DZ fest	Trockengut	ASL (18 %)	N-reduziert flüssig	ASL (32 %)	Konzentrat	ASL (32 %)	Konzentrat UF	Konzentrat RO
TM	48 %	60 %	100 %	2)	94 %	2)	93 %	2)	59 %	100 % ³⁾
N_{ges}	17 %	23 %	57 %	0 %	43 %	57 %	44 %	57 %	38 %	100 % ³⁾
NH_4-N	9,2 %	15 %	17 %	75 %	20 %	80 %	22 %	78 %	32 %	100 % ³⁾
P_{ges} (P_2O_5)	22 %	80 %	100 %	0 %	100 %	0 %	100 %	0 %	58 %	100 % ³⁾

¹⁾ Produkt, auf das sich die in der Tabelle angegebenen Abscheidegrade in % beziehen.

²⁾ Zugabe von Schwefelsäure.

³⁾ Es verbleiben lediglich Spuren an Nährstoffen im Permeat der Umkehrosmose, daher Abscheidegrad nahe 100 %.

Kosten und Emissionen wurden sowohl für die Verwertung der Aufbereitungsprodukte als auch des unbehandelten Gärrests berechnet. Die Verwertung der unbehandelten Gärreste wird als Referenz herangezogen: Es werden Kostensteigerungen oder -einsparungen bzw. Mehr- oder Minderemissionen durch die Aufbereitung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests dargestellt. Alle Ergebnisse beziehen sich daher auf einen Kubikmeter unbehandelten Gärrest.

Kennwerte für Kosten und Treibhausgasemissionen

Die Quellen für die verwendeten Kennwerte für Kosten und Treibhausgasemissionen entlang des Aufbereitungs- und Verwertungsprozesses können Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 3: Quellen für die in den Kostenberechnungen und der Treibhausgasbilanzierung verwendeten Kennwerte

Kostenfaktoren/ Treibhausgasquellen	Mengen	Kosten/Erlöse	Treibhausgase (THG)
Material Errichtung Anlage	Hersteller Praxisanlagen	Hersteller ¹⁾	ecoinvent (2015)
Betriebsmittel Betrieb Anlage	Hersteller Praxisanlagen	Strom, Wärme: KTBL (2016) weitere: Praxisanlagen	Strom: dt. Strommix nach UBA (2019) Wärme: Erdgas nach probas (UBA 2017) weitere: ecoinvent (2015)
Material und Technik Lagerung	KTBL-Datenbank zu Verfahrenskosten	KTBL-Datenbank zu Verfahrenskosten	ecoinvent (2015)
Technik und Diesel- verbrauch Ausbringung	KTBL-Datenbank zu Verfahrenskosten	KTBL-Datenbank zu Verfahrenskosten	ecoinvent (2015)
Mineraldüngerersatz	berechnet	Nährstoffwert: KTBL (2016a) Erlöspotenzial Produkte: KTBL (2017)	N: TI (2016) P: KTBL (2016b)
Direkte Emissionen bei Aufbereitung, Lagerung und Ausbringung ²⁾		nicht relevant	Emissionsfaktoren siehe Tabelle 4 und Tabelle 5 Klimawirksamkeit N ₂ O, CH ₄ : INTERGOVERN- MENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2006)

¹⁾ Anlagenkosten beinhalten die jährliche Abschreibung für Gebäude und Technik sowie Zins- und Reparatur-/Wartungskosten. Abschreibungszeiträume: Gebäude 30 Jahre; Technik 12 Jahre (außer Separatoren: 8 Jahre).

²⁾ Es wird davon ausgegangen, dass für Lagerung und Ausbringung emissionsminimierende Techniken zum Einsatz kommen.

Direkte und indirekte Emissionen

Bisher existieren keine Emissionsfaktoren für aufbereitete Gärreste. Daher wurde mithilfe von Analogieschlüssen größtenteils auf die im landwirtschaftlichen Emissionsinventar (RÖSEMANN et al. 2017) verwendeten Faktoren für Wirtschaftsdünger und unbehandelte Gärreste zurückgegriffen. Die unterschiedlichen Eigenschaften der Aufbereitungsprodukte wurden bei der Auswahl der Emissionsfaktoren berücksichtigt, wie z. B. die geringere Neigung zur Bildung einer Schwimmdecke oder eine erhöhte Fließfähigkeit im Vergleich zum unbehandelten Gärrest. Während bei der Lagerung N₂O-, CH₄- und NH₃-Emissionen auftreten können (Tabelle 4), sind bei der Ausbringung vor allem direkte NH₃-Emissionen relevant (Tabelle 5). Zusätzlich werden für NH₃ indirekte Lachgasemissionen berücksichtigt, die durch die Deposition von Ammoniak bzw. Ammonium verursacht werden (RÖSEMANN et al. 2017).

Tabelle 4: Emissionsfaktoren für die Berechnung der Emissionen bei der Lagerung von unbehandeltem Gärrest und Aufbereitungsprodukten. Emissionsfaktoren aus dem Emissionsinventar für die deutsche Landwirtschaft wurden RÖSEMANN et al. (2017) entnommen.

Lagergut	Emissionsfaktor (EF)			Quelle/Erläuterungen Emissionsfaktoren
	N ₂ O-N kg/kg N _{tot}	NH ₃ -N kg/kg NH ₄ -N	CH ₄ m ³ /m ³ CH ₄ ¹⁾	
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 mit fester Abdeckung CH ₄ - EF für vergorene Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger ¹⁾
Fest – Lagerung an der Anlage und Ackerbauregion				
Feststoffe frisch	0,013	0,4	0,01	überdacht, Folienabdeckung; N ₂ O und CH ₄ nach Emissionsinventar: N ₂ O - EF für Festmist CH ₄ - analog Gülle NH ₃ nach MÖLLER et al. (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 ₂ O - keine Schwimmdecke, keine Emissionen NH ₃ - EF für vergorene Wirtschaftsdünger CH ₄ - EF für vergorene Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger ¹⁾
ASL	0	0	0	Lagerung in Edeltank, keine Emissionen

¹⁾ Der Emissionsfaktor nimmt Bezug auf das Methanbildungspotenzial B₀. Statt des im Emissionsinventar verwendeten Werts für B₀ wird der Richtwert nach KTBL (2015) herangezogen.

Tabelle 5: Verwendete Emissionsfaktoren für NH₃-Verluste nach der Ausbringung von unbehandeltem Gärrest und den Aufbereitungsprodukten

Produkt	NH ₃ -N kg/kg NH ₄ -N	Quelle/Erläuterung Emissionsfaktor ¹⁾
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		
Anhängepflanzenschutzspritze, in wachsenden Getreidebestand	0,074	EMEP/EEA (2016)

¹⁾ Emissionsfaktoren aus dem Emissionsinventar für die deutsche Landwirtschaft wurden RÖSEMANN et al. (2017) entnommen.

Nährstoff Erlöse

Nährstoff Erlöse wurden lediglich für den überregional verwerteten Anteil angenommen. Zusätzlich wurde davon ausgegangen, dass vor allem für feste Aufbereitungsprodukte sowie für konzentrierte Nährstofflösungen – hier Ammoniumsulfatlösung – höhere Erlöse zu erzielen sind als für den unbehandelten Gärrest oder die aufbereiteten Flüssigphasen. Es wurden daher auf Basis der Eigenschaften im Vergleich zu synthetischen Düngemitteln (z.B. Nährstoffverfügbarkeit, pflanzenhygienische Aspekte, Tabelle 6) produktspezifische Faktoren ermittelt, welchen Anteil des Nährstoffwerts die Landwirte in der abnehmenden Region voraussichtlich bereit wären zu zahlen. Die geringste Zahlungsbereitschaft wurde dabei für den Gärrest angenommen. Der erzielte Erlös errechnet sich aus der überregional verwerteten Menge an im Anwendungsjahr pflanzenverfügbaren Nährstoffen N und P, dem Nährstoffwert (nach KTBL (2016): 843 €/t N; 382 €/t P₂O₅) und dem erwarteten Erlöspotenzial („Faktor Nährstoffwert“ in Tabelle 6). So sind z. B. von 1 t Gesamtstickstoff aus der Flüssigphase nach Separation mit der Pressschnecke etwa 70 % im Anwendungsjahr pflanzenverfügbar. Allerdings wird für die Vergütung dieses Anteils nur der 0,6-fache Nährstoffwert berücksichtigt (Tabelle 6). In vielen nährstoffreichen Regionen sind die auf Basis dieser Annahmen errechneten Erlöse allerdings bei anlagennaher Verwendung nicht zu erzielen. Sie sind also vor allem für eine überregionale Vermark-

tung relevant. Für eine anlagennahe Vermarktung müssten regionalspezifische, geringere Erlöspotenziale abgeleitet werden. Im vorliegenden Beitrag wird davon ausgegangen, dass keine regionale Vermarktung stattfindet, sondern der regional verwertete Anteil der Gärreste bzw. -produkte auf den Flächen für die Substratbereitstellung für die Biogasanlage ausgebracht wird.

Tabelle 6: Erlöspotenzial für den unbehandelten Gärrest und die Aufbereitungsprodukte bei der überregionalen Verwertung

Produkt	Vor-/Nachteile gegenüber synthetischen Düngemitteln	Faktor Nährstoffwert ¹⁾	Anzuwenden auf Nährstoffe in:
Rohgärrest	nicht hygienisiert	0,5	unbehandelter Gärrest
Feste Aufbereitungsprodukte			
Festphase frisch	nicht hygienisiert jedoch positive Humuswirkung	0,9	unbehandelte Festphase Pressschnecke Festphase Membranverfahren (Pressschnecke plus Flockung/Dekanter)
Festphase getrocknet	stabilisiert zusätzlich positive Humuswirkung	1	Trockengut Bandtrocknung
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 aus Stripverfahren Konzentrate aus Vakuumverdampfung und Membranverfahren
Ammoniumsulfatlösung			
ASL 17 %	hygienisch unbedenklich nur leicht verfügbarer N_{\min} geringerer N- und S-Gehalt als 30 % ASL ggf. zusätzliche Anforderungen an Ausbringtechnik	0,8	ASL aus Bandtrocknung
ASL 30 %	hygienisch unbedenklich nur leicht verfügbarer N_{\min} ggf. zusätzliche Anforderungen an Ausbringtechnik	0,9	ASL aus Stripverfahren und Vakuumverdampfung

¹⁾ Der Faktor Nährstoffwert drückt den Anteil des Nährstoffwerts aus, für den voraussichtlich ein Erlös erzielt wird. Die Erlöse beziehen sich für Stickstoff nur auf den im Anwendungsjahr verfügbaren Anteil, d.h. 100 % des mineralischen ($\text{NH}_4\text{-N}$) und 5 % des organischen Stickstoffs. Für P wird von einer vollständigen Verfügbarkeit im Anwendungsjahr ausgegangen.

Entfrachtungsszenarien

Während in einer Reihe von Regionen vor allem hohe Stickstoffüberschüsse die Möglichkeiten einer regionalen Verwertung der anfallenden Wirtschaftsdünger und Gärreste begrenzen, gilt dies andersorts für Phosphor. In besonders viehstarken Regionen beträgt der Phosphorüberschuss zum Teil bis zu 40 %, für Stickstoff im Extremfall sogar annähernd 50 % (OSTERBURG et al. 2016, JANSSEN-MINSEN 2016). Je nach regionaler Situation kann eine spürbare Entlastung also bereits mit einer Teilentfrachtung für einen der beiden Nährstoffe erreicht werden. In diesem Fall müssen nicht immer zwingend alle Gärreste bzw. Aufbereitungsprodukte überregional verwertet werden. Daher wurden neben einer vollständigen Entfrachtung auch Szenarien betrachtet, bei denen das Entfrachtungsziel entweder auf Stickstoff oder auf Phosphor ausgerichtet ist (Tabelle 7). Je nach Zielnährstoff werden in den Teilentfrachtungsszenarien P50 und N50 in Abhängigkeit von den Nährstoffgehalten unterschiedliche

Produkte für die überregionale Verwertung herangezogen. Während z. B. für das N-Szenario zunächst die aufkonzentrierte ASL aus der Region verbracht wird, bieten sich für eine P-Entfrachtung die P-anereicherten Festprodukte an. Nicht in allen Fällen kann der Entfrachtungsbedarf durch die für das Szenario am besten geeigneten Produkte erreicht werden. Dann müssen teilweise auch Produkte überregional verwertet werden, die aufgrund geringerer Gehalte des Zielnährstoffs wenig transportwürdig sind.

Tabelle 7: 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

Zusätzlich wird auch die Kompletentfrachtung, d. h. die überregionale Verwertung des gesamten Gärrestanfalls bzw. aller Produkte untersucht. Die Betrachtung des gesamten Gärrest- bzw. Nährstoffanfalls ermöglicht einen Vergleich der Verfahren unabhängig von einzelnen Nährstoffen. Vorteile einzelner Aufbereitungsverfahren ergeben sich in diesem Fall durch das Ausmaß der Volumenreduktion im Vergleich zum unbehandelten Gärrest. Dies stellt ein Extremszenario dar, das in der Praxis zwar eher nicht oder nur in Ausnahmefällen bei flächenlosen Anlagen zum Tragen kommt. Allerdings gelangen bereits heute im Nordwesten Deutschlands große Mengen Gülle in die überregionale Verwertung.

Sowohl bei der Kompletentfrachtung als auch beim P50-Szenario sind für die Strippung keine Vorteile im Vergleich zum unbehandelten Gärrest zu erwarten, da diese alleine auf eine N-Ausschleusung ohne Volumenreduktion ausgelegt ist. Der Vollständigkeit halber und für die Gegenüberstellung der Szenarien werden die Ergebnisse der Strippung auch für diese beiden Szenarien dargestellt. In der Diskussion wird jedoch nur beim N50-Szenario genauer auf die Strippung eingegangen.

Ergebnisse und Diskussion

Massenverteilung und Nährstoffgehalte der Aufbereitungsprodukte

Entscheidend für Einsparungen bei Lagerung, Ausbringung und Transport ist zum einen die Massenverteilung, bei der sich auch die mögliche Volumenreduktion widerspiegelt. Bei einer Teilentfrachtung eines bestimmten Nährstoffs spielen zum anderen die Nährstoffgehalte der einzelnen Aufbereitungsprodukte eine wichtige Rolle. Aus Massenverteilung (Abbildung 1) und Nährstoffgehalten (Abbildung 2) ergeben sich die Nährstoffströme (Abbildung 3), d. h. die Verteilung der Nährstoffe auf die Produkte.

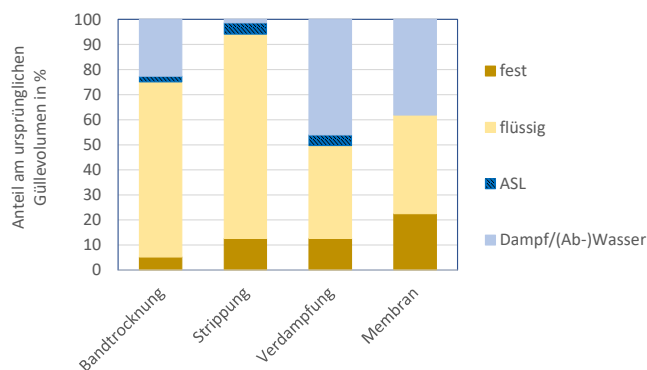


Abbildung 1: Massenverteilung der Aufbereitungsprodukte bezogen auf den unbehandelten Gärrest (= 100 %)

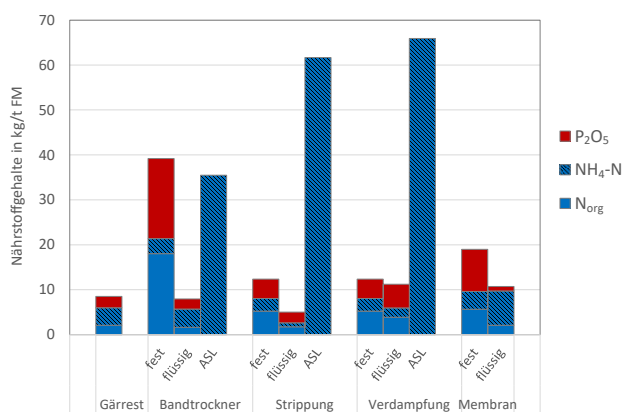


Abbildung 2: Nährstoffgehalte der Aufbereitungsprodukte

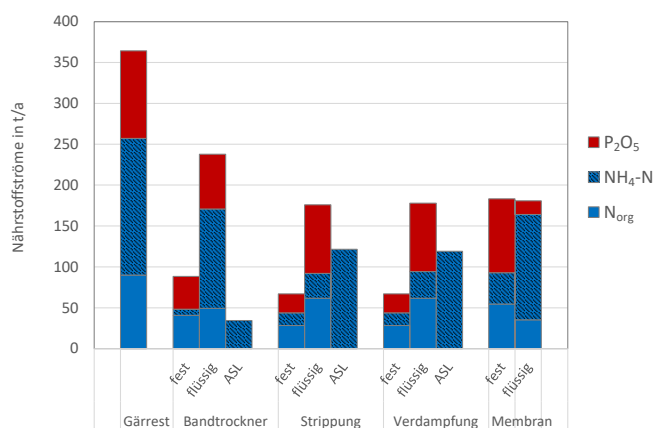


Abbildung 3: Nährstoffströme mit den Aufbereitungsprodukten

Kosten

Kosten für die überregionale Verwertung aller Nährstoffe (ohne Prozesswärmekosten)

Die Kosten der überregionalen Verwertung des gesamten unbehandelten Gärrests belaufen sich bei einer Transportentfernung von 300 km und nach Abzug der Nährstofferlöse auf 25 € je m³ (Abbil-

derung 4 links). Der Großteil dieser Kosten wird dabei durch den Transport verursacht. Gärrestlagerung und -ausbringung tragen deutlich weniger zu den Gesamtkosten bei. Auch die Nährstoff Erlöse für die im Gärrest enthaltenen Nährstoffe fallen kaum ins Gewicht, nicht zuletzt weil nur ein Teil des Stickstoffs für die Erlöse berücksichtigt wird (Tabelle 6). Durch die Aufbereitung der Gärreste entstehen einerseits zusätzliche Kosten, vor allem für die Anlagenerrichtung, aber auch für den Strom- und sonstigen Betriebsmitteleinsatz (Abbildung 4 links). Es kommt andererseits aber teilweise auch zu Einsparungen, insbesondere beim Transport der Produkte, bzw. zu höheren Nährstoff Erlösen. Die für einige Verfahren benötigte Prozesswärme ist in Abbildung 4 noch nicht berücksichtigt. Die Strippung wird aus den unter „Entfrachtungsszenarien“ genannten Gründen lediglich zum Vergleich dargestellt.

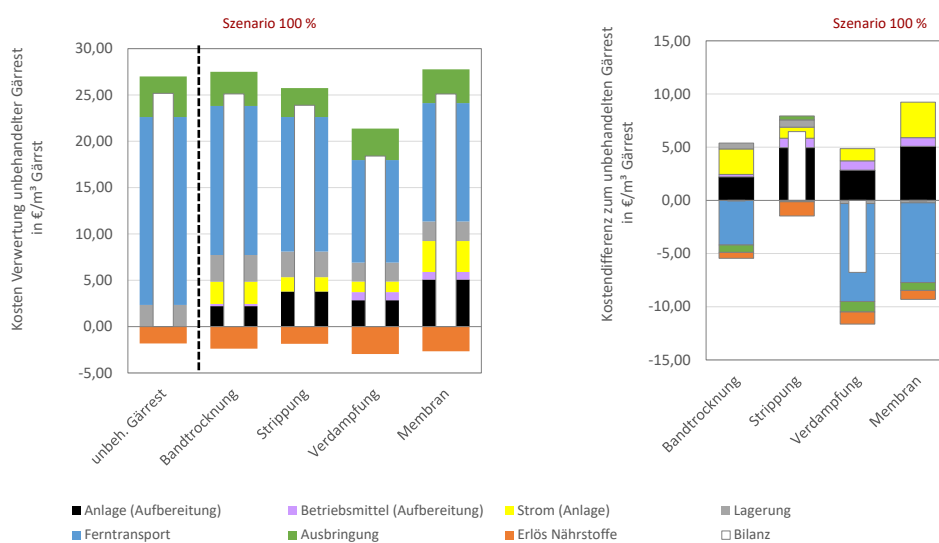


Abbildung 4: Links: Kosten für die überregionale Verwertung aller Nährstoffe mit dem unbehandelten Gärrest bzw. den Aufbereitungsprodukten. Rechts: Mehrkosten bzw. Einsparungen durch eine Gärrestaufbereitung und -verwertung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests. Alle Angaben für eine Transportentfernung von 300 km ohne Berücksichtigung des Prozesswärmebedarfs einiger Verfahren.

Um Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren deutlicher zu machen, ist in Abbildung 4 rechts die Differenz für die einzelnen Kostenkategorien im Unterschied zum unbehandelten Gärrest dargestellt. Die Nulllinie in dieser Darstellung entspricht den Nettokosten für die Verwertung des unbehandelten Gärrests in diesem Szenario (= Bilanzsaldo (weißer Balken) aus Abbildung 4 links; 25,17 €/m³). Zusatzkosten im Vergleich zum unbehandelten Gärrest sind positiv und Einsparungen negativ aufgetragen. Der Saldo stellt in diesem Fall die Nettokosten des Aufbereitungsverfahrens im Vergleich zum unbehandelten Gärrest je Kubikmeter Gärrest dar. Diese Darstellungsweise wird in den folgenden Abbildungen beibehalten. Auf eine Darstellung der absoluten Kosten wird verzichtet, da sich Änderungen durch die unterschiedlichen Entfrachtungsziele fast ausschließlich bei den Transportkosten ergeben.

Die Anlagenkosten fallen vor allem bei Strippung und Verdampfung deutlich ins Gewicht. Die Kosten für Strom sind besonders beim Membranverfahren durch den hohen Strombedarf für Pumpen in den Filtrationseinheiten, aber auch bei der Bandtrocknung mit der stromintensiven Abluftreinigung hoch. Deutliche Einsparungen bei den Transport- und in geringerem Ausmaß den Ausbringungskosten gelingen mit der Vakuumverdampfung und dem Membranverfahren, da sich das zu transpor-

tierende bzw. zu lagernde Volumen halbiert. Diese Einsparungen werden beim Membranverfahren jedoch durch die hohen Anlagen- und Energiekosten fast vollständig ausgeglichen. Ähnlich verhält es sich für die Bandtrocknung mit Abluftreinigung: Einsparungen beim Transport gegenüber dem unbehandelten Gärrest werden von den Mehrkosten für die Aufbereitung ausgeglichen. Durch die angenommene höhere Zahlungsbereitschaft für die Aufbereitungsprodukte als für den unbehandelten Gärrest (Tabelle 6) können zusätzliche Nährstoff Erlöse erzielt werden. Allerdings haben diese im Vergleich zu den anderen Kostenfaktoren nur einen geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

Für das hier betrachtete Szenario (300 km, Verwertung aller Nährstoffe, Prozesswärme nicht berücksichtigt) lassen sich lediglich durch die Vakuumverdampfung nennenswerte Nettoeinsparungen im Vergleich zur Verwertung des nicht behandelten Gärrests in Höhe von etwa 6,80 € je m³ Ausgangsgärrest erzielen (Abbildung 4 rechts). Durch Bandtrocknung oder das Membranverfahren lassen sich unter diesen Voraussetzungen keine bzw. kaum Kosten einsparen. Sollten sich derzeit untersuchte Ansätze für eine energieeffizientere Ultrafiltration bzw. Ersatztechnologien beim Membranverfahren umsetzen lassen (BRUESS et al. 2018), wäre jedoch für dieses Verfahren gegebenenfalls eine deutliche Kostenreduktion möglich. Dadurch könnten sich zumindest für die hier zugrunde gelegten Rahmenbedingungen (300 km, Komplettentfrachtung) Vorteile gegenüber dem unbehandelten Gärrest ergeben.

Kosten unter Berücksichtigung der Prozesswärme

Werden Opportunitätskosten für die benötigte Prozesswärme berücksichtigt (Abbildung 5 Mitte), so führt dies aufgrund des hohen Wärmebedarfs für die Trocknung und die Vakuumverdampfung zu bedeutenden Mehrkosten. Für die Strippung fällt dies weniger ins Gewicht, da weit weniger Wärme eingesetzt wird. Bei dieser Betrachtungsweise ist die wärmeunabhängige Membrantechnik das günstigste Aufbereitungsverfahren, während die Verdampfung trotz hoher Einsparungen für den Ferntransport Mehrkosten im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests verursacht.

Kann die Anlage jedoch den KWK-Bonus für die neu hinzugekommene Wärmenutzung in Anspruch nehmen (Abbildung 5 rechts), ergeben sich für die wärmenutzenden Verfahren entsprechend wirtschaftliche Vorteile. Für die Bandtrocknung, für die hier eine komplette Nutzung der Restwärme angenommen wird, übertreffen die Erlöse die Einsparungen aus dem Ferntransport bei Weitem. Insgesamt beläuft sich die Nettoeinsparung (= Bilanz) unter diesen Voraussetzungen auf fast 9 € je m³ Gärrest. Auch bei der Vakuumverdampfung mit geringerem Wärmebedarf können nennenswerte Erlöse aus dem KWK-Bonus erzielt werden. Dadurch steigt die Nettoeinsparung im Vergleich zum unbehandelten Gärrest auf ca. 13 € je m³ Gärrest an.

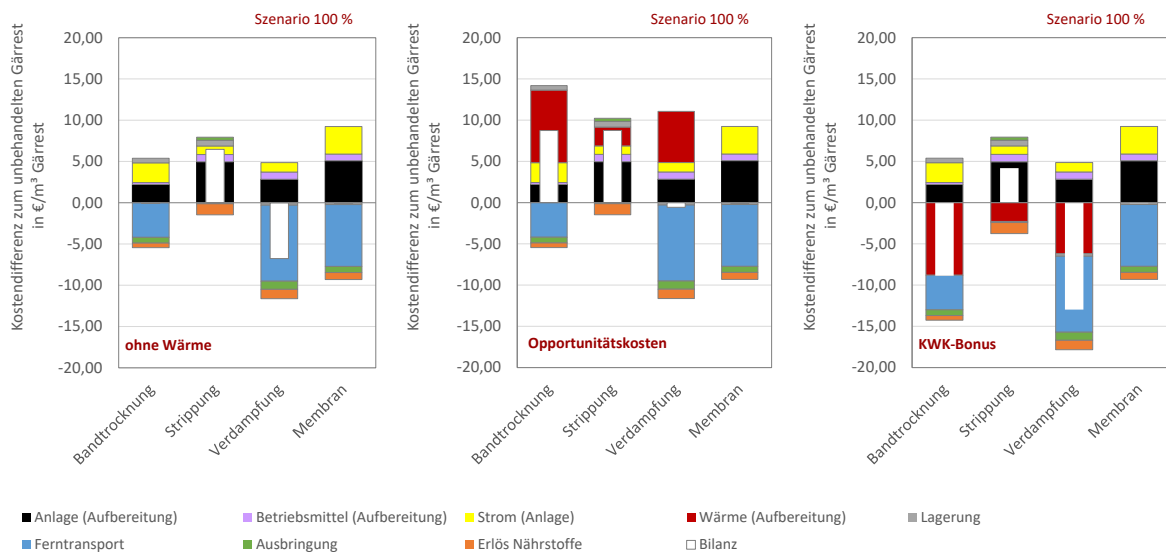


Abbildung 5: Einfluss der Prozesswärme auf die Kosten der Gärrestaufbereitung und -verwertung für eine Komplettentfrachtung (100%) bei einer Transportentfernung von 300 km; Darstellung als Differenz zur Verwertung des unbehandelten Gärrests. Links: ohne Berücksichtigung der Prozesswärme für die Aufbereitung, Mitte: Darstellung unter Berücksichtigung von Opportunitätskosten, rechts: Darstellung unter Berücksichtigung von Erlösen durch den KWK-Bonus. Kosten für die Verwertung des unbehandelten Gärrests zum Vergleich (= Nulllinie/Referenzwert): 25,17 €/m³.

Kosten in Abhängigkeit vom Entfrachtungsziel

Zusätzlich zur Komplettentfrachtung wurden auch Teilentfrachtungsszenarien für die Zielnährstoffe N und P betrachtet. Denn nicht immer besteht ein genereller Nährstoffüberschuss. Vielmehr ergibt sich in manchen Regionen nur für einen der beiden Nährstoffe, die auch im Rahmen der Überarbeitung der Düngeverordnung diskutiert wurden, ein Entlastungsbedarf. Durch die verschiedenen Aufbereitungsverfahren kommt es zu einer unterschiedlichen Verteilung der beiden Nährstoffe auf die entstehenden Massenströme (Abbildung 3). Die entstehenden Aufbereitungsprodukte unterscheiden sich in ihren Nährstoffgehalten und der Massenverteilung z. T. deutlich voneinander (Abbildung 2 bzw. Abbildung 1). Dieser Umstand kann gezielt zur Minimierung des Transportaufwands genutzt werden, indem zunächst die Produkte mit der höchsten Konzentration des Zielnährstoffs für die überregionale Verwertung genutzt werden. Insofern sollte für eine 50%-ige P- bzw. N-Entfrachtung (P50 bzw. N50) geprüft werden, ob sich unter diesen Bedingungen andere Verfahren als vorteilhaft zeigen als für die Komplettentfrachtung (100%). Tatsächlich bieten sich bei einer Teilentfrachtung, je nach Zielgröße, zum Teil andere Aufbereitungsverfahren an. In beiden Szenarien betragen die Nettokosten für die Verwertung des unbehandelten Gärrests 16 €/m³, da jeweils die Hälfte des Gärrestanfalls transportiert werden muss.

Szenario P50

So zeigen sich für den teilweisen Export von Phosphor leichte Vorteile durch die Bandtrocknung im Vergleich zur überregionalen Verwertung aller Nährstoffe (Abbildung 6 Mitte). Bereits im ersten Schritt, der Separation mit der Pressschnecke, kommt es zu einer Aufkonzentration des Phosphors in der Festphase (Tabelle 2, Abbildung 2) – dies gilt jedoch für alle hier betrachteten Verfahren. Zusätzlich wird bei der Bandtrocknung durch Zuführung eines Teils der Flüssigphase weiterer Phosphor in

das Trockengut überführt. Insgesamt liegen so ca. 35 % des P in transportwürdiger Form vor (Abbildung 3). Die Einsparungen bei Transport und Ausbringung für eine überregionale Verwertung von 50 % des anfallenden P im Vergleich zum unbehandelten Gärrest gleichen die durch die Aufbereitung entstehenden Mehrkosten aus: Es ergibt sich eine Einsparung von etwa einem Euro je Kubikmeter Ausgangsgärrest. Für die Strippung zeigen sich erwartungsgemäß keine Vorteile, da diese auf die N-Entfrachtung abzielt.

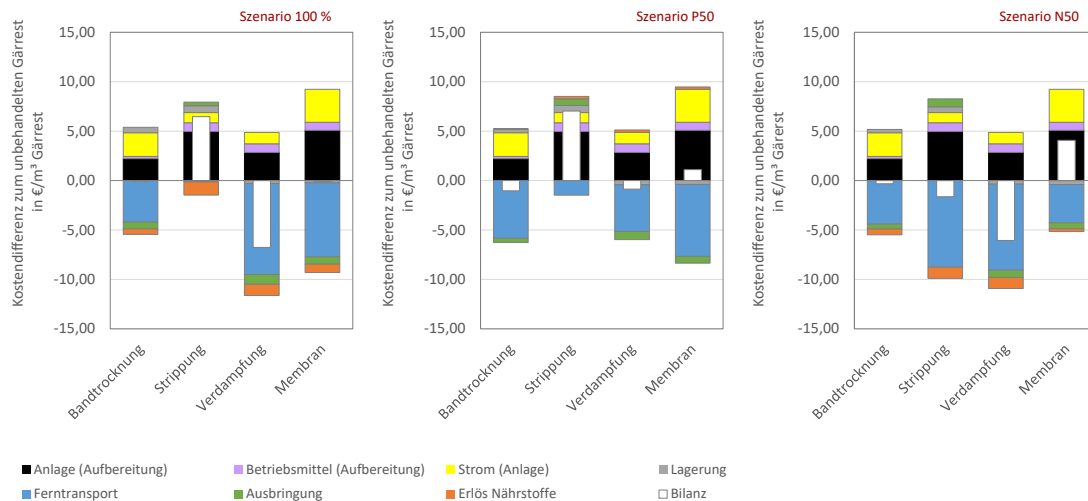


Abbildung 6: Kosten der Gärrestaufbereitung im Vergleich zu einer Verwertung des unbehandelten Gärrests in Abhängigkeit vom Entfrachtungsziel bei einer Transportentfernung für den überregional verwerteten Anteil von 300 km ohne Berücksichtigung der Prozesswärme. Links: Entfrachtungsziel alle Nährstoffe, Mitte: Entfrachtungsziel 50 % der Phosphorfracht im unbehandelten Gärrest, rechts: Entfrachtungsziel 50 % der Stickstofffracht im unbehandelten Gärrest. Nährstoff Erlöse werden lediglich für überregional verwertete Nährstoffe angenommen. Kosten für die Verwertung des unbehandelten Gärrests zum Vergleich (= Nulllinie/Referenzwert im jeweiligen Szenario): 100 %: 25,17 €/m³; P50 und N50: 15,99 €/m³.

Bei der Verdampfung wird auch das Volumen der Flüssigphase um die Hälfte verringert (Abbildung 1). Das Konzentrat weist daher höhere P-Konzentrationen als das Ausgangsprodukt (Flüssigphase aus PSS) auf (Abbildung 2), wodurch die Transportkosten weiter reduziert werden können. Es muss jedoch nur ein Teil der Produkte für die Erreichung des Entfrachtungsziels transportiert werden. So kommen Einsparungen beim Transport im Vergleich zur Komplettentfrachtung nur bedingt zum Tragen und können die hohen Anlagen- und Betriebskosten nicht ausgleichen. Insgesamt wird im P50-Szenario durch die Verdampfung eine Nettoeinsparung im Vergleich zum Gärrest von knapp 90 Cent pro Kubikmeter unbehandelter Gärrest erreicht. Dies ist deutlich weniger als bei der Verwertung aller Nährstoffe (Szenario 100%, Abbildung 6 links).

Beim Membranverfahren wird durch die zusätzliche Feststoffabtrennung mit der Dekanterzentrifuge ein deutlich größerer Anteil des im Gärrest enthaltenen Phosphors in die Festphase überführt (Abbildung 3). Für eine überregionale Verwertung von 50 % des P muss hier kein Flüssigprodukt transportiert werden. Dadurch ergeben sich für das Membranverfahren in diesem Szenario die höchsten Einsparungen beim Transport im Vergleich zum unbehandelten Gärrest. Aufgrund der hohen Anlagen- und Energiekosten ist dennoch keine Kosteneinsparung im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests möglich: Es kommt zu Mehrkosten in Höhe von 1,10 € je Kubikmeter Ausgangsgärrest. Alternativ könnte für das P50-Szenario nach der zweistufigen Feststoffabtrennung (PSS

plus DZ) auf die weitere Aufbereitung der Flüssigphase verzichtet werden, da allein dadurch das Entfrachtungsziel schon erreicht wäre. Entsprechend würden Investitions- und Energiekosten deutlich geringer liegen. Allerdings wären zugleich die Lagerungs- und Ausbringungskosten höher, weil doppelt so viel Flüssigprodukt wie bei der Membranaufbereitung anfiel. Diese Option wurde im Vorhaben nicht betrachtet.

Szenario N50

Muss vornehmlich Stickstoff aus der Überschussregion exportiert werden (Abbildung 6 rechts), zeigt sich abweichend von den beiden bisher betrachteten Szenarien ein Kostenvorteil für die Strippung gegenüber dem unbehandelten Gärrest. Ziel der Strippung ist eine N-Entfrachtung der Flüssigphase: Rund 47 % der gesamten Stickstofffracht des Gärrests werden in der hochkonzentrierten Ammoniumsulfatlösung (ASL) gebunden. Allein durch den Export der ASL wird das Entfrachtungsziel von 50 % des anfallenden N fast erreicht und es können deutliche Einsparungen beim Ferntransport realisiert werden. Der kostenaufwendige Transport der kaum reduzierten Flüssigphase entfällt weitestgehend. Aufgrund hoher Anlagenkosten kommt es allerdings nur zu einer Einsparung von etwa 1,60 € je Kubikmeter im Vergleich zum unbehandelten Gärrest.

Ähnliches gilt auch für die Vakuumverdampfung, bei der aber zugleich eine deutliche Verminderung des Gesamtvolumens erreicht wird. Dadurch können zusätzlich Ausbringungskosten eingespart werden. Insgesamt ergibt sich eine Kostenersparnis von 6 € pro Kubikmeter Ausgangsgärrest.

Für die Bandtrocknung ergeben sich im N50-Szenario im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests nur geringe Änderungen der Nettokosten. Die Einsparungen aus dem Transport sind geringer als für das P50-Szenario, da nur wenig Stickstoff in Form von ASL vorliegt und auch keine starke Aufkonzentration von Stickstoff im Trockengut stattfindet. Es muss also noch ein vergleichsweise großer Teil der Flüssigphase überregional verwertet werden, sodass sich am Ende zusätzliche Kosten und Einsparungen durch die Aufbereitung ungefähr die Waage halten.

Das Membranverfahren führt trotz reduzierter Gesamtvolumina zu deutlichen Mehrkosten in einer Höhe von ca. 4 € je m³ Ausgangsgärrest. Anders als für Phosphor findet für Stickstoff in diesem Verfahren keine ausgeprägte Aufkonzentration in einem der Aufbereitungsprodukte statt (Abbildung 2). Daher sind die Einsparungen beim Ferntransport für diese Zielgröße deutlich geringer als für eine P-Entfrachtung und können die hohen Aufbereitungskosten nicht ausgleichen.

Nährstofferlöse

Die Nährstofferlöse spielen insgesamt eine untergeordnete Rolle für das Gesamtergebnis der Kostenberechnungen. Dies liegt daran, dass nur die überregional verwerteten Nährstoffe aus Gärrest bzw. Aufbereitungsprodukten für die Erlöse berücksichtigt werden und – für Stickstoff bedeutsam – lediglich der im Jahr der Anwendung pflanzenverfügbare Anteil angerechnet wird (Tabelle 6). Im P50-Szenario (Abbildung 6 Mitte) ergeben sich trotz höherer Erlöspotenziale der Produkte geringere Nährstofferlöse für die Aufbereitungsverfahren als für den unbehandelten Gärrest. Denn hier gelangen mit dem unbehandelten Gärrest immer zugleich 50 % des Stickstoffs in die überregionale Verwertung und werden zumindest teilweise vergütet. Durch die Aufbereitungsverfahren wird demgegenüber das P-Entfrachtungsziel fast ausschließlich durch den Export von Produkten mit geringen oder schlecht verfügbaren Stickstoffgehalten erreicht (Festprodukte, N-reduzierte Flüssigphasen). Das heißt, nur wenig und vornehmlich organischer Stickstoff kommt in die überregionale Verwertung. Dieser Un-

terschied zum unbehandelten Gärrest kann auch durch höhere Erlöspotenziale für die in den Aufbereitungsprodukten enthaltenen Nährstoffe nicht ausgeglichen werden. Bei der Stickstoffentfrachtung (N50) hingegen können für die ASL sehr hohe Erlöse erzielt werden, da diese nur mineralischen Stickstoff enthält, der vollständig angerechnet und hoch vergütet wird. Dies führt insbesondere für die Strippung und die Vakuumverdampfung zu Mehreinnahmen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest (Abbildung 6 rechts). Werden alle Nährstoffe berücksichtigt (100%-Szenario), kommen die höheren Erlöse für die Produkte vollständig zum Tragen (Abbildung 6 links). Werden Wärmekosten oder KWK-Erlöse berücksichtigt, ändern sich die Kosten in den beiden Teilentfrachtungsszenarien wie für das 100%-Szenario beschrieben.

Kosten in Abhängigkeit von der Transportentfernung

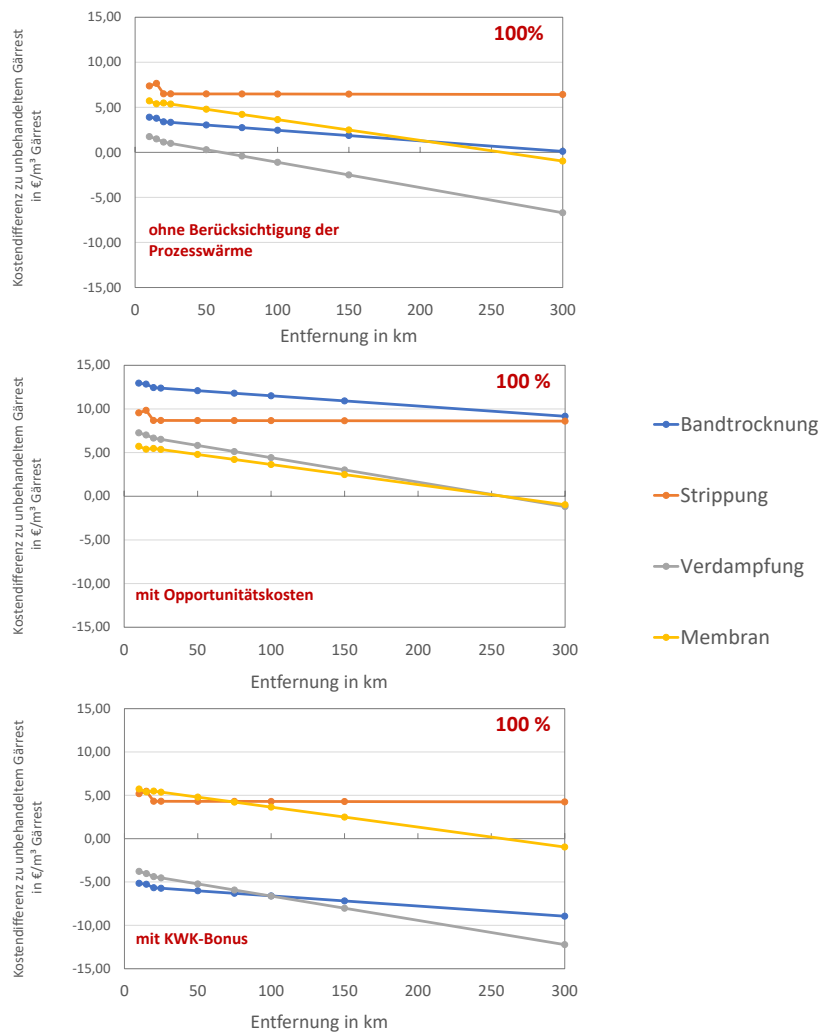
Vorteile von reduzierten Transportvolumina kommen vor allem bei großen Transportentfernungen zum Tragen. Allerdings besteht nicht in allen Überschussregionen die Notwendigkeit von weiten Transporten. Geringere Einsparungen bei den Transportkosten in regional begrenzten Überschussregionen führen für die meisten der betrachteten Aufbereitungsverfahren und Szenarien dazu, dass kein Kostenvorteil mehr gegenüber dem unbehandelten Gärrest vorhanden ist. In den folgenden Abbildungen sind jeweils nur die Nettokosten im Vergleich zum unbehandelten Gärrest dargestellt. So entsprechen die Bilanzsalden aus Abbildung 5 den Werten für 300 km in Abbildung 7 (Einfluss Wärme im Szenario 100 %) und die Salden aus Abbildung 6 denen für 300 km in Abbildung 8 (Vergleich Entfrachtungsziel).

Transportentfernung und Wärmekosten

Wird die Prozesswärme nicht berücksichtigt (Abbildung 7 oben; Szenario 100 %), so erreicht bei Transportentfernungen unter 150 km auch die für 300 km vorteilhafte Vakuumverdampfung keine Einsparung gegenüber der Verwertung des unbehandelten Gärrests. Müssen Opportunitätskosten für die Wärme veranschlagt werden (Abbildung 7 Mitte), hat sich bereits gezeigt (Abbildung 5), dass selbst bei hohen Entfernungen durch die Aufbereitung keine Einsparungen möglich sind. Kann jedoch ein KWK-Bonus generiert werden (Abbildung 7 unten), so ergeben sich für die beiden Verfahren mit hohem Wärmedarf, die Bandtrocknung und die Vakuumverdampfung, bereits bei einer anlagen-nahen Verwertung geringere Kosten als für die Verwertung des unbehandelten Gärrests. Für kleinere Biogasanlagen gilt dies allerdings nur eingeschränkt, weil für diese im Gegensatz zur hier dargestellten Anlagengröße von 2 MW z. T. erheblich höhere Anlagenkosten entstehen.

Für die Strippung zeigt sich ein Muster, das von den anderen Verfahren abweicht: Zunächst kommt es zwischen 10 und 15 km zu einem Kostenanstieg. Dann sinken die Gesamtkosten im Vergleich zu den anderen Aufbereitungstechniken merklich, um für alle weiteren Entfernungen weitestgehend konstant zu bleiben. Bei 20 km findet in den Berechnungen ein Wechsel von einphasiger zu absetziger Logistik statt. Ab dieser Entfernung entspricht der Transportaufwand für die Aufbereitungsprodukte der Strippung im betrachteten 100%-Szenario in etwa dem für den Gärrest (vgl. für 300 km Abbildung 6 oben). Dies liegt an den kaum verminderten Gesamtvolumina bei diesem Verfahren, die im 100%-Szenario immer vollständig transportiert werden müssen. Für die kurzen Distanzen, bei denen Transport und Ausbringung einphasig erfolgen, führt dies aufgrund der längeren Hof-Feld-Entfernung zu einem Kostenanstieg zwischen 10 und 15 km, während bei den anderen Verfahren bereits Einsparungen wirksam werden, und zwar durch geringere Transportvolumina von Flüssig- (Verdamp-

fung, Membran) bzw. Festphase (Bandrocknung). Aus diesem Grund fällt für die Strippung auch der Kostensprung beim Wechsel auf die absetzige Logistik mit günstigerem LKW-Transport deutlicher aus als bei den anderen Aufbereitungsverfahren.



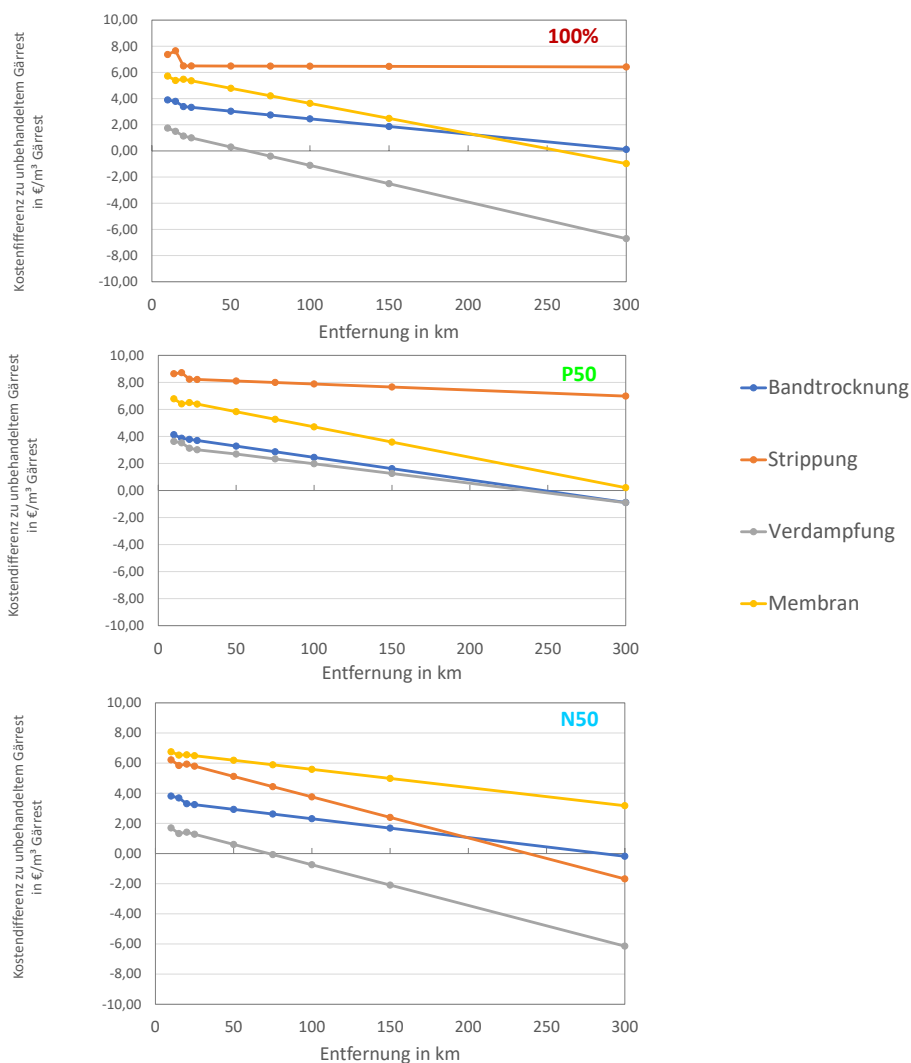
Kosten Verwertung unbehandelter Gärrest in €/m³ Gärrest (= Nulllinie/Referenzwert ohne Aufbereitung)	Transportdistanz in km									
	10	15	20	25	50	75	100	150	300	
	7,61	8,83	7,54	7,86	9,43	11,01	12,58	15,73	25,17	

Abbildung 7: Kosten der Gärrestaufbereitung und -verwertung im Vergleich zum unbehandelten Gärrest in Abhängigkeit von der Transportentfernung für eine vollständige überregionale Verwertung (100%-Szenario) und bei unterschiedlicher Berücksichtigung der Prozesswärme. Oben: ohne Berücksichtigung der Prozesswärme der Aufbereitung; Mitte: Opportunitätskosten für Prozesswärme; unten: Generierung des KWK-Bonus für Prozesswärme.

Transportentfernung und Entfrachtungsziel

Wird der Einfluss der Transportentfernung auf die Kosten für die verschiedenen Entfrachtungsziele verglichen (Abbildung 8), ergeben sich für Entfernungen bis 150 km lediglich durch die Vakuumverdampfung Vorteile gegenüber dem unbehandelten Gärrest. Dies gilt jedoch nur für die Komplett- und die 50%ige N-Entfrachtung (100 %, N50; Abbildung 8 oben bzw. unten). Alle anderen Verfahren errei-

chen, wenn überhaupt, nur für 300 km Einsparungen gegenüber der Verwertung des unbehandelten Gärrests. In direkter Anlagenumgebung ist dies allerdings auch mit der Vakuumverdampfung nicht möglich: Erst ab einer Entfernung zwischen 50 und 75 km überwiegen die Einsparungen beim Transport die zusätzlichen Kosten für die Aufbereitung.



Szenario	Transportdistanz in km									
	10	15	20	25	50	75	100	150	300	
Kosten Verwertung unbehandelter Gärrest in €/m³ Gärrest	7,61	8,83	7,54	7,86	9,43	11,01	12,58	15,73	25,17	
(= Nulllinie/Referenzwert ohne Aufbereitung)	P50 / N50	7,07	7,68	7,17	7,33	8,11	8,9	9,69	11,26	15,99

Abbildung 8: Kosten der Gärrestaufbereitung und -verwertung im Vergleich zum unbehandelten Gärrest und in Abhängigkeit von der Transportentfernung und vom Entfrachtungsziel. Oben: Entfrachtungsziel alle Nährstoffe, Mitte: 50 % der Phosphorfracht im unbehandelten Gärrest, unten: Entfrachtungsziel 50 % der Stickstofffracht im unbehandelten Gärrest. Es wurden keine Kosten oder Einkünfte für die benötigte Prozesswärme berücksichtigt.

Treibhausgase

Treibhausgasemissionen bei der überregionalen Verwertung aller Nährstoffe

Viele der oben beschriebenen Beobachtungen zu Einflussgrößen und Vorteilhaftigkeit einzelner Verfahren gelten in ähnlicher Form auch für die Treibhausgasemissionen. Aufgrund von Einflussgrößen

wie den direkten Emissionen ergeben sich in der Gesamtaussage dennoch teilweise andere Aussagen als bei den Kostenbetrachtungen.

Werden zunächst die Treibhausgasemissionen für die überregionale Verwertung des gesamten Gärrestanfalls (Szenario 100 %) ohne Aufbereitung betrachtet (Abbildung 9 links), zeigt sich analog zu den Kosten, dass die Transporte den größten Effekt haben. Zusätzlich fallen vor allem die direkten Verluste an NH₃, N₂O und CH₄ bei Lagerung und Ausbringung des Gärrests ins Gewicht. Grund hierfür ist u. a. die Annahme, dass der Gärrest nach Ablauf der gesetzlich geforderten 150 Tage im gasdichten System in der aufnehmenden Region gelagert wird. In diesem Fall ist eine gasdichte Lagerung nicht möglich, weil das zurückgehaltene Methan nicht verwertet werden kann. Auch der Ersatz von Mineraldüngern hat für die Treibhausgase einen deutlichen Effekt: Aufgrund des hohen Energieaufwandes und der Lachgasemissionen bei der Mineraldüngerherstellung kann ein bedeutender Teil der Emissionen aus Gärresttransport und -ausbringung (ca. 40 %) kompensiert werden. Die Nettoemissionen für eine vollständige Nährstoffentfrachtung ohne vorhergehende Aufbereitung belaufen sich bei einer Transportentfernung von 300 km auf knapp 31 kg CO₂eq/m³ Gärrest (Abbildung 9 links).

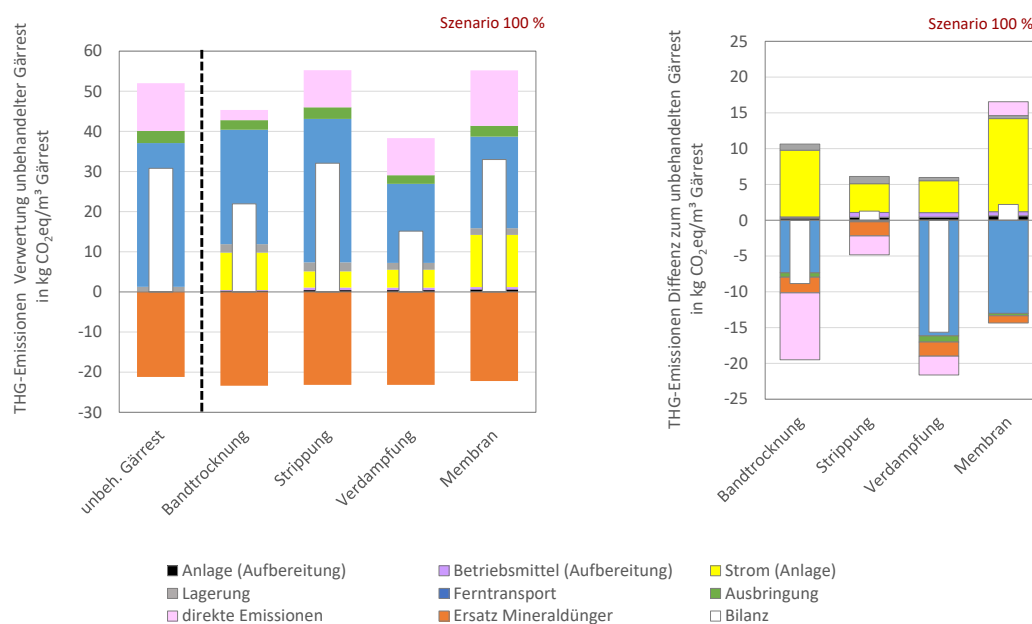


Abbildung 9: Links: Treibhausgasemissionen (THG) für die überregionale Verwertung aller Nährstoffe mit dem unbehandelten Gärrest bzw. den Aufbereitungsprodukten. Rechts: Mehr- bzw. Minderemissionen durch eine zusätzliche Gärrestaufbereitung und -verwertung. Alle Angaben für eine Transportentfernung von 300 km ohne Berücksichtigung des Prozesswärmebedarfs einiger Verfahren.

Wird der Gärrest aufbereitet, entstehen durch die Errichtung der Aufbereitungsanlagen nur geringe Treibhausgasemissionen verglichen mit den anderen Emissionsquellen. Die wichtigste zusätzliche Quelle von Treibhausgasemissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest stellt für alle Aufbereitungsverfahren die Strombereitstellung dar. Dies gilt insbesondere für die Trocknung aufgrund der hier angenommenen stromintensiven Abluftreinigung sowie für die Membranverfahren, die mit hohen Drücken arbeiten. Bei geringeren Überströmgeschwindigkeiten tritt ansonsten vermehrt Fouling/Scaling auf. Analog zu den Kosten werden bei Trocknung, Verdampfung und Membranver-

fahren in hohem Umfang Treibhausgasemissionen aus dem Ferntransport vermieden. Dies gelingt bei der Strippung aufgrund der fehlenden Volumenreduktion nicht.

Auf die direkten Emissionen hat die Aufbereitung sowohl positive als auch negative Effekte (Abbildung 9 rechts): So können gegebenenfalls direkt oder indirekt klimawirksame N-Verluste (N_2O , NH_3) aus der Lagerung und Ausbringung vermieden werden. Denn die Flüssigprodukte aus der Aufbereitung weisen geringere Emissionsfaktoren auf als der Gärrest, sofern dieser nicht gasdicht gelagert wird (Tabelle 4 und Tabelle 5). Im 100%-Szenario, bei dem der gesamte Gärrest offen gelagert wird, überwiegen die so erzielten Einsparungen bei Strippung und Verdampfung die zusätzlichen Emissionen aus der separierten Festphase, die höher sind als aus dem Gärrest. Noch stärker ist der Effekt bei der Trocknung: Für das stabilisierte Trockengut sind bei Lagerung und Ausbringung keine Emissionen mehr anzunehmen. Darüber hinaus werden durch die Abluftreinigung NH_3 -Verluste aus dem Trocknungsprozess weitestgehend vermieden.

Demgegenüber kommt es beim Membranverfahren zu einer Erhöhung der N-Verluste. Dies liegt daran, dass durch die Separierung mit dem Dekanter größere Mengen an Festphase mit entsprechend größeren Mengen an organischem und mineralischem N vorliegen (Abbildung 3). NH_3 - und N_2O -Emissionen aus dem Festprodukt sind daher höher als bei den anderen Verfahren und übersteigen die Einsparungen aus Lagerung und Ausbringung der Flüssigphase. Dies ist vor allem auf das hohe Treibhausgaspotenzial von Lachgas zurückzuführen, wodurch sich zusätzliche N_2O -Emissionen aus der Lagerung überproportional auswirken.

Während durch Trocknung und Verdampfung in der Summe gegenüber der überregionalen Verwertung des gesamten Gärrestanfalls (Szenario 100 %) Treibhausgasemissionen vermieden werden, führen Strippung und Membranverfahren zu Mehremissionen (Abbildung 9 rechts). Auch hier gilt, dass Verbesserungen der Membrantechnologie (BRUESS et al. 2018) unter Umständen zu Vorteilen für diese Verfahren zumindest bei großräumigen Nährstoffüberschüssen und damit verbundenen weiten Transportentfernungen führen könnten.

Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung der Prozesswärme

Die Bilanzsalden der wärmenutzenden Verfahren verschlechtern sich stark, wenn Treibhausgasemissionen für die benötigte Prozesswärme berücksichtigt werden (Abbildung 10 rechts; Referenz Erdgas). Selbst bei der angenommenen großen Transportentfernung von 300 km gelingt unter diesen Voraussetzungen durch keines der betrachteten Verfahren eine Einsparung an Emissionen gegenüber der Verwertung des unbehandelten Gärrests. Denn auch das nicht wärmegebundene Membranverfahren verursacht im Vergleich zum unbehandelten Gärrest mehr Treibhausgasemissionen, zumindest beim gegenwärtigen Stand der Technik. Allerdings könnten die o. g. in Entwicklung befindlichen Verbesserungen dazu führen, dass die Membrantechnik für Anlagen ohne frei verfügbare Wärme als einziges Verfahren eine Einsparung an Treibhausgasen im Vergleich zur überregionalen Gärrestverwertung bewirken könnte, wenn weite Distanzen überwunden werden müssen.

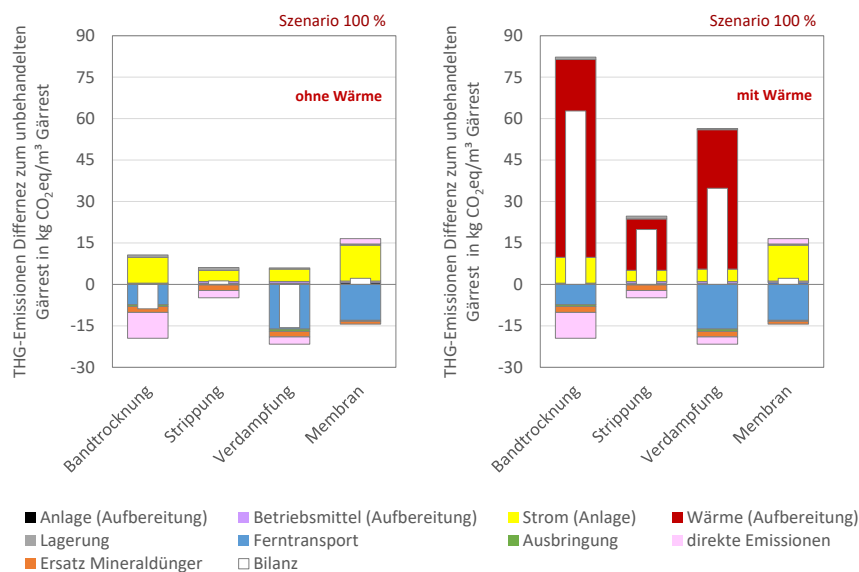


Abbildung 10: Einfluss der Berücksichtigung der Prozesswärme auf die Treibhausgasemissionen (THG) der Gärrestaufbereitung und -verwertung für eine Komplettentfrachtung (Szenario 100 %) bei einer Transportentfernung von 300 km; Darstellung als Differenz zur Verwertung des unbehandelten Gärrests. Links: ohne Berücksichtigung der Prozesswärme für die Aufbereitung, rechts: Darstellung unter Berücksichtigung von Referzemissionen für nicht ersetzte fossile Ressourcen (Erdgas).

Emissionen durch die Verwertung des unbehandelten Gärrests zum Vergleich (= Nulllinie/Referenzwert): 30,8 kg CO₂eq/m³.

Treibhausgasemissionen in Abhängigkeit vom Entfrachtungsziel

In allen drei betrachteten Entfrachtungsszenarien (P50, N50, 100 %) ermöglichen Trocknungsverfahren und Vakuumverdampfung eine Einsparung an Treibhausgasemissionen gegenüber der Verwertung des unbehandelten Gärrests (Abbildung 11). Mit der Strippung gelingt dies erwartungsgemäß nur für die Zielgröße Stickstoff (Abbildung 11 rechts). Beim Membranverfahren liegen die Bilanzsal- den in allen Szenarien über denen der Gärrestverwertung ohne Aufbereitung.

Wie für die Kosten gilt: Sollen nur 50 % des P bzw. 50 % des N überregional verwertet werden, fällt der Effekt der Volumenreduktion durch eine Aufbereitung weniger ins Gewicht. Dafür zeigt sich für einzelne Verfahren der Vorteil einer Aufkonzentration in einzelnen Produkten, wie z.B. in ASL bei Strippung und Verdampfung (Abbildung 11 rechts) oder im Trockengut bei der Bandtrocknung bzw. den Feststoffen beim Membranverfahren (Abbildung 11 Mitte).

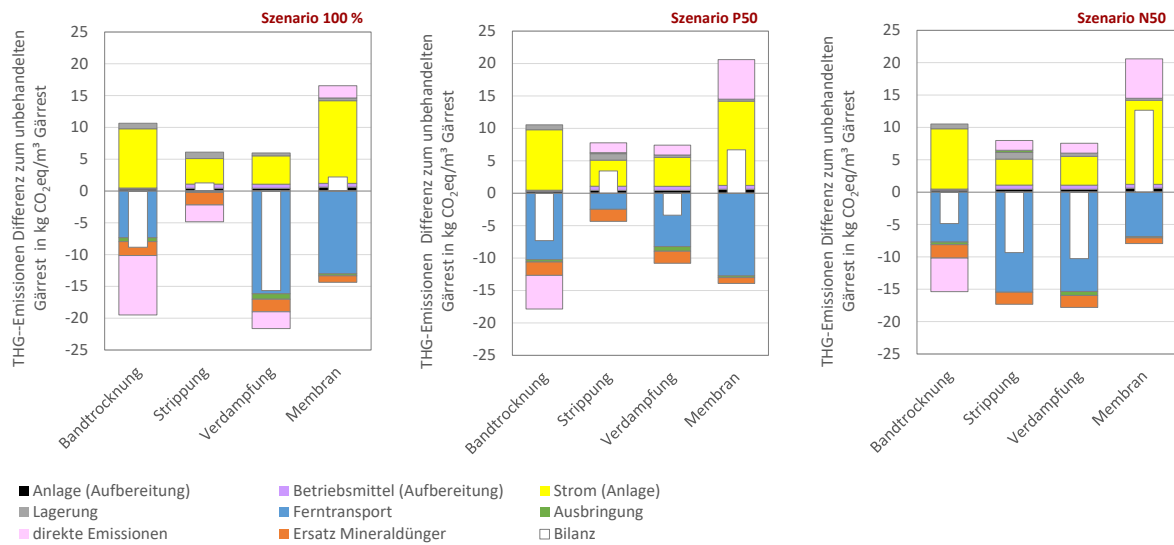


Abbildung 11: Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung im Vergleich zu einer Verwertung des unbehandelten Gärrests in Abhängigkeit vom Entfrachtungsziel ohne Berücksichtigung der Prozesswärme und einer Transportentfernung für den überregional verwerteten Anteil von 300 km. Links: Entfrachtungsziel alle Nährstoffe, Mitte: Entfrachtungsziel 50 % der Phosphorfracht im unbehandelten Gärrest, rechts: Entfrachtungsziel 50 % der Stickstofffracht im unbehandelten Gärrest. Emissionen durch die Verwertung des unbehandelten Gärrests zum Vergleich (= Nulllinie/Referenzwert im jeweiligen Szenario): 100 %: 30,8 kg CO₂eq/m³; P50 und N50: 8,6 kg CO₂eq/m³.

Mit dem Entfrachtungsziel ändert sich auch das Ausmaß der direkten Emissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest. Denn der unbehandelte Gärrest wird in den Szenarien zur Teilentfrachtung (P50, N50) zur Hälfte an der Anlage, also gasdicht, gelagert. Dies führt im Vergleich zum 100%-Szenario zu deutlich geringeren Gesamtemissionen für die Verwertung des unbehandelten Gärrests: Diese sinken von 31 kg auf nur noch 8,6 kg CO₂eq/m³ Gärrest. Dieser Rückgang bei der Gärrestlagerung überwiegt die positiven Effekte der Aufbereitung auf die Emissionen der verschiedenen Flüssigprodukte (Tabelle 4). Im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests können daher im Gegensatz zur Komplettentfrachtung (100 %) durch die Vakuumverdampfung und das Stripverfahren keine direkten Emissionen eingespart werden (Abbildung 11 Mitte (P50) bzw. rechts (N50)). Für das Membranverfahren, wo zugleich hohe Emissionen aus der Festphase anfallen, kommt es für beide Teilentfrachtungsszenarien zu deutlichen direkten Mehremissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest. Lediglich Trocknungsverfahren mit Abluftreinigung weisen auch für eine 50%ige P- oder N-Entfrachtung noch deutliche Vorteile hinsichtlich der direkten Emissionen auf. Im P50-Szenario schneidet die Trocknung in der Summe besser ab als die Vakuumverdampfung, da unter diesen Voraussetzungen zusätzlich höhere Einsparungen beim Transport realisiert werden können.

Alle Verfahren mit ASL-Produktion (Trocknung, Strippung, Verdampfung) erreichen bei einer 50%igen Stickstoffentfrachtung nennenswerte Minderemissionen an Treibhausgasen im Vergleich zum Gärrest (Abbildung 11 rechts). Besonders ausgeprägt ist dies für Strippung und Verdampfung, wo ein Großteil des Stickstoffs aus der Flüssigphase in die ASL überführt wird. Für diese Zielgröße ergeben sich mit dem Membranverfahren die höchsten Treibhausgasemissionen in der Gesamtschau aller Szenarien und Aufbereitungsverfahren im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests. Neben hohen direkten Emissionen ist dies auf geringere Einsparungen beim Transport zurück-

zuführen, bedingt durch eine wenig ausgeprägte Aufkonzentration des Stickstoffs in den einzelnen Aufbereitungsprodukten.

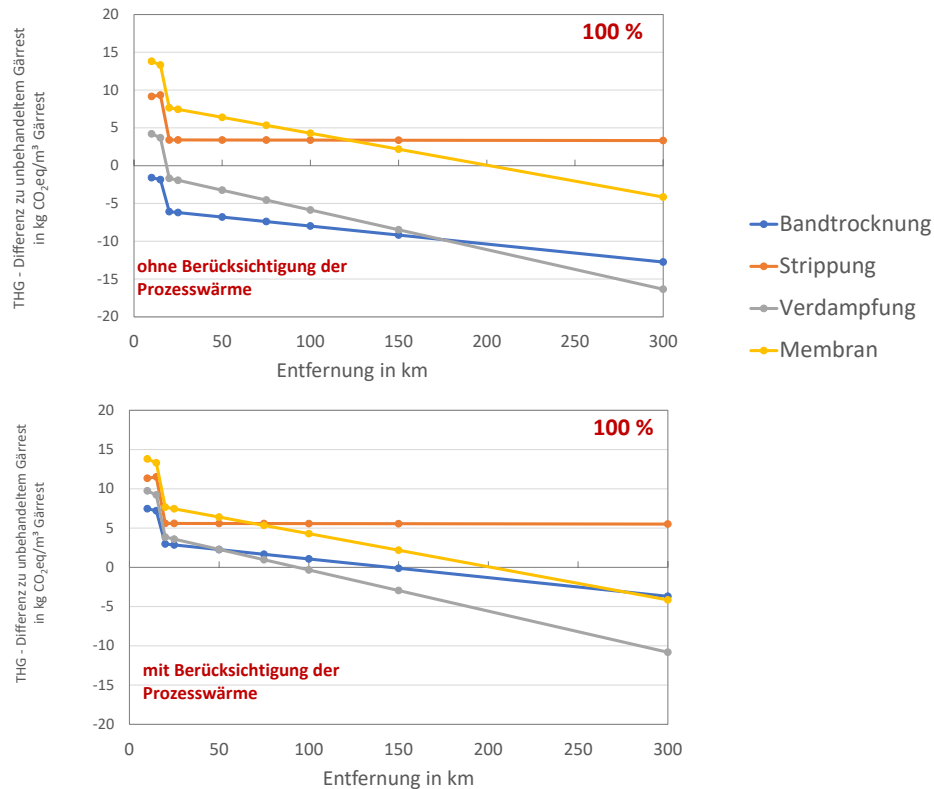
Mineraldüngerersatz

Bei der Treibhausgasbilanzierung wurden auch die Nährstoffe im regional verwerteten Anteil berücksichtigt, während bei den Kostenbetrachtungen davon ausgegangen wurde, dass nur für den überregionalen Anteil Erlöse erzielt werden. Daher können alle Verfahren in sämtlichen Szenarien durch den Mineraldüngerersatz Treibhausgasemissionen gegenüber dem unbehandelten Gärrest einsparen. Dies steht nur auf den ersten Blick im Widerspruch zu teilweise höheren direkten Emissionen. Denn dort wirken sich N_2O -Verluste aus der Lagerung aufgrund des hohen Treibhausgaspotenzials überproportional aus. Für den Mineraldüngerersatz spielt die Form des N-Verlusts jedoch keine Rolle, so dass z. B. beim Membranverfahren hohe Emissionen aus Lagerungsverlusten (NH_3 und N_2O) durch deutlich geringere NH_3 -Verluste bei der Ausbringung der Konzentrate teilweise ausgeglichen werden.

Treibhausgasemissionen in Abhängigkeit von der Transportentfernung

Transportentfernung und Emissionen aus Wärmenutzung

Kürzere Transportentfernungen bewirken auch bei den Treibhausgasen entsprechend geringere Nettoeinsparungen gegenüber der Verwertung des unbehandelten Gärrests. Allerdings können – sofern die Prozesswärme nicht berücksichtigt und eine Komplettentfrachtung angestrebt wird (Abbildung 12 oben) – durch Bandtrocknung und Verdampfung bereits ab 20 km Emissionen vermieden werden, wenn auch zunächst nur in geringem Umfang. Bei den Kosten konnten demgegenüber unter diesen Bedingungen selbst bei 100 km noch mit keinem der betrachteten Verfahren Einsparungen erreicht werden (Abbildung 7).



Treibhausgasemissionen Verwertung unbehandelter Gärrest in kg CO ₂ eq/m ³ Gärrest (= Nulllinie/Referenzwert ohne Aufbereitung)	Transportdistanz in km									
	10	15	20	25	50	75	100	150	300	
	-7,43	-5,86	-1,8	-1,21	1,69	4,6	7,51	13,33	30,79	

Abbildung 12: Treibhausgasemissionen der Gärrestaufbereitung und -verwertung im Vergleich zum unbehandelten Gärrest in Abhängigkeit von der Transportentfernung für eine vollständige überregionale Verwertung (100%-Szenario) ohne (oben) bzw. mit (unten) Berücksichtigung der Prozesswärme.

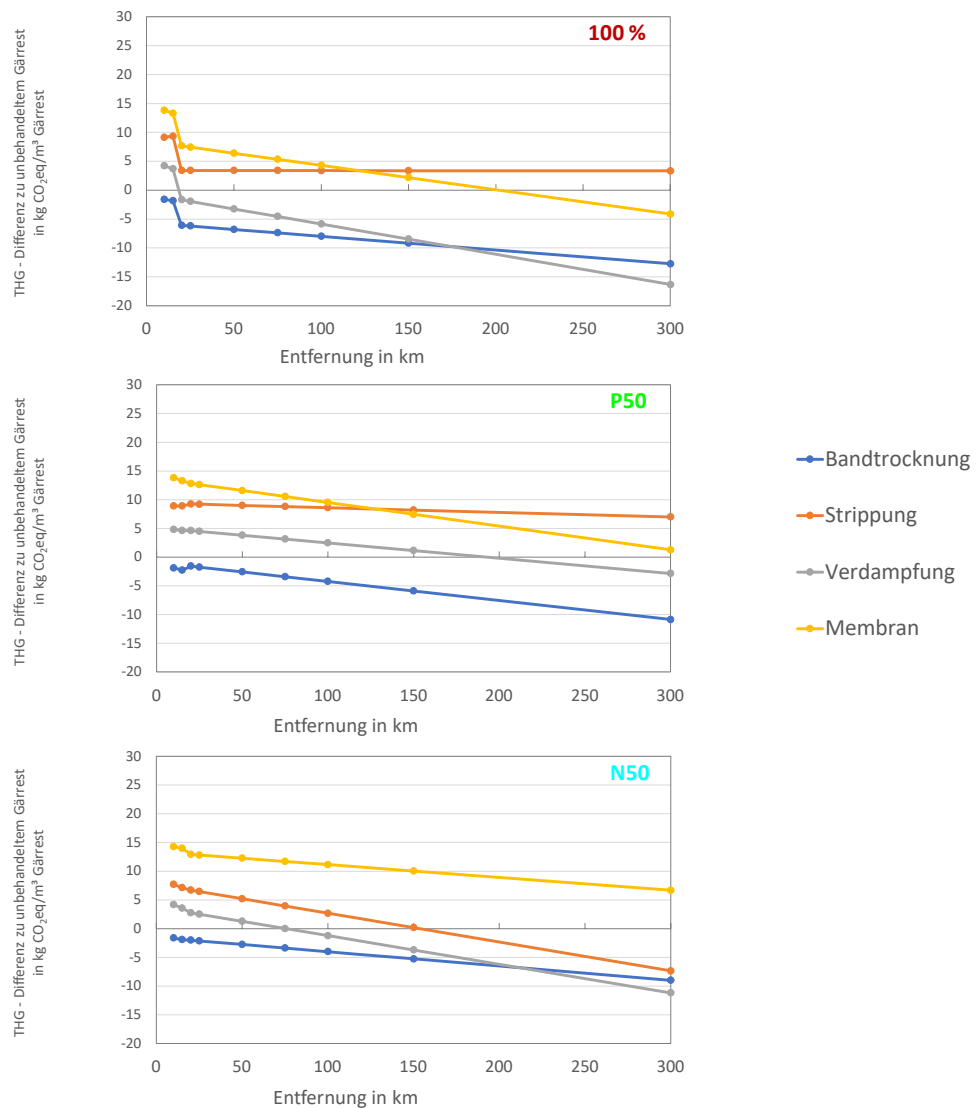
Unter Berücksichtigung von Referenzemissionen für die Prozesswärme steigen die Treibhausgasemissionen der wärmenutzenden Verfahren teilweise um ein Vielfaches (Abbildung 12 unten). Denn es wird davon ausgegangen, dass die für die Aufbereitung benötigte Wärme nicht mehr für andere Nutzungen zur Verfügung steht, die fossile Ressourcen ersetzen würden. Entsprechend hoch ist der Malus, der den wärmenutzenden Verfahren angerechnet wird. Unter diesen Voraussetzungen kann selbst bei einer Entfernung von 300 km keines der Verfahren Treibhausgasemissionen im Vergleich zum unbehandelten Gärrest einsparen. Das lediglich stromgebundene Membranverfahren verursacht jedoch nur geringe Mehremissionen, sodass Effizienzsteigerungen bei diesen Verfahren (BRUESS et al. 2018) für weiträumige Überschussregionen in der Zukunft gegebenenfalls doch Treibhausgaseinsparungen ermöglichen könnten.

Der Sprung in den Emissionen zwischen 15 und 20 km rührt daher, dass ab 20 km von einer Lagerung in der abnehmenden Region ausgegangen wird. Neben der Logistik (einphasig zu absetzig) ändern sich dadurch auch die direkten Emissionen des unbehandelten Gärrests (Lagerung an der Anlage gasdicht; überregionale Lagerung nicht gasdicht). Für die flüssigen Aufbereitungsprodukte liegen die angenommenen Emissionsfaktoren unter denen des offen gelagerten unbehandelten Gärrests

(Tabelle 4). Daher können bei Entfernungen ab 20 km Emissionen aus der Lagerung im Vergleich zum unbehandelten Gärrest eingespart werden.

Transportentfernung und Entfrachtungsziel

Der für das 100%-Szenario oben beschriebene Sprung in den Treibhausgasemissionen zwischen 15 und 20 km Entfernung zeigt sich bei den Teilentfrachtungsszenarien P50 und N50 nicht oder nur wenig ausgeprägt. Dies liegt daran, dass noch immer die Hälfte des Gärrests gasdicht gelagert wird, also durch die Aufbereitung weniger direkte Emissionen eingespart werden können als bei der Komplettentfrachtung (100 %). In diesem Szenario können durch Trocknung und Vakuumverdampfung bereits ab 20 km Treibhausgasemissionen im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests eingespart werden (Abbildung 13 oben). Im P50-Szenario gelingt dies mit der Trocknung erst ab ca. 75 km, mit allen anderen Verfahren erst bei über 150 km Entfernung von der Anlage (Abbildung 13 Mitte). Ist N der Zielnährstoff, so erreichen Trocknung, Strippung und Verdampfung ab ungefähr 100 km Treibhausgasemissionen unter denen der Gärrestverwertung ohne Aufbereitung (Abbildung 13 unten).



	Szenario	Transportdistanz in km								
		10	15	20	25	50	75	100	150	300
Treibhausgasemissionen Verwertung unbehandelte(r) Gärrest in kg CO ₂ eq/m ³ Gärrest (= Nulllinie/Referenzwert ohne Aufbereitung)	100%	-7,43	-5,86	-1,8	-1,21	1,69	4,6	7,51	13,33	30,79
	P50 / N50	-8,98	-8,15	-7,66	-7,37	-5,92	-4,46	-3,01	-0,1	8,63

Abbildung 13: Treibhausgasemission (THG) der Gärrestaufbereitung und -verwertung im Vergleich zum unbehandelten Gärrest in Abhängigkeit von der Transportentfernung und vom Entfrachtungsziel. Oben: Entfrachtungsziel alle Nährstoffe, Mitte: Entfrachtungsziel 50 % der Phosphorfracht im unbehandelten Gärrest, unten: Entfrachtungsziel 50 % der Stickstofffracht im unbehandelten Gärrest. Die benötigte Prozesswärme wurde nicht berücksichtigt.

Vergleich der Ergebnisse zu Kosten- und Treibhausgasereffekten der Aufbereitungsverfahren
 Die Ergebnisse zu Treibhausgasemissionen und Kosten weisen häufig in dieselbe Richtung: So verursachen einige wichtige Einflussfaktoren zugleich Kosten und Emissionen oder tragen in beiden Bereichen zu einer Einsparung bei. Dies gilt vor allem für den Transport von Gärrest und Produkten, bei dem sowohl Kosten als auch Treibhausgasemissionen entstehen und gegebenenfalls durch die Aufbereitung reduziert werden können. Ebenso zeigt sich durch den Energiebedarf der Verfahren kosten- wie emissionsseitig eine deutliche Zunahme, die bei den Treibhausgasen prozentual etwas

stärker ausfällt als bei den Kosten. Nicht immer wirken sich die einzelnen Positionen in gleichem Maße auf die Kosten- bzw. Treibhausgasbetrachtung aus: So machen die Anlagenkosten beim kapitalintensiven Membranverfahren 18 % der Gesamtkosten (100%-Szenario, Wärme nicht berücksichtigt, Nährstoff Erlöse berücksichtigt) aus, die aus der Anlagenerrichtung resultierenden Treibhausgasemissionen aber nur 2 % der Gesamtemissionen (100%-Szenario, Wärme nicht berücksichtigt, Ersatz Mineräldünger berücksichtigt). Auch können im Falle überschüssiger, bisher ungenutzter BHKW-Abwärme an der Biogasanlage durch wärmenutzende Aufbereitungsverfahren wie Bandrockner oder Vakuumverdampfung erhebliche Mehrerlöse aus dem KWK erzielt werden. Bei der Berechnung der Treibhausgasemissionen gibt es dafür keine Entsprechung, da für die zusätzliche Wärmenutzung in diesen Szenarien keine Emissionen gutgeschrieben werden. Für die Treibhausgasemissionen kommen zudem die direkten Emissionen aus Aufbereitungsprozess, Lagerung und Ausbringung als zusätzlicher Faktor hinzu. So geht z. B. der Vorteil bei der Bandrocknung gegenüber dem unbehandelten Gärrest im 100%-Szenario (ohne Wärme) mehr oder minder allein auf die fast vollständige Vermeidung direkter Emissionen zurück (Abbildung 11 links). Demgegenüber sind die direkten Emissionen beim Membranverfahren für zusätzliche Treibhausgasemissionen im Vergleich zur Verwertung des unbehandelten Gärrests verantwortlich, besonders in den betrachteten Teilentfrachtungsszenarien (Abbildung 11 Mitte und rechts).

Insgesamt unterscheidet sich daher die Beurteilung einzelner Verfahren in einigen Szenarien erheblich danach, ob eine Kostenperspektive eingenommen wird oder eine Treibhausgasperspektive. So ist die Vakuumverdampfung bei einer 100%-Entfrachtung bei Vorhandensein von Wärme und damit Erlöspotenzialen durch den KWK-Bonus unter Kostengesichtspunkten bei allen Entfernungen einer Nichtbehandlung der Gärreste vorzuziehen (Abbildung 7 unten). Dagegen entfaltet sie einen positiven Treibhausgaseffekt erst bei einer Transportentfernung zwischen 15 und 20 Kilometer (Abbildung 12 unten). Das Membranverfahren käme zur Minimierung der Kosten im 100%-Entfrachtungsszenario nie zum Einsatz, wohingegen es im Hinblick auf die Emissionen bei mehr als 300 km Entfernung der Nichtbehandlung der Gärreste vorzuziehen ist. Diese Beispiele zeigen, dass es sowohl Synergien als auch Zielkonflikte zwischen Klimaschutz und wirtschaftlicher Optimierung der Anlage geben kann. Dieser Punkt bedarf der Aufmerksamkeit in der Gestaltung der politischen Rahmenbedingungen.

Schlussfolgerungen

Für Regionen mit hohem Entfrachtungsbedarf und dadurch bedingten weiten Transportentfernungen stellt die Gärrestaufbereitung eine Möglichkeit zur Reduzierung der Kosten und auch der Treibhausgasemissionen dar. Je nach Zielgröße und Umfang der Entfrachtung bieten sich unterschiedliche Verfahren an. Allerdings reduziert sich für mittlere und kurze Distanzen der Vorteil der Aufbereitung deutlich. Unter diesen Voraussetzungen führen die meisten Verfahren zu Mehrkosten oder zusätzlichen Emissionen im Vergleich zu einer überregionalen Verwertung des unbehandelten Gärrests.

Werden Kosten oder Emissionen für den Prozesswärmebedarf nicht berücksichtigt und bestehen keine regionalen Verwertungsmöglichkeiten, bieten sich vor allem Bandrocknung in Verbindung mit einer Abluftreinigung und Vakuumverdampfung an. Ist Stickstoff die Zielgröße für eine Entfrachtung, können auch mit dem Stripverfahren für weite Distanzen erhebliche Einsparungen erzielt werden. Mit dem Membranverfahren kann nicht zuletzt aufgrund des hohen Strombedarfs in den meisten Betrachtungen keine Einsparungen erreicht werden, trotz erheblich reduzierter

Transportvolumina. Bei diesem Verfahren, das als einziges keine Wärme benötigt, besteht noch Entwicklungsbedarf hinsichtlich einer verbesserten Energieeffizienz bzw. weniger stromintensiver Alternativen zur Ultrafiltration.

Für den Fall, dass keine Wärme zur Verfügung steht und Kosten bzw. Emissionen für den Wärmebedarf der Verfahren berücksichtigt werden müssen, sind Verfahren mit hohem Wärmebedarf, wie der Bandtrockner oder die Verdampfung, ungeeignet. Kann jedoch ein KWK-Bonus in Anspruch genommen werden, zeigen sich deutliche Kostenvorteile für diese Verfahren.

Allgemeingültige Aussagen zu einzelnen Verfahren lassen sich nicht oder nur eingeschränkt treffen. Die Vorzüglichkeit der einzelnen Verfahren ist abhängig von den regionalen und anlagenindividuellen Rahmenbedingungen, wie

- Zielgröße der Entfrachtung (Nährstoff),
- Entfrachtungsbedarf (Teil- oder Komplettentfrachtung),
- Wärmeverfügbarkeit,
- Anlagengröße,
- Vermarktungsmöglichkeiten für Aufbereitungsprodukte.

Auf die Treibhausgasbilanz des von der betrachteten Anlage produzierten Biogasstroms hat die Aufbereitung nur einen geringen Einfluss, da diese von den Emissionen aus der NawaRo-Bereitstellung sowie dem Betrieb der Biogasanlage (Prozessstrombedarf, CH₄-Verluste etc.) dominiert wird. Lediglich die Anrechnung von Referenzemissionen für Prozesswärme hat einen deutlichen Effekt, weil dadurch die Gutschrift für den Ersatz fossiler Brennstoffe entfällt.

Neben der Energieeffizienz der Verfahren sollte vor allem die Vermeidung von Emissionen aus der Lagerung der an Feststoffen angereicherten Produkte aus der Separierung verbessert werden. Auch eine gezieltere Phosphorabtrennung ist anzustreben. Die gängigen Verfahren erreichen zwar eine Aufkonzentration des Phosphors in einem der Produkte, in denen jedoch noch immer erhebliche Mengen an Stickstoff und Kalium sowie an organischer Substanz vorhanden sind. Daher können z. B. Festprodukte, die eine gute Humuswirkung aufweisen, in Regionen mit einer guten Phosphorversorgung kaum eingesetzt werden. In Ackerbauregionen mit hohem P-Bedarf ist hingegen die Akzeptanz für solche Produkte gering. Der hohe Gehalt an organischem Stickstoff ist für die Nährstoffversorgung der Pflanzen nur schwer zu kalkulieren und muss trotzdem in sanktionsbehafteten Nährstoffbilanzen berücksichtigt werden. Eine Reihe von Pilotvorhaben befasst sich mit der Phosphorabtrennung, allerdings existierten bis vor kurzem nur Anlagen im Technikumsmaßstab. Vor allem in den Niederlanden, aber auch in Deutschland werden zurzeit erste Konzepte verwirklicht (BILBAO et al. 2017, LENTZ und SCHLOTMANN 2018, NIEHUES 2018, RABENER 2018, VERBAND DER LANDWIRTSCHAFTSKAMMERN 2011, WELTEC BIOPOWER 2018), in denen die drei Hauptnährstoffe durch eine Kombination verschiedener Verfahren aufgetrennt und in unterschiedliche Produkte überführt werden. Dies würde eine gezielte und situationsangepasste Verwertung von Nährstoffen in Überschussregionen ermöglichen. Zudem bietet diese Herangehensweise die Möglichkeit, nutzer- und anwendungsspezifische Düngemittel herzustellen, die sich gegebenenfalls zu deutlich höheren Preisen vermarkten lassen. Dadurch könnte die Bewertung der Verfahren wesentlich positiver ausfallen als, wie hier angenommen, bei einer rein landwirtschaftlichen Verwertung, für die von einer eher geringen Zahlungsbereitschaft und der Vergütung lediglich von Teilmengen ausgegangen wurde.

Die in den Berechnungen getroffenen Annahmen bestimmen maßgeblich die Ergebnisse der Treibhausgasbetrachtungen. Dies gilt vor allem für die Lagerung von Gärrest und Aufbereitungspro-

dukten: So stehen derzeit weder wissenschaftlich abgesicherte Emissionsfaktoren für die verschiedenen Produkte noch ausreichend Erfahrungswerte zur wahrscheinlichen Lagerungsform (offen/gasdicht), insbesondere in der aufnehmenden Region, zur Verfügung. Diese Annahmen sollten verifiziert werden.

Literatur

- Bilbao, J.; Campos, A.; Mariakakis, I.; Ehmann, A.; Lewandowski, I.; Daatselaar, C.H.G.; Smeets, E.; Beekman, V.; Hoes, A.C.; Oosterkamp, E. (2017): Manure valorisation - turning a problem into a commodity. Winner - Tolpe Award 2017. Special issue: advances & trends in biogas and biorefineries. *Communications in agricultural and applied biological sciences* 82(4), S. 175–177
- Brueß, U.; Rosenberger, S.; Gienau, Th. (2018): Entwicklung eines energieeffizienten Verfahrens zur vollständigen Aufbereitung von Gärresten aus Biogasanlagen durch die Kombination von Fest/ Flüssig-Separation und Membranverfahren. Abschlussbericht zum Vorhaben Az: 31276, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-31276-01.pdf>, Zugriff am 03.10.2019
- Dahlin, J.; Halbherr, V.; Kurz, P.; Nelles, M.; Herbes, C. (2016): Marketing Green Fertilizers: Insights into Consumer Preferences. *Sustainability* 8(11), p. 1169
- Dahlin, J.; Nelles, M.; Herbes, C. (2017): Biogas digestate management: Evaluating the attitudes and perceptions of German gardeners towards digestate-based soil amendments. *Resources, Conservation and Recycling*, 118, 27-38
- 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/EEA (Hg.) (2016): EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Technical guidance to prepare national emission inventories, Luxembourg, Publications Office of the European Union
- Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (Hg.) (2014): Effiziente energetische Verwertung von Pferdemist durch den Einsatz innovativer Techniken der kontinuierlichen Feststofffermentation und Gärreststabilisierung - Teilvorhaben 1. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben FKZ 22017411, Gülzow
- Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (Hg.) (2017): GÄRWERT - GÄRprodukte ökologisch optimiert und WERTorientiert aufbereiten und vermarkten. Abschlussbericht zum Abschlussbericht zum Verbundvorhaben FKZ 22402312, 22401913, 22402113, 22402213. <https://www.fnr.de/index.php?id=11150&fkz=22402312>, Zugriff am 03.10.2019
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and other Land Use
- Janßen-Minsen, F. (2015): Ressourcen schützen – Kreisläufe schließen: Neue Herausforderung für die Nährstoffkreislaufwirtschaft Vortrag anlässlich des Pflanzenschutz- und Düngemittelhandelstages am 04.11.2015. <https://www.bv-agrar.de/sites/default/files/pdf/handelstage/VortragBurgWarbergNovember2015.pdf>, Zugriff am 03.04.2020
- Janßen-Minsen, F. (2016): Möglichkeiten zur Erzielung nachhaltiger Nährstoffhaushalte in Regionen mit hohem Anfall organischer Dünger. In: VDLUFA (Hg.) (2016): Anforderungen an die Verwertung von Reststoffen in der Landwirtschaft. Kongressband zum 128. VDLUFA-Kongress vom 13.-16. September 2016 in Rostock. VDLUFA-Schriftenreihe Band 73/2016, VDLUFA-Verlag, Darmstadt, S. 53-56
- KTBL (2015): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. KTBL-Heft 107, Darmstadt, 3. Auflage
- KTBL (Hg.) (2016a): Betriebsplanung Landwirtschaft 2016/17. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft, Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 25. Aufl.
- KTBL (2016b): Berechnungsparameter Klimagasbilanzierung (BEK), Webanwendung; <https://daten.ktbl.de/bek/#start>, Zugriff am 11.02.2020
- Lentz, K.-H.; Schlotmann, G. (2018): Projektierung von HyGas-Anlagen zur Aufbereitung und Verwertung organischer Nährstoffe. 13. Fachgespräch Biogas der Biogasunion e.V., 30.5.2018, Soltau. <https://www.biogasunion.de/mitgliedschaft/login/vortr%C3%A4ge-2018/>, Zugriff am 06.12.2018

- 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(2), S. 307–325, <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9340-1>
- Niehues, M. (2018): Kreislandvolk präsentiert Gülle-Lösungen. Vier Unternehmen zeigen, wie die Aufbereitung von Nährstoffen gelingt/ Neue Terminbörse soll Exporte sichern. *Oldenburgische Volkszeitung* vom 23.02.2018
- Osterburg, B.; Klages, S.; Schüler, M. (2016): Auswirkungen der Novelle der Düngeverordnung auf die Kompostanwendung in der Landwirtschaft. Endbericht für ein Forschungsprojekt im Auftrag des Verbands der Humus- und Erdenwirtschaft e.V. (VHE) und der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK). Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, zuletzt geprüft am 13.03.2017
- Rabener, M. (2018): Gülleaufbereitung mit dem Membran-Filtrationssystem MemFis. *Wirtschaftsdünger 2.0*, Veranstaltung des Kreisland-Volkverbands Vechta, 22.2.2018. <http://www.klv-vechta.de/images/stories/MemFis-DE-kurz-180222.pdf>, Zugriff am 06.12.2018
- Rösemann, C.; Haenel, H.-D.; Dämmgen, U.; Freibauer, A.; Döring, U.; Wulf, S.; Eurich-Menden, B.; Döhler, H.; Schreiner, C.; Osterburg, B. (2017): Calculations of Emissions from German Agriculture 1990-2015. Report on methods and data (RMD) Submission 2017. Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2015. Report zu Methoden und Daten (RMD) Berichterstattung 2017, Braunschweig
- Umweltbundesamt (UBA) 2017): Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement – ProBas-Datenbank. <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>, Zugriff am 05.04.2017
- Umweltbundesamt (UBA) (2019): Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen. Wie viel CO₂ verursacht eine Kilowattstunde Strom? https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/styles/800w400h/public/medien/376/bilder/entwicklung_der_spezifischen_kohlendioxid-emissionen_des_deutschen_strommix_1990-2017_tabelle.png, Zugriff am 15.05.2019
- Verband der Landwirtschaftskammern (2011): Berechnungsgrundlagen für die Ermittlung von Schäden an landwirtschaftlichen und gärtnerischen Kulturen und Grundstücken, Berlin, 5. Aufl.
- Weltec Biopower (2018): Fachforum Gülle- und Gärrestaufbereitung. <https://www.umweltwirtschaft.com/news/wasser-und-abwasserbehandlung/Weltec-Fachforum-Guelle-und-Gaerrestaufbereitung-10867>, Zugriff am 06.12.2018

Autoren

Ursula Roth ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und **Dr. Sebastian Wulf** ist wissenschaftlicher Leiter des Arbeitsschwerpunkts Emissionen und Klimaschutz am KTBL e.V., Bartningstraße 49, 64289 Darmstadt.
E-Mail: u.roth@ktbl.de

Maximilian Fechter ist ehemaliger wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Verfahrenstechnik der Technischen Universität Berlin, Ackerstraße 76, 13355 Berlin

Prof. Dr. Carsten Herbes ist geschäftsführender Direktor und **Dr. Johannes Dahlin** ist ehemaliger wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institute for International Research on Sustainable Management and Renewable Energy (ISR) der Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen, Neckarsteige 6-10, 72622 Nürtingen

Hinweise/Danksagungen

Die Forschungsarbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes GÄRWERT (FKZ 22401913, 22402113, 22402213, 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.