

Schlussbericht

zum Verbundvorhaben

Thema:

**DEMETHA - De-Methanisierung von Flüssigmist -
Intelligente Energieversorgung im ländlichen Raum
durch flexible Energiebereitstellung mit
Güllekleinanlagen**

Zuwendungsempfänger:

**Teilvorhaben 1: Koordination, technische Grundlagen
und Umweltwirkung**

**Teilvorhaben 2: Potenziale, rechtliche Grundlagen und
Anpassung an Praxisbetriebe**

**Teilvorhaben 3: Verfahrenstechnische Planung und
Kostenschätzung**

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 2219NR130

Teilvorhaben 2: 2219NR446

Teilvorhaben 3: 2219NR458

Laufzeit:

01.09.2020 bis 31.08.2021

Monat der Erstellung:

11/2021

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.

Projekt- und Ansprechpartner

Verbundkoordination:

Universität Hohenheim
Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie

PD Dr. Andreas Lemmer

Garbenstr. 9

70599 Stuttgart

Tel.: +49 (0) 711 459-22684

mailto: andreas.lemmer@uni-hohenheim.de

Jörg Steinbrenner

Tel.: +49 (0) 711 459-22856

mailto: joerg.steinbrenner@uni-hohenheim.de

Industriepartner 1:

Hochland Natec GmbH

Thomas Niemann (Geschäftsführer)

Kolpingstr. 32

88178 Heimenkirch

Tel.: +49 (0) 8381 502-400

mailto: thomas.niemann@natec-network.com

Curtis Shoemaker

Tel.: +49 (0) 8381 502-597

mailto: curtis.shoemaker@natec-network.com

Industriepartner 2:

renergie Allgäu e.V.

Florian Weh (Geschäftsführer)

Adenauerring 97

87439 Kempten

Tel.: +49 (0) 831 5262680-14

mailto: fw@renergie-allgaeu.de

Alexander Lehr

Tel.: +49 (0) 831 5262680-18

mailto: al@renergie-allgaeu.de

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	IV
1. ZIELE DES VORHABENS	1
1.1. PROJEKTHINTERGRUND.....	1
1.2. GESAMTZIELE DES VORHABENS	2
1.3. BEZUG DES VORHABENS ZU DEN FÖRDERPOLITISCHEN ZIELEN.....	3
1.4. WISSENSCHAFTLICHE UND/ODER TECHNISCHE ARBEITZIELE DES VORHABENS	4
2. STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK	7
2.1. STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK.....	7
2.1.1. <i>Kleinbiogasanlagen in der landwirtschaftlichen Praxis</i>	7
2.1.2. <i>Weiterentwicklung der Anlagentechnik in der Forschung</i>	9
2.1.3. <i>Neuheiten des Ansatzes gegenüber dem Stand der Technik</i>	11
2.1.4. <i>Treibhausgasemissionen und Minderungspotenziale</i>	11
3. KURZBESCHREIBUNG DER PROJEKTPARTNER	14
3.1. LANDESANSTALT FÜR AGRARTECHNIK UND BIOENERGIE	14
3.2. HOCHLAND NATEC GMBH	14
3.3. RENERGIE ALLGÄU E.V.....	15
4. MATERIAL UND METHODEN	16
4.1. BASIC-ENGINEERING	16
4.2. ERMITTLUNG DES TECHNISCH NUTZBAREN ROHSTOFFPOTENTIALS.....	16
4.3. WIRTSCHAFTLICHE UND TECHNISCHE ANALYSE DER GÜLLEVERGÄRUNG IN ZWEISTUFIGEN KLEINANLAGEN	20
4.4. ÖKOLOGISCHE ANALYSE UND BESTIMMUNG DES TREIBHAUSGASMINDERUNGSPOTENTIALS	20
4.5. VORAUSWAHL DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN BETRIEBE.....	21
5. ERGEBNISSE.....	22
5.1. LANDWIRTSCHAFTLICHE BETRIEBSSTRUKTUREN UND ROHSTOFFPOTENTIAL ZUR GÜLLEVERGÄRUNG	22
5.1.1. <i>Tierhaltende Betriebe in Deutschland</i>	22
5.1.2. <i>Betriebsgrößenstruktur in Deutschland nach Tierbestand in Großvieheinheiten</i>	26
5.1.3. <i>Ermittlung des Rohstoff- / Güllepotentials in Deutschland</i>	28
5.1.4. <i>Beschreibung des landwirtschaftlichen Modellbetrieb als Planungsgrundlage zur zweistufigen Güllevergärung</i>	30
5.2. AUSLEGUNG UND TECHNISCHE BESCHREIBUNG DER DEMETHA-ANLAGE	32
5.2.1. <i>Ausgangsubstrate und Massenbilanz</i>	32
5.2.2. <i>Fermenter 1: CSTR</i>	34
5.2.3. <i>Fermenter 2: Anaerobfilter</i>	39
5.2.4. <i>Gasspeicher</i>	42
5.2.5. <i>Technische Beschreibung der Gesamtanlage</i>	44
5.3. TECHNISCHE ANALYSE DER GÜLLEVERGÄRUNG IN ZWEISTUFIGEN KLEINANLAGEN	48
5.3.1. <i>Strom und Wärmebilanz</i>	48
5.3.2. <i>Gesamtkonzept „Energie und Effizienz“</i>	49
5.4. WIRTSCHAFTLICHKEIT DER GÜLLEVERGÄRUNG IN ZWEISTUFIGEN KLEINANLAGEN.....	50
5.4.1. <i>Investitionskosten</i>	50
5.4.2. <i>Betriebskosten</i>	55
5.4.3. <i>Einnahmen aus Strom und Wärmeverkauf</i>	55
5.4.4. <i>Zusammenfassung und Vergleich der Kosten und Erträge</i>	56
5.4.5. <i>Marktanalyse und Vermarktungsstrategie</i>	60
5.5. TREIBHAUSGASMINDERUNGSPOTENTIAL UND SPEZIFISCHE KOSTEN.....	61

5.6.	AUSWAHL GEEIGNETER BEISPIELBETRIEBE ZUR ERPROBUNG DER PILOTANLAGE	65
5.6.1.	<i>Betriebsstandort 1</i>	65
5.6.2.	<i>Betriebsstandort 2</i>	68
5.6.3.	<i>Betriebsstandort 3</i>	71
5.7.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	74
LITERATURVERZEICHNIS		VI

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: METHODE DER BERECHNUNG DER TREIBHAUSGASEMISSIONEN (EU-RICHTLINIE 2018/2001)	13
ABBILDUNG 2 VEREINFACHTES SCHEMA DES ERSTEN FERMENTERS DER 2-STUFIGEN PILOTANLAGE MIT HORIZONTALER RÜHRWERK	35
ABBILDUNG 3: VARIANTE LIEGEND MIT 4X STEHENDEN RÜHRWERKEN NACH DEM PETERS SYSTEM.	38
ABBILDUNG 4: VARIANTE LIEGEND MIT 2X STABMIXERN, EINBAU ÜBER WAND UND DECKE MÖGLICH.	38
ABBILDUNG 5 FERMENTER 2 DER ZWEISTUFIGEN ANLAGE ZUR GÜLLEVERGÄRUNG, AUSFÜHRUNG ALS FESTBETTREAKTOR MIT FÜLLKÖRPERSCHÜTTUNG.	40
ABBILDUNG 6 FÜLLKÖRPER „BIOFLOW“ (RVT PROCESS EQUIPMENT GMBH).	41
ABBILDUNG 7 FUNDAMENT EXTERNER GASSPEICHER (BAUR FOLIEN GMBH)	44
ABBILDUNG 8 AUFGEBAUTER EXTERNER GASSPEICHER (BAUR FOLIEN GMBH)	44
ABBILDUNG 9 ROHRLEITUNGS- UND INSTRUMENTENFLIEßBILD DER ZWEISTUFIGEN ANLAGE ZUR GÜLLEVERGÄRUNG	47
ABBILDUNG 10 WÄRMEPRODUKTION UND EIGENWÄRMEBEDARF MIT THEORETISCHEM WÄRMEÜBERSCHUSS SOWOHL MIT ALS AUCH OHNE WÄRMERÜCKGEWINNUNG IM JAHRESVERLAUF.	49

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: TYPISCHE WERTE FÜR DIE MINDERUNG VON TREIBHAUSGASEN BEI DER NUTZUNG VON BIOGAS FÜR DIE ELEKTRIZITÄTSERZEUGUNG (EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT 11.12.2018).	13
TABELLE 2: LANDWIRTSCHAFTLICHE BETRIEBE MIT RINDERHALTUNG UND RINDERBESTAND AM 1. MÄRZ 2016 NACH GRÖßENKLASSEN DER LANDWIRTSCHAFTLICH GENUTZTEN FLÄCHE UND DER GROßVIEHEINHEITEN (STATISTISCHES BUNDESAMT 2016).	18
TABELLE 3: LANDWIRTSCHAFTLICHE BETRIEBE MIT SCHWEINEHALTUNG UND SCHWEINEBESTAND AM 1. MÄRZ 2016 NACH GRÖßENKLASSEN DER LANDWIRTSCHAFTLICH GENUTZTEN FLÄCHE UND DER GROßVIEHEINHEITEN (STATISTISCHES BUNDESAMT 2016).	18
TABELLE 4: LANDWIRTSCHAFTLICHE BETRIEBE MIT HALTUNG VON MILCHKÜHEN UND BESTAND AN MILCHKÜHEN AM 1. MÄRZ 2016 NACH GRÖßENKLASSEN DER LANDWIRTSCHAFTLICH GENUTZTEN FLÄCHE UND DER GROßVIEHEINHEITEN (STATISTISCHES BUNDESAMT 2016).	19
TABELLE 5: ANZAHL AN TIERHALTUNGEN NACH TIERART IM JAHR 2018 UND 2019.	23
TABELLE 6 BETRIEBE MIT VIEHHALTUNG IN DEUTSCHLAND UND DEN BUNDESLÄNDERN AUFGETEILT IN BETRIEBSGRÖßENKLASSEN	24
TABELLE 7 BETRIEBE MIT RINDERHALTUNG IN DEUTSCHLAND UND DEN BUNDESLÄNDERN AUFGETEILT IN BETRIEBSGRÖßENKLASSEN	24
TABELLE 8 BETRIEBE MIT SCHWEINEHALTUNG IN DEUTSCHLAND UND DEN BUNDESLÄNDERN AUFGETEILT IN BETRIEBSGRÖßENKLASSEN	25
TABELLE 9 BETRIEBE MIT MILCHVIEHHALTUNG IN DEUTSCHLAND UND DEN BUNDESLÄNDERN AUFGETEILT IN BETRIEBSGRÖßENKLASSEN	25
TABELLE 10 ANZAHL AN RINDERN IN DEUTSCHLAND UNTERTEILT IN BETRIEBSGRÖßENKLASSEN UND DARGESTELLT IN GROßVIEHEINHEITEN (GV).	27
TABELLE 11 ANZAHL AN SCHWEINEN IN DEUTSCHLAND UNTERTEILT IN BETRIEBSGRÖßENKLASSEN UND DARGESTELLT IN GROßVIEHEINHEITEN (GV).	27
TABELLE 12 ANZAHL AN MILCHVIEH IN DEUTSCHLAND UNTERTEILT IN BETRIEBSGRÖßENKLASSEN UND DARGESTELLT IN GROßVIEHEINHEITEN (GV).	28
TABELLE 13 FLÜSSIGMISTANFALL IN DER RINDERHALTUNG NACH BUNDESLAND UND BETRIEBSGRÖßENKLASSEN.	29
TABELLE 14 FLÜSSIGMISTANFALL IN DER SCHWEINEHALTUNG NACH BUNDESLAND UND BETRIEBSGRÖßENKLASSE.	29
TABELLE 15 FLÜSSIGMISTANFALL IN DER MILCHVIEHHALTUNG NACH BUNDESLAND UND BETRIEBSGRÖßENKLASSE.	30
TABELLE 16 KALKULATION DES FLÜSSIGMISTANFALL DES LANDWIRTSCHAFTLICHEN MODELLBETRIEBS ALS WEITERE PLANUNGSGRUNDLAGE ZUR AUSLEGUNG DER ZWEISTUFIGEN ANLAGE ZUR GÜLLEVERGÄRUNG.	31
TABELLE 17 BIOGAS POTENTIAL UND GÄRRESTANFALL DER ZWEISTUFIGEN DEMETHA-ANLAGE	32
TABELLE 18 RAUMPLANUNG DER ZWEISTUFIGEN ANLAGEN ZU GÜLLEVERGÄRUNG.	33
TABELLE 19 RAUMPLANUNG FERMENTER 2	34
TABELLE 20 TECHNISCHE DATEN VON FERMENTER 1 IN DER HORIZONTALEN VARIANTE MIT DURCHGEHENDEM HORIZONTALER RÜHRWERK	37
TABELLE 21 AUFLISTUNG UNTERSCHIEDLICHER AUSFÜHRUNGEN UND ANGEBOTE FÜR EINEN GASSPEICHER ZUR FLEXIBLEN BEREITSTELLUNG VON STROM DURCH DIE ZWEISTUFIGE DEMETHA-ANLAGE.	43
TABELLE 22 AUSLEGUNG BHKW EINSCHLIEßLICH STROM- UND WÄRMEERTRAG.	48
TABELLE 23 INVESTITIONSKOSTENAUFSTELLUNG DER ZWEISTUFIGEN BIOGASPILOTANLAGE.	50
TABELLE 24 OPTIMIERTE INVESTITIONSKOSTENKALKULATION DER ZWEISTUFIGEN BIOGASPILOTANLAGE.	52
TABELLE 25 VERGLEICH DER INVESTITIONSKOSTEN DES KONZEPTS DER ZWEISTUFIGEN BIOGASPILOTANLAGE ZUR GÜLLEVERGÄRUNG MIT EINEM KLASSISCHEN VERFAHRENSKONZEPT.	54
TABELLE 26 ÜBERSICHT DER KENNWERTE DER DEMETHA-ANLAGE UND VERGLEICH MIT ZWEI GÜLLEKLEINANLAGEN (75kW) ALS MODELLANLAGEN MIT REINER GÜLLE-/FESTMISTVERGÄRUNG (MODELL II), MIT EINEM GÜLLE UND MAISSILAGE SUBSTRATMIX (MODEL I) UND EINER FLEXIBEL BETRIEBENEN ANLAGE MIT EINEM GÜLLE/MAISSILAGE SUBSTRATMIX UND EINER BEMESSUNGSLEISTUNG VON 500kW (MODELL III).	57
TABELLE 27 ÜBERSICHT DER KOSTEN UND ERTRÄGE DER DEMETHA-ANLAGE UND VERGLEICH MIT MODELLANLAGEN DES KTBL BESTEHEND AUS ZWEI GÜLLEKLEINANLAGEN (75kW) MIT REINER GÜLLE-/FESTMISTVERGÄRUNG (MODELL II), MIT EINEM GÜLLE UND MAISSILAGE SUBSTRATMIX (MODEL I) UND EINER FLEXIBEL BETRIEBENEN ANLAGE MIT EINEM GÜLLE/MAISSILAGE SUBSTRATMIX UND EINER BEMESSUNGSLEISTUNG VON 500kW (MODELL III).	58
TABELLE 28 THEORETISCHES THG-MINDERUNGSPOTENTIAL DES TECHNISCH NUTZBAREN ROHSTOFFPOTENTIALS AUS GÜLLE DER MILCHVIEHHALTUNG IN DEUTSCHLAND.	62

TABELLE 29 THEORETISCHES THG-MINDERUNGSPOTENTIAL DES TECHNISCH NUTZBAREN ROHSTOFFPOTENTIALS AUS SCHWEINEGÜLLE IN DEUTSCHLAND.....	63
TABELLE 30 THEORETISCHES THG-MINDERUNGSPOTENTIAL DES TECHNISCH NUTZBAREN ROHSTOFFPOTENTIALS AUS RINDERGÜLLE IN DEUTSCHLAND.....	63
TABELLE 31 THEORETISCHES THG-MINDERUNGSPOTENTIAL DES TECHNISCH NUTZBAREN ROHSTOFFPOTENTIALS DES FLÜSSIGMISTANFALLS AUS SCHWEINEGÜLLE IN DEUTSCHLAND.	64

1. Ziele des Vorhabens

1.1. Projekthintergrund

Die Angaben zu den jährlich in Deutschland anfallenden Flüssig- und Festmismengen variieren in einem gewissen Bereich. Für das Jahr 2009 wurde ein Gesamtanfall von Wirtschaftsdünger aus der Rinder- und Schweinehaltung von 152 Mio. t berechnet (Schultheiß et al. 2010). Das Statistische Bundesamt weist für 2015 einen Gesamtbestand an landwirtschaftlich gehaltenen Großvieheinheiten von 13,09 Mio. aus, darunter 12,4 Mio. Rinder und 28,7 Mio. Schweine (Tierzahlen) (Statistisches Bundesamt 2016), woraus bei einem durchschnittlichen Wirtschaftsdüngeranfall von $18\text{m}^3/(\text{GV}\cdot\text{a})$ eine Gesamtmenge von 234 Mio. m^3/a Wirtschaftsdünger resultiert. Die energetische Nutzung von 80% der anfallenden Gülle entspricht ca. 2,2 Mrd. m^3 Methan mit einem Energiegehalt von ca. 78 PJ (Achilles et al. 2018). Durch die Umwandlung des Methans in elektrische und thermische Energie könnten ca. 2,6 Mio. Haushalte mit Strom versorgt werden. Bisher sind erst etwa 35 % dieses Potenzials erschlossen (Majer et al. 2019). Zusätzlich weist die Güllevergärung viele ökologische Vorteile auf – auch und insbesondere gegenüber der Nutzung von Energiepflanzen. Insofern spielt die Erschließung noch ungenutzter Güllepotenziale eine besonders wichtige Rolle.

In Deutschland ist die Landwirtschaft für über 59 % der Methan- und 95 % der Ammoniakemissionen verantwortlich (Umweltbundesamt 2021a). Methan hat ein um etwa 28-mal höheres langfristiges Treibhauspotenzial als CO_2 (IPPC). Zusätzlich ist es eine Vorläufersubstanz bei der Bildung von bodennahem Ozon, das Pflanzen schädigt, indirekt zum Klimawandel beitragen kann und zusätzlich zu Beeinträchtigungen der menschlichen Gesundheit führt. Die wichtigsten Quellen von Methan sind Emissionen während des tierischen Verdauungsprozesses von Wiederkäuern und Emissionen durch die Lagerung von Festmist und Gülle.

Menge und Verteilung der Gülle sind dabei von Bedeutung. So fällt Gülle zwar flächendeckend an, allerdings häufig nur in Mengen die eine wirtschaftliche Biogasproduktion bisher nicht zulassen. So halten derzeit nur 2,8% der Milchviehbetriebe Deutschlands mehr als 200 Kühe. Diese Betriebe halten nur 20,4 % der 4,2 Mio. Milchkühe Deutschlands (Statistisches Bundesamt 2013). Einer der Gründe, warum nicht mehr Gülle zur Biogasproduktion eingesetzt wird, liegt darin, dass selbst in den Regionen mit hohen Viehdichten örtlich zu geringe Güllemengen anfallen. Da Gülle etwa 90 % Wasser enthält, sind bisher sehr große Substratmengen notwendig, um wirtschaftliche Anlagengrößen zu erreichen. So kann eine Anlage von 100 kW bei einem vorwiegenden Gülleeinsatz bereits

die Flüssigmistmengen von 700 Rindern oder 4.500 Schweinen verarbeiten (BMU 2008). Solche Betriebe gibt es in Deutschland weniger häufig. Die sehr großen Viehbetriebe in den Neuen Bundesländern betreiben dagegen bereits häufig Biogasanlagen.

Neben Flüssigmist fallen auf Milchviehbetrieben selbst bei einstreulosen Haltungssystemen weitere Reststoffe an, die in Biogasanlagen verwertet werden können. Selbst unter optimalen Silierbedingungen fallen geringe Mengen an Silage einer minderen Qualität an, die als Siloabraum entsorgt werden, da sie zur Fütterung der Milchkühe nicht geeignet sind. Ebenso verbleiben Futterrest im Trog, die vor einer erneuten Futtervorlage zu entfernen sind. Bei einer durchschnittlichen Futteraufnahme von 18,7 kg Trockenmasse je Milchkuh und Tag (Gruber et al. 2006) kann insgesamt von einem Anfall an Futterverlusten von 5-20% der Futtervorlage bei einem Mittelwert von 10% (Grobfutter) bzw. von 2-15% bei einem Mittelwert von 5% (Krafftfutter) ausgegangen werden (KTBL 2018). Im Abkalbungsbereich sowie in der Kälberaufzucht fallen auf Milchviehbetrieben, selbst bei einstreulosen Haltungssystemen der Kühe, erhebliche Mengen an Festmist an, die für eine Verwertung in Biogasanlagen geeignet sind. So ist beispielsweise in der Kälberhaltung von einem Einstreubedarf von 0,5 bis 2 kg Stroh je Tierplatz und Tag auszugehen, die zur Bildung von Festmist führen (KTBL 2018).

1.2. Gesamtziele des Vorhabens

Zielsetzung des Projektes war die Entwicklung hochgradig standardisierter Güllekleinanlagen für landwirtschaftliche Betriebe mit einem Tierbestand ab ca. 150 Großvieheinheiten (GV). Diese Güllekleinanlagen beruhen auf dem Konzept der Hohenheimer zweistufigen Güllevergärung, bestehend aus einem Rührkessel- und einem Festbettreaktor mit einer Rückführung nicht abgebauter Faserstoffe zwischen den beiden Prozessstufen. Diese standardisierten Anlagen bieten ein sehr großes Übertragungspotenzial auf eine Vielzahl von landwirtschaftlichen Betrieben, nicht nur in Deutschland. Diese Anlagen können dezentral Strom und Wärme mit hohen Nutzungsgraden bereitstellen. Die Integration eines Festbettreaktors in das Gesamtkonzept ermöglicht durch dessen hohe Prozessstabilität und Lastflexibilität eine Biogasproduktion, die jederzeit exakt dem Bedarf angepasst werden kann. Zudem soll das BHKW der Anlagen auf eine durchschnittliche Laufzeit von ca. 14 Stunden je Tag ausgelegt werden, so dass Strom und Wärme zu den Bedarfszeiten produziert werden kann.

Gleichzeitig werden die Treibhausgasemissionen aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung erheblich gesenkt und sowohl Geruchs- als auch Ammoniakemissionen durch die

Ausbringung der Gärreste im Vergleich zur Ausbringung von Flüssigmist erheblich reduziert.

Neben der ausschließlichen Verwertung von Flüssigmist wurde auch die zusätzliche Verwertung von Festmist aus Kalbungs- und Kälberbereich sowie die Verwertung von Futterresten und Siloabraum unter wirtschaftlichen und technischen Aspekten betrachtet.

Die flexible Energiebereitstellung mit den innovativen Güllekleinanlagen verbindet damit in einzigartiger Weise folgende Aspekte:

- Dezentrale Bereitstellung von Strom und Wärme
- Intelligente Stabilisierung der Stromnetze durch bedarfsgerechte Biogasproduktion in Kombination mit einem lastflexiblen Betrieb der BHKW
- Hohe Ausfallsicherheit der Stromerzeugung durch große Zahl der Anlagen
- Erschließen von nicht genutzten Rohstoffpotenzialen zur Energieproduktion; d.h. Flüssigmist aus kleineren Tierbeständen
- Hochgradig standardisierte Anlagenkonzepte mit einer Aufstellung auf einer Betonplatte mit Aufkantung, so dass Umwelt- und Betriebssicherheit in beispielhafter Weise gewährleistet werden
- Absolut standardisierte Bausatzlösungen, so dass die Montagekosten erheblich reduziert werden können und Eigenleistungen der Landwirte ermöglicht werden
- Erhebliche Senkung der Treibhausgasemissionen aus der Tierhaltung
- Reduzierung der Geruchsemissionen bei der Gülleausbringung; dadurch Förderung des Fremdenverkehrs im ländlichen Raum
- Steigerung der Akzeptanz der Tierhaltung und der Bioenergieerzeugung in der Bevölkerung

1.3. Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Der Förderaufruf verfolgt das Ziel, intelligente und zukunftsorientierte Energieversorgungskonzepte im ländlichen Raum mit Bioenergie als zentralem Baustein in der Praxis zu erproben, zu analysieren und zu validieren. Bestandteil dieser Konzepte ist die Einbindung von Bioenergieanlagen und die Nutzung regional vorhandener biogener Ressourcen. Die zu fördernden Vorhaben sollen der Etablierung und Sicherung von Einkommensmöglichkeiten für die Land- und Forstwirtschaft und einer sicheren, bezahlbaren und gesellschaftlich akzeptierten Energieversorgung in ländlichen Regionen dienen. Im Projekt „DeMetha“ sollen dazu neue Technologien erprobt und implementiert werden und neue, dezentrale Verfahren der flexiblen Strom- und Wärmebereitstellung entwickelt und erprobt werden, so dass dezentral eine sichere Versorgung mit Strom und Wärme durch den Betrieb intelligenter Energieversorgungskonzepte gewährleistet wird.

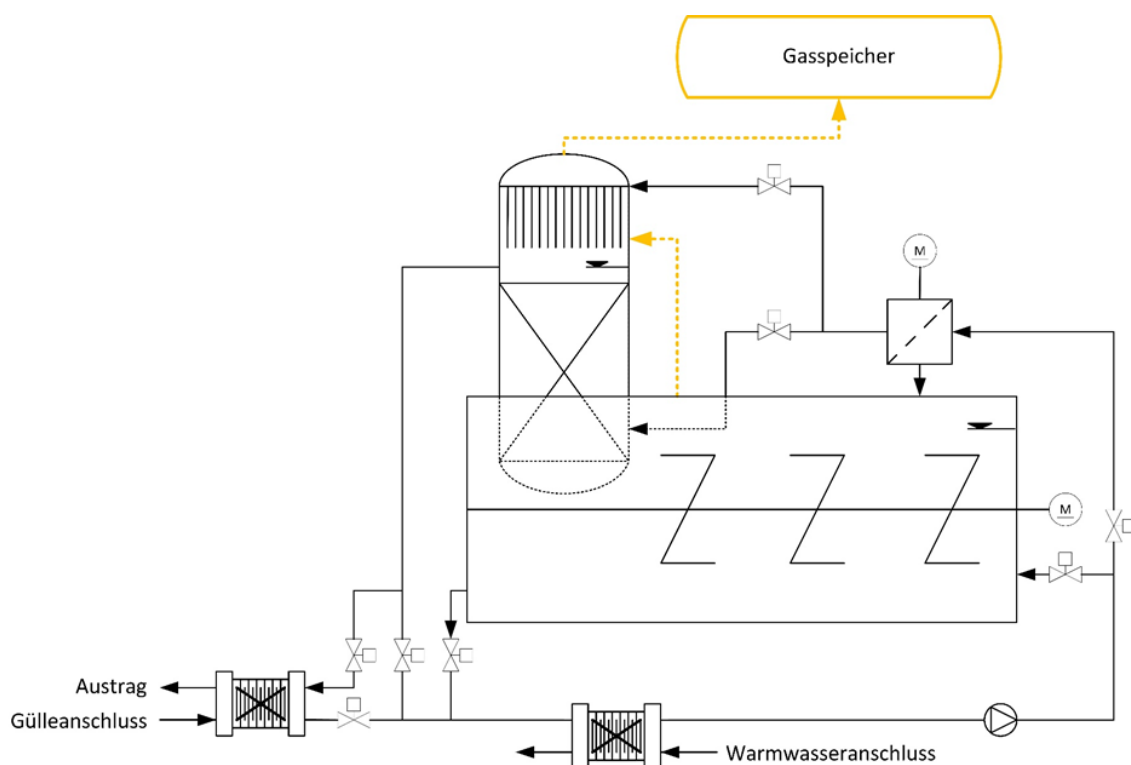
Damit entspricht das Projekt in beispielhafter Weise den förderpolitischen Zielsetzungen. In dem Vorhaben soll durch die Vergärung von Flüssigmist in Kleinanlagen die Energiebereitstellung durch die Land- und Forstwirtschaft unter Einbindung der regional vorhandenen Bioenergiepotenziale erfolgen. Die lastflexiblen Anlagen zur Erzeugung von Strom und Wärme dienen der Deckung des Energiebedarfs des landwirtschaftlichen Betriebes bzw. weiterer Verbraucher. Somit stellt das zu entwickelnde Verfahren der zweistufigen Vergärung von Flüssigmist in Kleinanlagen ein energie- und betriebswirtschaftlich sinnvolles und funktionales Konzept dar, dass sich auf eine Vielzahl tierhaltender Betriebe in Deutschland übertragen lässt. Gleichzeitig wird durch die sehr große Zahl der lastflexiblen Anlagen ein erheblicher Beitrag zur Stabilisierung der Stromnetze ermöglicht.

1.4. Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens

Basis der intelligenten Energiebereitstellung im ländlichen Raum ist die lastflexible Biogaserzeugung aus Flüssigmist mit dem Verfahren der zweistufigen Vergärung. Das technische Konzept der zweistufigen Vergärung von Flüssigmist beruht auf der Kombination eines Rührkesselreaktors (CSTR = continuously stirred tank reactor) mit einem Festbettreaktor (=Anaerobfilter (AF)). Zwischen beiden Prozessstufen wird eine Abtrennung der nicht abgebauten Faserstoffe über einen Kantenspaltfilter vorgenommen. Die nicht abgebauten Faserstoffe werden zurück in die erste Prozessstufe geführt. Die gelösten organischen Verbindungen werden der zweiten Prozessstufe, dem Anaerobfilter, zugeführt. So kann die Verweilzeit der nicht abgebauten Faserstoffe von der der Flüssigkeit getrennt werden und die Verweilzeit der flüssigen Phase in der Anlage im Vergleich zu „klassischen“ Anlagenkonzepten erheblich reduziert werden. Nach bisherigen Erfahrungen können mit dem Kantenspaltfilter Abscheidegrade der organischen Trockensubstanz von ca. 35% erreicht werden.

Ausgehend von einem täglichen Flüssigmistanfall auf einem landwirtschaftlichen Betrieb von 8 m³ mit einer organischen Fracht von ca. 540 kg ergibt dies, bei einer Raumbelastung von 4 kg organischer Trockensubstanz je Kubikmeter Fermentervolumen im CSTR (1. Prozessstufe), ein notwendiges Reaktorvolumen von ca. 47 m³. Die gelösten organischen Verbindungen werden der zweiten Prozessstufe, dem Festbettreaktor zugeführt. Dieser kann mit deutlich höheren Beladungsraten betrieben werden. Etwa 350 kg der mit dem Flüssigmist zugeführten organischen Masse werden in der zweiten Prozessstufe abgebaut werden. Dazu ist ein Reaktorvolumen von ca. 35 m³ erforderlich (Raumbelastung 10 kg chemischer sauerstoffbedarf je Kubikmeter Fermentervolumen. CSB/(m³*d)). Die Verweilzeit der flüssigen Phase im Festbettreaktor ist dabei mit ca. 4,5 Tagen relativ lang;

industrielle Abwasserbehandlungsanlagen, die mit diesem Reaktorkonzept ausgestattet sind, arbeiten in der Praxis mit Verweilzeiten von ca. 16-168 h (Rosenwinkel et al. 2015). Insgesamt ergibt sich in den zweistufigen Anlagen zur Vergärung von Flüssigmist eine Verweilzeit der flüssigen Phase in der Anlage von ca. 10,4 Tagen, während die nicht abgebauten Faserstoffe wesentlich länger in der Anlage verbleiben. Somit können die Anlagen im Vergleich zu „klassischen“ Vergärungsanlagen mit Rührkesselreaktoren wesentlich kompakter aufgebaut werden. Gleichzeitig werden wesentlich höhere Raumbelastungen und höhere reaktorspezifische Methanerträge realisiert. Dies erlaubt den Einsatz von Stahltanks, die vorgefertigt mit sämtlichen passenden Anschlüssen am Aufstellort angeliefert werden können.



Abbildungen 1: Schema der zweistufigen Güllekleinanlagen

In einer einjährigen **Durchführbarkeitsstudie** wurde zunächst das geplante Konzept in Form eines Ausführungsplanes ausgearbeitet und wirtschaftlich analysiert. Diese Durchführbarkeitsstudie beinhaltet:

- Entwicklung des technischen Konzeptes,
- wirtschaftliche Analyse der geplanten Bioenergieanlagen,
- energetische Analyse, v.a. im Hinblick auf die effiziente Nutzung von Energie,
- Ermittlung des nutzbaren Rohstoffpotenzials im Projektgebiet,
- Bestimmung der IST-THG-Emissionen und Prognose der THG-Emissionen nach Umsetzung des Pilotprojektes,

- Darstellung des Potenzials der Multiplizierbarkeit in Deutschland.

Eine positive Begutachtung dieser Durchführbarkeitsstudie vorausgesetzt, soll die Umsetzung und wissenschaftliche Begleitung der Pilotanlagen in einer zweiten Förderstufe innerhalb eines Zeitraums von 3 Jahren erfolgen. In diesem Zeitraum soll eine Pilotanlage zur zweistufigen Vergärung von Flüssigmist auf einem landwirtschaftlichen Betrieb installiert und erprobt werden.

2. Stand der Wissenschaft und Technik

2.1. Stand der Wissenschaft und Technik

2.1.1. Kleinbiogasanlagen in der landwirtschaftlichen Praxis

Biogas entsteht beim anaeroben Abbau von feuchter Biomasse (z. B. Energiepflanzen, Wirtschaftsdünger (Gülle), biogene Reststoffe) durch Mikroorganismen. Das Verhältnis von Methan zu Kohlenstoffdioxid in einer herkömmlichen einstufigen Biogasanlage beträgt bei kohlenhydratreichen pflanzlichen Ausgangsstoffen ca. 50:50 (Zielonka et al. 2010).

In den vergangenen Jahren wurden von verschiedenen Firmen Anlagenkonzepte für die Vergärung kleiner Biomasseströme entwickelt. Dabei kommen verschiedene Verfahrenskonzepte zum Einsatz:

Die Firma Pöttinger Entsorgungstechnik GmbH & CoKG in A-4710 Grieskirchen entwickelte das „**Mobigas**“ Konzept (Mobile und modulare Kleinbiogasanlage) zur Transformation von biogenen Reststoffen in Energie und Kompost mittels Trockenfermentation (www.poettinger.at). Anstelle der Hauptrotte werden die organischen Abfälle in die Fermentercontainer mit einem Volumen von ca. 58 m³ befüllt und anschließend in einem dreistufigen Verfahren Biogas erzeugt. Die erste Stufe ist aerob, dabei wird das Material im Fermenter belüftet. In der zweiten Stufe wird die Belüftung gestoppt und der anaerobe Prozess beginnt. Unterstützend wird ein Perkolat auf das Material gesprüht und der Fermentercontainer über eine Bodenheizung erwärmt. Die Biogaserzeugung beginnt und dauert ca. 2-6 Wochen an. Zum Schluss wird der Fermentercontainer wieder belüftet und somit der Prozess gestoppt. Dieses Konzept ist besonders für die Verwertung stapelbarer Abfallstoffe geeignet und kann nicht für die Verwertung von Flüssigmist verwendet werden.

Auf einem ähnlichen Konzept beruht die „**Mineralit-Kleinbiogasanlage**“ der Mineralgusswerk Laage GmbH (www.mineralit.com). Auch dieses Anlagenkonzept ist auf die Verwertung von festen organischen Reststoffen ausgelegt. Die speziell für das Verfahren entwickelte Zerkleinerungs-, Förder- und Mischtechnik gewährleistet eine für den stofflichen Zersetzungsprozess optimale Aufbereitung der Biomasse (Zellstruktur). Im Gegensatz zum Mobigas-Konzept erfolgt die Konversion der Biomasse jedoch unter vollständigem Sauerstoffabschluss. Auch dieses Verfahren ist als Trockenfermentationsverfahren ausgelegt und somit für die Verwertung von Flüssigmist aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung nicht geeignet.

Speziell für die Verwertung kleiner Flüssigmistmengen aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung wurde von **quh-energie** (Haral GmbH, Biogas Anlagen, CH-3713 Reichenbach) eine Kleinbiogasanlage entwickelt. Diese ist zur Verwertung von Flüssigmist aus Tierbeständen von 15 bis 150 Großvieheinheiten (GVE) geeignet. Das Verfahrensprinzip beruht auf einem quaderförmigen Betonfermenter mit einem selbstgebauten Paddel-Rührwerk. In der Schweiz können Anlagen nach diesem Prinzip nach Angaben der Firma Haral GmbH günstig in Eigenleistung erstellt werden. Aufgrund der wesentlich höheren sicherheitstechnischen und wasserwirtschaftlichen Anforderungen in Deutschland (u.a. doppelwandige Ausführung, Leckageerkennung, statische Anforderungen, geprüfte und geschweißte Gas- und Gülleleitungen) ist das Realisieren dieses Konzeptes in Deutschland nicht möglich. Zudem erfordert das Konzept der einstufigen, vollständig durchmischten Fermenter minimale Verweilzeiten von 25 Tagen, was zu relativ großen Behältervolumina führt. Darüber hinaus führt die fehlende Wärmerückgewinnung aus dem Gärrest zu einer geringen Wärmeeffizienz der Anlage.

Ebenfalls für die Verwertung von Flüssigmist aus der eigenen Tierhaltung wurde von **KFB KösterFischerBiogas Technische Anlagen GmbH** die Biogaskleinanlage zur Gewinnung von Methan aus Gülle erprobt. Sie baut auf einem ähnlichen Funktionsprinzip der CST-Reaktoren wie die quh-energie Anlagen auf. Im Gegensatz zu den quh-energie Anlagen kommt beim KFB Konzept ein externer Wärmetauscher zum Erhitzen des Flüssigmistes zum Einsatz. Die Vergärung erfolgt ebenfalls in quaderförmigen Reaktoren. Die Firma KFB empfiehlt folgende Reaktorgrößen, in Abhängigkeit des Tierbestandes:

<u>Anzahl der Tiere</u>	<u>Fermentergröße:</u>
120 bis 160	2 x 120 m ³
170 bis 240	2 x 180 m ³
250 bis 360	3 x 180 m ³
370 bis 480	4 x 180 m ³

Ebenso wie bei den Anlagen der quh-energie erfolgt die Verwertung des Biogases über BHKW. Auch bei diesem Anlagenkonzept sind aufgrund der notwendigen Verweilzeiten des Flüssigmistes in den Reaktoren von mehr als 25 Tagen relativ große Fermentervolumina erforderlich.

Ein vollständig automatisiertes Verfahren stellt die **Kleinbiogasanlage BT-KB der Firma Biogastechnik Süd** dar. Die mobile Kleinbiogasanlage wird per LKW angeliefert und an das bestehende Güllesystem angeschlossen. Zur Nutzung von Feststoffen und nachwachsenden Rohstoffen kann sie mit einer Feststoffeinbringung ausgerüstet werden. Der ebenfalls vollständig durchmischte, quaderförmige Gärbehälter aus Stahl der Anlage

weist ein Bruttovolumen von 120 m³ auf. Die Zuführung der Substrate erfolgt über eine Exzentrerschneckenpumpe. Die Fermenterheizung ist durch Gegenstromwärmetauscher und Heiztaschen im Fermenter realisiert. Der Fermenter ist mit einem durchgehenden Paddelrührwerk ausgerüstet. Aufgrund der kurzen Verweilzeit der Substrate im Fermenter von weniger als 8-10 Tagen wird der Fermenter mit einem gasdichten Gärrestlager kombiniert. Dieses gasdichte Gärrestlager dient gleichzeitig auch als Gasspeicher und Nachgärer. Der alleinige Betrieb des Reaktors ohne zweiten, gasdichten Behälter ist nicht möglich.

Mit Einzelanlagen wurden weitere Konzepte für Biogaskleinanlagen getestet. Diese basieren jedoch ebenfalls auf den gleichen Grundprinzipien wie die vorgestellten Anlagen: entweder bauen sie auf dem Prinzip der Trockenfermentation oder der einstufigen, vollständig durchmischten Reaktoren auf.

2.1.2. Weiterentwicklung der Anlagentechnik in der Forschung

Gegenüber der in der Praxis etablierten, einstufigen Vergärung von Biomasse wird seit einigen Jahren in der Forschung die zweistufige Vergärung intensiv untersucht. Der Prozess des mikrobiellen Abbaus organischer Substanzen unter anoxischen Bedingungen lässt sich in zwei funktionelle Einheiten teilen: die Hydrolyse und Acidogenese (kurz: Hydrolysestufe) sowie die Acetogenese und Methanogenese (kurz: Methanstufe). Zweistufige Anlagen ermöglichen durch die räumliche Trennung der funktionellen Einheiten eine Optimierung der Milieubedingungen dieser Teilprozesse, wie z. B. Sauerstoffgehalt, Temperatur, pH-Wert, Nährstoffversorgung und Hemmstoffgehalte. Zweistufige Biogasanlagen, mit einer Trennung der im anaeroben Abbau stattfindenden Phasen, wurden seit Anfang der siebziger Jahre in der Literatur beschrieben (American Society of Mechanical Engineers 1974; Ghosh 1987; Demirel und Yenigün 2002). Durch zahlreiche Versuche wurden die Vorteile wie stabiles Gärverhalten, höhere Leistungsfähigkeit und die Anwendbarkeit bei problematischen Substraten nachgewiesen (Zielonka et al. 2010).

An der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie (LAB) werden seit mehr als 10 Jahren diskontinuierlich beschickte Perkolationsfermenter zur Hydrolyse von biogenen Feststoffen betrieben. Diese werden mit Festbettreaktoren kombiniert um die gewonnenen Intermediate der Hydrolysestufe effizient zu Biogas umzuwandeln.

Untersuchungen an der LAB haben gezeigt, dass die Hydrolyse bei einer Temperatur von 55 – 60 °C eine besonders schnelle Umsetzung der Ausgangssubstrate zu löslichen Intermediaten zur Folge hat. Insgesamt war bei den Versuchen ein stabiles Gärverhalten zu beobachten und bei einer optimierten Betriebsweise der Anlage wurden Methanerträge wie in einphasigen Referenzsystemen erreicht. Die Verweilzeit für ein Kilogramm

organischer Trockensubstanz betrug auch bei der Verwertung von nachwachsenden Rohstoffen dabei jedoch nur noch etwa 25 Tage, gegenüber 80-150 Tage in einstufigen Praxisanlagen (Zielonka et al. 2007).

Eine technologische Weiterentwicklung ist das sogenannte „FABES-Modul“ welches die diskontinuierlich betriebene Hydrolysestufe in einen kontinuierlichen Rührkesselreaktor (CSTR) überführt. Größte technologische Errungenschaften hierbei ist eine pH-Wert Steuerung, die Prozessflüssigkeiten zwischen den Reaktor-Stufen austauscht, sobald der pH-Wert durch Substratzufuhr in die Hydrolysestufe unter einen Sollwert absinkt. Dies geschieht ohne Zugabe von zusätzlichen Chemikalien. Eine weitere Besonderheit hierbei ist die in den Reaktor integrierte Trennung der flüssigen und festen Phase durch ein Sieb, sodass die Verweilzeit der Feststoffe von der hydraulischen Verweilzeit entkoppelt wird. Dies führt zu einem verbesserten Abbaugrad und schützt den nachfolgenden Festbettreaktor vor Verstopfungen. So ist es möglich die Bedingungen der Hydrolysestufe auf spezielle Substrate einzustellen um einen optimalen Aufschluss zu gewährleisten.

Eine wichtige Erkenntnis aus den Versuchen zur pH-Wert gesteuerten Hydrolysestufe ist, dass schwer abbaubare Substrate bei zu niedrigem pH-Wert nicht vollständig aufgeschlossen werden, sodass der potenzielle Biogasertrag in zweistufigen Anlagen nicht realisiert werden kann. Leicht abbaubare Substrate werden hingegen auch bei niedrigem pH-Wert vollständig abgebaut. Mit steigendem pH-Wert im ersten Reaktor steigt auch der Gesamt-Abbaugrad der zugeführten Substrate an (Lindner et al. 2015, 2016).

Die zweistufige anaerobe Vergärung ist aufgrund der hohen biologischen Stabilität des Anaerobfilters (AF) gegenüber Lastwechseln besonders für bedarfsgerechte Biogasproduktion geeignet. In Untersuchungen zur Gasbildungskinetik der verschiedenen, in der Hydrolysestufe gebildeten Intermediate, zeigte sich, dass jedes Intermediat als Reinsubstanz zu unterschiedlichen Gasbildungskurven hinsichtlich der Kinetik führt. In diesem Zusammenhang besonders hervorzuheben ist, dass die schnellste Gasbildung aus der Mischung unterschiedlicher Intermediate erfolgt, da hier die vielen verschiedenen Abbaupfade der unterschiedlichsten Mikroorganismen genutzt werden können. Der letztendlich limitierende Faktor der Gasbildungsgeschwindigkeit im Festbettreaktor ist die acetoklastische Methanogenese (Krümpel et al. 2016; Krümpel et al. 2018).

Weiterhin konnte die Tauglichkeit der Festbettreaktoren für eine bedarfsgerechte Biogasproduktion erprobt werden. Hier zeigte sich eine hervorragende Reproduzierbarkeit der Ergebnisse in drei Reaktoren. Lastwechsel von Raumbelastungen von ca. 5 kg CSB m⁻³ d⁻¹ auf 20 kg CSB m⁻³ d⁻¹ und umgekehrt zeigten kurze Reaktionszeiten in der Gasproduktion. Nur 1h nach der Erhöhung der Raumbelastung erreicht die Gasproduktion

ca. 70% des maximalen Gasflusses. Nach weiteren 2h ist dann die Vervierfachung des Gasflusses, korrespondierend zur Raumbelastungserhöhung, erreicht. Aufgrund der Menge des zugeführten Substrates kommt es zu einer Verschiebung des pH-Wertes. Dies hat Einfluss auf die Gasqualität. Hier zeigte sich, dass das $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ Puffersystem deutlich besser geeignet ist als das Carbonat-Puffersystem um Schwankungen im pH-Wert und damit in der Gasqualität auszugleichen (Lemmer und Krümpel 2017)).

Festbettreaktoren zeigen eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Stoßbelastungen, lassen sich aber auch ohne/bzw. mit nur sehr geringer Fütterung über lange Zeiträume in einen dormanten Zustand versetzen, aus dem sie schnell wieder ihre ursprüngliche Leistung zurückgewinnen (Tauseef et al. 2013).

2.1.3. Neuheiten des Ansatzes gegenüber dem Stand der Technik

Die Neuheiten des zu untersuchenden Ansatzes der zweistufigen Vergärung von Flüssigmist gegenüber dem Stand der Technik lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Trennung der hydraulischen Verweilzeit der nicht abgebauten Feststoffe von der Verweilzeit der flüssigen Phase mit gelösten organischen Stoffen.
- Sehr hohe Gesamtabbaugrade durch Rückführung der nicht abgebauten Faserstoffe in den Prozess.
- Kombination aus einem CST-Reaktor und einem Festbettreaktor ermöglicht deutlich kürzere Verweilzeiten als die derzeitigen einstufigen, vollaufmischten Anlagenkonzepte.
- Die Integration des Festbettreaktors erhöht die Lastflexibilität der Anlage erheblich gegenüber dem Stand der Technik.
- Aus den verkürzten Verweilzeiten resultieren deutlich kleinere Behältervolumina.
- Die absolute Standardisierung der Anlagen ermöglicht eine zahlenmäßig sehr weite Verbreitung der Anlagen.
- Der Aufbau der Anlagen auf einer Beton-Bodenplatte mit gemauerter Umwallung führt zu wesentlich höheren sicherheitstechnischen Standards.

2.1.4. Treibhausgasemissionen und Minderungspotenziale

Seit Beginn der Industrialisierung hat Deutschland fast fünf Prozent zur globalen Erderwärmung beigetragen, obwohl die deutsche Bevölkerung nur rund ein Prozent der Weltbevölkerung ausmacht. In dem historischen Klimavertrag von Paris werden erstmals

alle Vertragsstaaten ab 2020 zu völkerrechtlich bindenden Emissionsreduktionen verpflichtet, um die Erderwärmung deutlich unter 2 °C zu halten und Anstrengungen zu unternehmen, sie auf 1,5 °C zu begrenzen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2017).

Mit dem „nationalen Beitrag“, den die EU-Mitglieder zum Pariser Abkommen bei den Vereinten Nationen eingereicht haben, verpflichten sich die EU-Mitgliedsstaaten zu einer gesamteuropäischen Emissionsreduktion von mindestens 40 Prozent bis 2030 verglichen mit 1990. Dieses Ziel ist in das langfristige Klimaschutzziel der EU eingebettet, den EU-weiten Treibhausgasausstoß bis 2050 um 80 bis 95 Prozent gegenüber 1990 zu verringern. Im Energiekonzept von 2010 und im Klimaschutzplan 2050 hat Deutschland Meilensteine für eine Reduktion der Treibhausgase, den Ausbau der erneuerbaren Energien und gesteigerte Energieeffizienz festgehalten. Bis 2050 sollen die Treibhausgasemissionen um mindestens 80 bis 95 Prozent gegenüber 1990 sinken, der Anteil der erneuerbaren Energien auf 60 Prozent am Endenergieverbrauch steigen und der Primärenergieverbrauch um 50 Prozent gegenüber 2008 sinken (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2017).

Während in vielen Sektoren im Vergleich zum Jahr 1990 die Treibhausgasemissionen bereits deutlich gesenkt werden konnten, ist der Anteil der Landwirtschaft an den deutschen Emissionen in 2015 auf über acht Prozent weiter leicht angestiegen. Dies ist vor allem auf extrem klimawirksame Methan- und Lachgasemissionen zurückzuführen, die unter anderem bei der Haltung von Milchkühen und durch Düngemiteleinsatz entstehen.

Bezogen auf die landwirtschaftlichen Methanemissionen stammen 77 % aus dem tierischen Fermentationsprozess (Gärungsprozesse im Magen von Wiederkäuern), 19 % entweichen bei der Lagerung oder dem Handling von Wirtschaftsdünger (Festmist und Gülle) und weitere 4 % können anderen landwirtschaftlichen Emittenten zugeordnet werden. Durch Biogasanlagen werden klimaschädliche Gase, insbesondere Methan aufgefangen, die bei offener Lagerung der Reststoffe in die Atmosphäre entweichen würden. Die Erhöhung des Anteils von Flüssigmist, der in Biogasanlagen verwertet wird, ist daher einer der wesentlichen Ansatzpunkte für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen aus der Tierhaltung (Deutsche Umwelthilfe e.V. 2018).

Die RICHTLINIE (EU) 2018/2001 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen legt im Anhang V bzw. im Anhang VI die Methodik zur Berechnung der Treibhausgasminderungspotenziale bei der Erzeugung von Strom und Wärme aus Biomasse über Biogas fest und nennt typische Werte für Minderungspotenziale

(Europäisches Parlament und Rat 11.12.2018). Die Übersicht der „Typischen Werte für die Minderung der Treibhausgasemissionen“ verdeutlicht das große Potenzial der Güllevergärung zur THG-Minderung (Tabelle1).

Tabelle 1: Typische Werte für die Minderung von Treibhausgasen bei der Nutzung von Biogas für die Elektrizitätserzeugung (Europäisches Parlament und Rat 11.12.2018).

BIOGAS FÜR ELEKTRIZITÄT SERZEUGUNG (*)				
Biogasproduktionssystem		Technologische Optionen	Typische Werte für die Minderung von Treibhausgasemissionen	Standardwerte für die Minderung von Treibhausgasemissionen
Gülle (1)	Fall 1	Offenes Gärrück-standslager (2)	146 %	94 %
		Geschlossenes Gärrück-standslager (3)	246 %	240 %
	Fall 2	Offenes Gärrück-standslager	136 %	85 %
		Geschlossenes Gärrück-standslager	227 %	219 %
	Fall 3	Offenes Gärrück-standslager	142 %	86 %
		Geschlossenes Gärrück-standslager	243 %	235 %

Die folgende Abbildung beschreibt die grundlegende Methode gemäß der EU-Richtlinie 2018/2001) zur Berechnung der Treibhausgasemissionen. Diese werden entlang der gesamten Prozesskette berücksichtigt.

B. METHODE

1. Die Treibhausgasemissionen bei der Produktion und Verwendung von Biomasse-Brennstoffen werden wie folgt berechnet:
 - a) Die Treibhausgasemissionen bei der Produktion und Verwendung von Biomasse-Brennstoffen vor der Umwandlung in Elektrizität, Wärme und Kälte werden wie folgt berechnet:

$$E = e_{ec} + e_1 + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccc} - e_{ccr}$$

Dabei sind:

- E = Gesamtemissionen bei der Produktion des Brennstoffs vor der Energieumwandlung
- e_{ec} = Emissionen bei der Gewinnung oder beim Anbau der Rohstoffe
- e_1 = auf das Jahr umgerechnete Emissionen durch Kohlenstoffbestandsänderungen infolge von Landnutzungsänderungen
- e_p = Emissionen bei der Verarbeitung
- e_{td} = Emissionen bei Transport und Vertrieb
- e_u = Emissionen bei der Nutzung des Brennstoffs
- e_{sca} = Emissionseinsparung durch Akkumulierung von Kohlenstoff im Boden infolge besserer landwirtschaftlicher Bewirtschaftungspraktiken
- e_{ccc} = Emissionseinsparung durch Abscheidung und geologische Speicherung von Kohlendioxid
- e_{ccr} = Emissionseinsparung durch Abscheidung und Ersetzung von Kohlendioxid

Die mit der Herstellung der Anlagen und Ausrüstungen verbundenen Emissionen werden nicht berücksichtigt
Abbildung 1: Methode der Berechnung der Treibhausgasemissionen (EU-Richtlinie 2018/2001)

3. Kurzbeschreibung der Projektpartner

3.1. Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie

Die Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie ist eine Forschungseinrichtung an der Universität Hohenheim. Schwerpunkt der Forschungsarbeiten ist die Verfahrenstechnik der Biokonversion bzw. Biotransformation von organischen Reststoffen und nachwachsenden Rohstoffen in sekundäre Energieträger, Plattformchemikalien oder Werkstoffen mit hohem wirtschaftlichem Wert. Die Arbeiten umfassen dabei einen sehr weiten Technologiereifegrad (Technology Readiness Level (TRL): von dem erstmaligen Erproben einer neuen Technologie im Labormaßstab (TRL-3 bis 4, Technology Development) bis zur Optimierung von Praxisanlagen (TRL-9, System Test, Launch and Operation). Entlang der Prozesskette der Biokonversion umfassen die Arbeiten der Landesanstalt alle Schritte von der Substrataufbereitung, der mikrobiellen Konversion bis zur Reinigung und Nutzung der Produkte.

Zur Durchführung der verfahrenstechnischen Untersuchungen verfügt die Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie über eine umfangreiche Laborausstattung. Über 600 BATCH-Fermenter mit einem kontrollierbaren Temperaturbereich von +5 °C bis +70 °C, 28 kontinuierlich betriebene Fermenter mit einem Nutzvolumen von 17 – 400 L sowie ein eigenes Applikations-Labor zum erstmaligen Testen neuer Fermentationstechnologien. Die eigene Laboranalytik umfasst alle notwendigen Parameter zur Prozessevaluierung u.a. zur TS, oTS-Bestimmung und CSB-Analytik, GC- und HPLC-Systeme, TC-, TOC-, TN-Analysator, NH₄-N-Titration, FOS/TAC-Messung und ein ICP-MS-System zur Einzelelementanalyse. Soweit möglich sind sämtliche Geräte mit einem Autosampler ausgestattet, damit hohe Durchsatzraten erreicht werden. Ergänzend zu dieser umfangreichen Laborausstattung verfügt die Universität Hohenheim auch über die Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“, mit einer elektrischen Leistung des BHKW von 350 kW. An dieser Forschungsbiogasanlage wurde 2018 ein neuer Versuchsstand zur Leistungs- und Durchsatzerfassung von Separationssystemen integriert.

3.2. Hochland Natec GmbH

Die Firma Hochland Natec wurde 1974 gegründet und ist als Mitglied der Hochland-Gruppe weltweit tätig.

Die Firma Hochland Natec ist spezialisiert auf den Bau und das Engineering von Maschinen und kompletten Produktionslinien zur Herstellung, Bearbeitung und Verpackung von

Schmelzkäse. Diese Maschinen werden kundenspezifisch angepasst und sind in verschiedenen Leistungsklassen erhältlich.

Heute beschäftigt die Firma Hochland Natec rund 90 Mitarbeiter, die sich um die Weiterentwicklung und weltweite Vermarktung der Spezialmaschinen zur Herstellung, Bearbeitung und Verpackung von Schmelzkäse kümmern. Die direkte Nähe zur Hochland-Produktion bietet den einmaligen Vorteil der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Anlagen im Bereich Wartung, Hygiene, Bedienung und Anlagensicherheit.

In Zusammenarbeit mit der Hochland Deutschland GmbH hat die Natec erkannt, dass die Einflussmöglichkeiten zur Senkung der THG-Emissionen in der Milchwirtschaft hauptsächlich in der Milcherzeugung liegen. Der Bau von kleineren Anlagen zur Biogaserzeugung schließt eine Lücke in dem bestehenden Portfolio und passt sehr gut zu den Kompetenzen der Natec GmbH im Bereich der Verfahrenstechnik und Anlagensteuerung. Dabei unterstützt die Natec GmbH das Vorhaben der Hochland Gruppe einen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele zu leisten.

3.3. renergie Allgäu e.V.

renergie Allgäu e.V. ist ein wirtschaftlich und politisch unabhängiger Verein, der sich für die verstärkte Nutzung Erneuerbarer Energien und für Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz einsetzt.

Der Verein wurde 1994 gegründet und hat derzeit 763 Mitglieder. renergie Allgäu e.V. fördert regionales Wirtschaften, weil Erneuerbare Energien in der Region Arbeitsplätze und nachhaltiges Wachstum schaffen. Geld für Energie soll in der Region bleiben.

Die Ziele von renergie:

- Gemäß der Vereinssatzung hat renergie das Ziel, durch den Ausbau der Erzeugung und des Einsatzes erneuerbarer Energien zu fördern sowie durch Bewusstseinsbildung und Aufklärung die Verbraucher und das Gewerbe für energiesparendes und klimaschonendes Handeln zu gewinnen.
- Innerhalb der Vereinstätigkeit betreut renergie Allgäu beratend bis heute knapp 400 Biogasanlagenbetreiber in Bayern und Baden-Württemberg in der Betreibergruppe Pro-Biogas hinsichtlich aller wesentlichen betrieblichen Belangen, vom Anlagenbau bis zum täglichen Betriebsmanagement

4. Material und Methoden

4.1. Basic-Engineering

Die Anlagenauslegung erfolgte auf Basis von Literaturangaben und Standardwerten des KTBL. Dies umfasste in erster Linie den Substrat- bzw. Flüssigmistanfall des landwirtschaftlichen Modellbetriebs, sowie die zu erwartenden spezifischen Biogas- und Methanerträge der eingesetzten Substrate. Als Grundlage für die Berechnung der Massenbilanz der Demetha-Anlage, wurde ein Milchviehbetrieb mit 200 GV als Modellbetrieb angenommen. Zusammen mit den Literaturwerten wurde die Raumplanung der Demetha-Anlage erstellt.

Zusätzlich zur Raumplanung wurden die benötigten Anlagenkomponenten definiert und in das System integriert. Dies umfasste die Fermenterdimensionierung, und auch die benötigten Anschlüsse und Peripherie. Neben den Fermentern wurden auch die Anforderungen an Aktoren wie Pumpen und Ventile sowie der benötigten Messtechnik zur Anlagenüberwachung und Steuerung definiert. Abschließend wurde ein Verfahrensfliessbild der Gesamtanlage erstellt.

4.2. Ermittlung des technisch Nutzbaren Rohstoffpotentials

In Deutschland fallen jedes Jahr erhebliche Mengen an Wirtschaftsdünger an. Eine genaue Menge der anfallenden Gülle und Mist in den tierhaltenden Betrieben in Deutschland ist jedoch aufgrund fehlender Datenerhebung nicht bekannt. Um das Rohstoffpotential an Gülle und Mist in Deutschland abzuschätzen und dadurch den ökologischen sowie ökonomischen Effekt darzustellen wird eine Auswertung der statistischen Primärdaten der Tierhaltung durchgeführt. Anhand dieser Auswertung kann das Aufkommen von Gülle der verschiedenen Tierarten über eine Gülleanfallberechnung eingeschätzt und bewertet werden. Die Daten über die Tierhaltung wird nach Regionen und Bundesländer aufgeteilt um die geographischen Faktoren in die Analyse mit einfließen zu lassen. Weiterhin werden die Daten auf Rinder- und Schweinehaltung beschränkt um die Auswertung zu erleichtern. Außerdem stellen Rinder und Schweine, abgesehen von Hühnern, den größten Bestand in der deutschen Tierhaltung dar und haben einen Anteil von über 90% am Einsatz der tierischen Exkremente in Biogasanlagen (Majer et al. 2019). Außerdem wurde in die Betrachtung ebenso die Verteilung und Bestandsgrößen der Betriebe mit Milchkuhhaltungen betrachtet. Hierbei wird vor allem ein Augenmerk auf Süddeutschland mit der erhöhten Dichte von kleinen familiären Milchkuhbetrieben gelegt (Tab. 2 – 4).

Zur genaueren Betrachtung der Tierhaltung in den unterschiedlichen Bestandsgrößen liefern die Daten der statistischen Erhebung im Jahr 2016 die Anzahl an Großvieheinheiten in den Bestandsgrößenklassen unter 50 GV, 50 bis 100 GV, 10 bis 200 GV und über 200 GV in Deutschland und aufgeschlüsselt auf die einzelnen Bundesländer (Statistisches Bundesamt 2016). Diese Menge wird als das theoretische Rohstoffpotential ausgewiesen und beschreibt das in einer bestimmten Region und Zeitraum vorliegende theoretisch nutzbare Energieangebot aus den speziellen tierischen Exkrementen. Das theoretische Methanertragspotential aus Gülle von Rindern und Schweinen wurde über die Standard-Trockensubstanzgehalte, den organischen Trockensubstanzgehalten von Flüssigmist aus Rinder- und Schweinehaltung sowie der Methan-bzw. Biogaserträge analysiert durch das Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) ermittelt.

Zur Darstellung des technisch nutzbaren Biomassepotentials werden unter anderem die Daten aus der Ressourcendatenbank des Deutschen Biomasse Forschungszentrums DBFZ (Krause et al. 2020) herangezogen und mit den Daten der Gülleanfallberechnung auf der Berechnungsgrundlage des Viehbestands des statistischen Bundesamts verglichen (Majer et al. 2019).

Auf Basis der Ergebnisse der Ermittlung des Rohstoffpotenzials wird in der abschließenden Zusammenfassung eine Einschätzung über das Übertragungspotenzial der Resultate im Hinblick auf eine Verbreitung der Güllekleinanlagen in verschiedenen Größenklassen gegeben.

Tabelle 2: Landwirtschaftliche Betriebe mit Rinderhaltung und Rinderbestand am 1. März 2016 nach Größenklassen der landwirtschaftlich genutzten Fläche und der Großvieheinheiten (Statistisches Bundesamt 2016).

Lfd. Nr.	Landwirtschaftlich genutzte Fläche von ... bis unter ... ha ----- Viehbestand von ... bis unter ... GV	Betriebe mit Viehhaltung insgesamt		Darunter: Betriebe mit Rindern					
		Betriebe	Viehbestand insg.	Betriebe	Viehbestand zus.	Bestand an Rindern	Sonstiger Viehbestand		
							zusammen	darunter	
								Schweine	Geflügel
Anzahl	GV	Anzahl	GV	Anzahl	GV				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Deutschland

Größenklassen der landwirtschaftlich genutzten Fläche											
1	unter	5	9 205	803 194	2 851	83 622	127 482	73 282	10 340	7 769	285
2	5	- 10	25 315	217 432	10 968	118 914	152 191	107 022	11 893	2 095	838
3	10	- 20	36 460	641 559	22 746	464 892	611 623	433 285	31 607	9 408	3 307
4	20	- 50	49 116	2 177 545	35 674	1 682 702	2 196 218	1 551 224	131 477	78 876	17 269
5	50	- 100	38 342	3 682 592	28 726	2 853 628	3 651 602	2 599 040	254 587	180 548	39 633
6	100	- 200	19 010	2 863 922	14 088	2 249 905	2 863 491	2 069 309	180 596	125 925	28 178
7	200	- 500	5 409	1 182 174	3 875	919 715	1 148 043	843 677	76 038	51 460	9 123
8	500	- 1 000	1 235	497 538	1 026	429 960	544 281	404 866	25 094	19 020	2 016
9	1 000	und mehr	1 091	888 403	1 012	852 006	1 059 109	779 143	72 863	58 760	6 103
10	Insgesamt		185 183	12 954 359	120 966	9 655 345	12 354 040	8 860 849	794 496	533 861	106 752
Größenklassen der Großvieheinheiten											
11	unter	50	114 715	1 895 186	66 877	1 429 090	1 880 723	1 330 898	98 192	28 814	4 731
12	50	- 100	31 087	2 231 986	24 565	1 759 697	2 312 970	1 657 938	101 759	56 863	5 555
13	100	- 200	26 428	3 679 600	19 823	2 752 630	3 552 419	2 552 454	200 176	154 110	18 349
14	200	und mehr	12 953	5 147 587	9 701	3 713 928	4 607 928	3 319 560	394 368	294 074	78 116
15	Insgesamt		185 183	12 954 359	120 966	9 655 345	12 354 040	8 860 849	794 496	533 861	106 752

Tabelle 3: Landwirtschaftliche Betriebe mit Schweinehaltung und Schweinebestand am 1. März 2016 nach Größenklassen der landwirtschaftlich genutzten Fläche und der Großvieheinheiten (Statistisches Bundesamt 2016).

Lfd. Nr.	Landwirtschaftlich genutzte Fläche von ... bis unter ... ha ----- Viehbestand von ... bis unter ... GV	Betriebe mit Viehhaltung insgesamt		Darunter: Betriebe mit Schweinen					
		Betriebe	Viehbestand insg.	Betriebe	Viehbestand zus.	Bestand an Schweinen	Sonstiger Viehbestand		
							zusammen	darunter	
								Rinder	Geflügel
Anzahl	GV	Anzahl	GV	Anzahl	GV				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Deutschland

Größenklassen der landwirtschaftlich genutzten Fläche											
1	unter	5	9 205	803 194	2 819	462 184	4 990 220	454 082	8 102	3 916	3 059
2	5	- 10	25 315	217 432	3 386	35 084	195 789	19 113	15 972	11 003	903
3	10	- 20	36 460	641 559	6 077	120 913	678 375	70 207	50 706	41 898	1 768
4	20	- 50	49 116	2 177 545	10 692	597 099	4 104 137	407 488	189 611	165 325	13 592
5	50	- 100	38 342	3 682 592	10 360	1 173 750	8 313 411	849 970	323 780	279 390	35 110
6	100	- 200	19 010	2 863 922	5 108	853 844	5 821 369	615 224	238 620	202 873	28 932
7	200	- 500	5 409	1 182 174	1 361	341 387	2 361 841	246 686	94 701	78 981	13 090
8	500	- 1 000	1 235	497 538	226	94 327	611 059	62 214	32 112	31 172	61
9	1 000	und mehr	1 091	888 403	238	243 940	901 314	89 753	154 187	151 692	960
10	Insgesamt		185 183	12 954 359	40 267	3 922 529	27 977 515	2 814 737	1 107 792	966 249	97 474
Größenklassen der Großvieheinheiten											
11	unter	50	114 715	1 895 186	19 642	353 592	2 090 412	175 291	178 301	152 182	3 039
12	50	- 100	31 087	2 231 986	7 678	561 130	4 100 134	389 087	172 043	159 952	3 022
13	100	- 200	26 428	3 679 600	8 586	1 205 894	9 127 890	945 889	260 005	240 947	12 060
14	200	und mehr	12 953	5 147 587	4 361	1 801 913	12 659 079	1 304 469	497 444	413 169	79 353
15	Insgesamt		185 183	12 954 359	40 267	3 922 529	27 977 515	2 814 737	1 107 792	966 249	97 474

Tabelle 4: Landwirtschaftliche Betriebe mit Haltung von Milchkühen und Bestand an Milchkühen am 1. März 2016 nach Größenklassen der landwirtschaftlich genutzten Fläche und der Großvieheinheiten (Statistisches Bundesamt 2016).

0212 T Landwirtschaftliche Betriebe mit Haltung von Milchkühen und Bestand an Milchkühen am 1. März 2016 nach Größenklassen der landwirtschaftlich genutzten Fläche und der Großvieheinheiten

Lfd. Nr.	Landwirtschaftlich genutzte Fläche von ... bis unter ... ha Viehbestand von ... bis unter ... GV	Betriebe mit Viehhaltung insgesamt		Darunter: Betriebe mit Milchkühen							
		Betriebe	Viehbestand insg.	Betriebe	Viehbestand zus.	Bestand an Milchkühen ¹	Sonstiger Viehbestand				
							zusammen	darunter			
								Rinder ohne Milchkühe	Schweine	Geflügel	
Anzahl	GV	Anzahl	GV	Anzahl	6	7	8	9	10		
Deutschland											
Größenklassen der landwirtschaftlich genutzten Fläche											
1	unter 5	9 205	803 194	722	30 409	17 042	17 042	13 367	12 568	355	205
2	5 - 10	25 315	217 432	2 437	38 970	21 149	21 149	17 821	16 443	241	309
3	10 - 20	36 460	641 559	9 776	259 289	154 134	154 134	105 155	98 524	2 270	1 150
4	20 - 50	49 116	2 177 545	21 859	1 220 719	699 461	699 461	521 258	485 639	23 260	3 429
5	50 - 100	38 342	3 682 592	20 518	2 281 744	1 292 788	1 292 788	988 956	905 058	56 854	14 611
6	100 - 200	19 010	2 863 922	10 124	1 853 746	1 067 354	1 067 354	786 392	724 002	43 172	9 378
7	200 - 500	5 409	1 182 174	2 264	686 148	413 088	413 088	273 060	249 113	18 169	2 358
8	500 - 1 000	1 235	497 538	566	313 462	193 957	193 957	119 505	109 590	7 914	850
9	1 000 und mehr	1 091	888 403	788	741 477	417 501	417 501	323 976	264 820	49 431	4 680
10	Insgesamt	185 183	12 954 359	69 054	7 425 965	4 276 474	4 276 474	3 149 491	2 865 757	201 666	36 970
Größenklassen der Großvieheinheiten											
11	unter 50	114 715	1 895 186	26 024	731 114	418 814	418 814	312 300	294 435	7 290	946
12	50 - 100	31 087	2 231 986	18 709	1 352 297	777 140	777 140	575 157	543 295	19 063	1 562
13	100 - 200	26 428	3 679 600	16 416	2 280 039	1 310 532	1 310 532	969 507	905 798	46 632	5 263
14	200 und mehr	12 953	5 147 587	7 905	3 062 515	1 769 988	1 769 988	1 292 527	1 122 229	128 681	29 199
15	Insgesamt	185 183	12 954 359	69 054	7 425 965	4 276 474	4 276 474	3 149 491	2 865 757	201 666	36 970

4.3. Wirtschaftliche und technische Analyse der Güllevergärung in zweistufigen Kleinanlagen

Anhand der Massenbilanz und Vorplanungen wurden die technische Planung und Auslegung der Anlagenkomponenten sowie deren Kostenbewertung durchgeführt. Die Kostenbewertungen der Investitionen in einzelne Anlagenkomponenten wurde durch Angebote von möglichen Lieferanten und Anlagenbauern erstellt. Dabei wurden vor allem Lieferanten mit Knowhow und langjähriger Erfahrung im Biogasbereich kontaktiert. Außerdem wurden pro Baugruppe mehrere mögliche Lieferanten angesprochen. Abschließend wurden die angebotenen Komponenten nach Preis, Funktion, Lieferantenverlässlichkeit- und Erfahrung bewertet und somit nach Preis-Leistungsverhältnis sortiert. Basierend auf den Angeboten wurde eine Kostenkalkulation der Gesamtanlage erstellt. Bei dieser wurden alle Aspekte der Anlagenherstellung berücksichtigt, wie die mechanische und elektrische Montage, Verrohrung und Softwareerstellung.

Für der Auslegung der Anlagenkomponenten wurden vor allem die vorausgearbeiteten technischen Anforderungen sowie das R&I-Fließschema der Universität Hohenheim zu Grunde gelegt. Es ist zu berücksichtigen, dass die aufgeführten Kosten ausschließlich die Selbstkosten der Fa. Natec (Stand 2021) darstellen.

4.4. Ökologische Analyse und Bestimmung des Treibhausgasminderungspotentials

Um die Effekte der Nutzung des technischen Potentials auf die Ökologie zu analysieren werden die Daten aus der Ermittlung des Rohstoffpotentials herangezogen. Anhand des Viehbestands und dem daraus resultierenden theoretischen Rohstoffpotential kann, mit einer Näherung, das technisch nutzbare Rohstoffpotential kalkuliert werden. Die Minderung des Treibhausgaspotentials durch die flächendeckende Güllevergärung in Deutschland wurde mit Hilfe der Renewable Energy Directive (RED II) durchgeführt. In der Richtlinie sind eine Reihe von Nachhaltigkeitskriterien aufgeführt sowie Daten zur Berechnung von Ökobilanzen verschiedener Energieträger. Ausgehend vom Gülleanfall wird über die biologischen Standardwerte der Gülle und den Gasertragsdaten des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) der unterschiedlichen Tierarten der Methan- und Biogasertrag bei einer flächendeckenden Güllevergärung in Deutschland (Achilles et al. 2018). Mit dem Gasertrag wird die theoretische Stromerzeugung aus der flächendeckenden Güllevergärung in Deutschland berechnet und mit dem CO₂-Emissionsfaktor für den Strommix in Deutschland für das Jahr 2020, der mit einem Wert von 366 g CO₂-Äquivalent pro kWh angegeben wird, bilanziert (Umweltbundesamt 2021b). Aufbauend auf der Stromerzeugung wird die Treibhausgasminderung für den

flächendeckenden Einsatz und mit der Annahme einer vollständigen Nutzung des technisch nutzbaren Rohstoffpotentials in Deutschland berechnet.

Das Minderungspotential der Treibhausgase durch die Güllevergärung der zweistufigen Demetha-Anlage kalkuliert sich durch den in der RED II ausgewiesenen Wert der Minderung von Treibhausgasemissionen für Biogasproduktionssysteme mit ausschließlicher Gülleverwertung.

4.5. Vorauswahl der landwirtschaftlichen Betriebe

Die Vorauswahl von möglichen Versuchsstandorten für die Pilotanlage zur zweistufigen Güllevergärung wurde von Renergie Allgäu e.V. durchgeführt. Bei der Standortauswahl spielte neben den Mindestkriterien vor allem die räumliche Nähe eine entscheidende Rolle. Sowohl die Universität Hohenheim als auch Renergie Allgäu e.V. sind im Süddeutschen Raum beheimatet, sodass für die Standortauswahl nur diese Region in Frage kam. Für die jeweiligen Standorte wurde bei der Auswahl eine Analyse und Bewertung der am Standort verfügbaren Wirtschaftsdünger vorgenommen um die Substratversorgung der Pilotanlage sicherstellen zu können. Zusätzlich wurde geprüft ob die Betriebsgröße und die grundlegenden bauliche Voraussetzungen für den Aufbau der Pilotanlage gegeben sind. Besonderes Augenmerk wurde auf die am Betrieb vorhandenen Strom- und Wärmequellen und -senken gelegt.

5. Ergebnisse

5.1. Landwirtschaftliche Betriebsstrukturen und Rohstoffpotential zur Güllevergärung

5.1.1. Tierhaltende Betriebe in Deutschland

Zur Ermittlung des Rohstoffpotentials von Gülle in Deutschland wurden statistische Primärdaten aus der Tierhaltung von Bund und den Ländern ausgewertet. Um einen ersten Überblick über die Tierhaltung und der Betriebsgröße und -anzahl viehhaltender Betriebe zu schaffen wird Deutschland sowie die einzelnen Bundesländer als Betrachtungsrahmen gewählt. Die Grundlage für die wissenschaftliche Bewertung des Rohstoffpotentials liegt in der Agrarstrukturerhebung aus dem Jahr 2016 sowie die statistischen Erhebungen der Bundesländer im Jahr 2020. Die Agrarstrukturerhebung aus dem Jahr 2020 ist bei der Bearbeitung dieses Textes noch nicht veröffentlicht worden. Dadurch können sich die Autoren in dem vorliegenden Abschlussbericht auf keine geeigneten und detaillierten Daten aus der aktuellen Agrarstrukturerhebung im Jahr 2020 beziehen. Zur Einordnung der Daten aus 2016 wird sich ebenso auf gegenwärtige veröffentlichte Statistiken bezogen.

In Deutschland gibt es ca. insgesamt 166.400 landwirtschaftliche Betriebe mit Tierhaltung (Stand November 2019). Der Viehbestand in Deutschland beläuft sich auf knapp 37,5 Millionen Tiere. Der größte Teil der viehhaltenden Betriebe kommt aus Bayern, ungefähr 30 %. Über zwei Drittel aller viehhaltenden Betriebe kommt aus den Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen. Die Betriebsanzahl, aufgeteilt in Bestandsgrößenklassen nach Menge an Großvieheinheiten (GV), ist in der Agrarstrukturerhebung im Jahr 2016 erfasst worden. Insgesamt wurden 185.183 Betriebe mit Viehhaltung gezählt. Dabei stellt die Klasse mit unter 50 GV im Bestand die meisten Betriebe in Deutschland, mit 114.715 Betrieben, auf. Die geringste Anzahl weisen die Betriebe mit mehr als 200 GV im Bestand auf. Im Bundesland Bayern liegen mit einem Anteil von 37 % die meisten Betriebe in Deutschland mit einer Bestandsgrößenklasse unter 50 GV. In Niedersachsen liegen mit einer Anzahl von 4.886 und einem Anteil von 37 % aller viehhaltenden Betriebe in Deutschland die höchste Anzahl an Betrieben in dieser Betriebsklasse.

Tabelle 5: Anzahl an Tierhaltungen nach Tierart im Jahr 2018 und 2019.

Gebiet	Haltungen mit Rindern				Betriebe mit Schweinen						Betriebe mit Schafen	
	Insgesamt		davon mit Milchkühen		Insgesamt		und zwar mit				Insgesamt	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019	Zuchtschweinen		Mastschweinen		2018	2019
							2018	2019	2018	2019		
Baden-Württemberg	15,8	15,5	6,7	6,3	2,2	2,0	1,0	0,9	1,8	1,7	1,3	1,3
Bayern	44,5	43,0	29,0	27,6	4,8	4,5	2,0	1,8	4,2	3,9	2,0	2,0
Berlin	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Brandenburg	4,2	4,0	0,7	0,6	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3
Bremen	0,1	0,1	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Hamburg	0,1	0,1	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Hessen	8,2	8,0	2,7	2,5	0,9	0,8	0,3	0,3	0,8	0,7	0,7	0,8
Mecklenburg-Vorpommern	3,2	3,2	0,7	0,7	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3
Niedersachsen	20,3	19,8	9,2	8,9	5,5	5,3	1,8	1,7	4,9	4,7	1,0	1,0
Nordrhein-Westfalen	16,6	16,2	5,6	5,4	7,0	6,8	1,9	1,7	5,6	5,4	1,2	1,1
Rheinland-Pfalz	4,8	4,7	1,8	1,7	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,8	0,8
Saarland	0,7	0,7	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
Sachsen	6,7	6,5	1,2	1,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,4
Sachsen-Anhalt	3,0	2,9	0,6	0,6	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3
Schleswig-Holstein	7,3	7,1	3,9	3,7	0,8	0,8	0,3	0,3	0,7	0,7	1,1	1,1
Thüringen	4,1	4,0	0,6	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3
Deutschland	139,6	135,8	62,8	59,9	22,4	21,2	7,8	7,2	18,9	17,9	9,5	9,4

Statistisches Bundesamt: Genesis-Online: Daten abgerufen am 2.10.2020

Diese Zusammensetzung von Anzahl an Betrieben in Deutschland und der Betriebsgrößenklasse ist abhängig von der Tierart. In Deutschland gibt es insgesamt 120.966 Betriebe mit Rinderhaltung. Davon halten nur knapp 8 % der Betriebe mehr als 200 GV. Die Bundesländer mit der häufigsten Anzahl an großen Betrieben über 200 GV sind Niedersachsen mit 3.324 Betrieben und Schleswig-Holstein mit 1.378 sowie Nordrhein-Westfalen mit 1.192 Betrieben. Den größten Anteil mit 55 % der rinderhaltenden Betriebe in Deutschland bildet die kleinste Betriebsgrößenklasse mit unter 50 GV im Bestand. Über 60% dieser kleinen Betriebe befinden sich im südlichen Raum, in Bayern (knapp 40%) und Baden-Württemberg. Von den Betrieben im Süden Deutschlands sind vor allem im Bundesland Bayern, mit ca. 73 %, der überwiegende Teil der Betriebe aus der Milchviehhaltung. Die großen Milchviehbetriebe mit über 200 GV sitzen überwiegend in Niedersachsen mit einem Anteil von über 33 %. Die mittelgroßen Milchviehbetriebe in Deutschland mit einer Bestandsgröße von 50 – 100 GV machen einen Anteil von knapp 50 % aus.

Die Betriebe mit Schweinehaltung sind es momentan knapp über 40.000 in allen Bundesländern. Diese kleinen Betriebe mit Schweinehaltung sind vor allem in Bayern und Baden-Württemberg verortet und machen einen Anteil von über 50 % aller Betriebe in Deutschland mit weniger als 50 GV Schweinen im Bestand aus. Die großen Betriebe mit über 200 GV haben in Deutschland einen Anteil von ungefähr 11 %. Davon befinden sich knapp unter 50 % in Niedersachsen.

Tabelle 6 Betriebe mit Viehhaltung in Deutschland und den Bundesländern aufgeteilt in Betriebsgrößenklassen

Betriebe mit Viehhaltung					
Region	Größenklassen der Großvieheinheiten				Insgesamt
	< 50	50 - 100	100 - 200	> 200	
Deutschland	114.715	31.087	26.428	12.953	185.183
Baden-Württemberg	16.931	3.454	2.652	510	23.547
Bayern	42.769	13.178	6.854	818	63.619
Berlin	26	4	1	0	31
Brandenburg	2.228	439	351	631	3.649
Bremen	60	20	27	9	116
Hamburg	125	29	0	0	171
Hessen	8.828	1.296	973	317	11.414
Mecklenburg-Vorpommern	1.709	277	364	716	3.066
Niedersachsen	12.791	4.284	6.225	4.886	28.186
Nordrhein-Westfalen	12.776	4.779	5.322	1.761	24.638
Rheinland-Pfalz	4.632	919	0	0	6.529
Saarland	613	132	94	41	880
Sachsen	3.537	418	273	474	4.702
Sachsen-Anhalt	1.397	239	239	509	2.384
Schleswig-Holstein	4.444	1.402	2.165	1.643	9.654
Thüringen	1.849	217	144	387	2.597

Tabelle 7 Betriebe mit Rinderhaltung in Deutschland und den Bundesländern aufgeteilt in Betriebsgrößenklassen

Betriebe mit Rinderhaltung					
Region	Größenklassen der Großvieheinheiten				Insgesamt
	< 50	50 - 100	100 - 200	> 200	
Deutschland	66.877	24.565	19.823	9.701	120.966
Baden-Württemberg	9.618	2.664	2.048	410	14.740
Bayern	26.618	11.745	5.689	646	44.698
Berlin	3	4	1	0	8
Brandenburg	1.229	328	287	531	2.375
Bremen	24	19	27	9	79
Hamburg	53	16	0	0	84
Hessen	4.947	1.025	789	265	7.026
Mecklenburg-Vorpommern	969	198	272	585	2.024
Niedersachsen	6.743	3.056	4.658	3.324	17.781
Nordrhein-Westfalen	7.174	2.791	2.832	1.192	13.989
Rheinland-Pfalz	2.643	802	0	0	4.357
Saarland	334	113	90	41	578
Sachsen	2.443	340	242	402	3.427
Sachsen-Anhalt	783	162	187	370	1.502
Schleswig-Holstein	2.123	1.136	1.892	1.378	6.529
Thüringen	1.173	166	114	316	1.769

Tabelle 8 Betriebe mit Schweinehaltung in Deutschland und den Bundesländern aufgeteilt in Betriebsgrößenklassen

Betriebe Region	Betriebe mit Schweinehaltung Größenklassen der Großvieheinheiten				Insgesamt
	< 50	50 - 100	100 - 200	> 200	
Deutschland	19.642	7.678	8.586	4.361	40.267
Baden-Württemberg	3.313	953	840	144	5.250
Bayern	6.718	2.173	1.675	241	10.807
Berlin	6	1	0	0	7
Brandenburg	292	44	45	138	519
Bremen	4	0	0	1	5
Hamburg	3	1	0	0	6
Hessen	2.592	428	342	88	3.450
Mecklenburg-Vorpommern	180	24	37	122	363
Niedersachsen	2.048	1.322	2.050	2.061	7.481
Nordrhein-Westfalen	2.351	2.205	3.066	792	8.414
Rheinland-Pfalz	465	120	0	0	691
Saarland	58	21	10	4	93
Sachsen	599	78	64	121	862
Sachsen-Anhalt	259	41	27	153	480
Schleswig-Holstein	319	218	317	343	1.197
Thüringen	435	49	35	123	642

Tabelle 9 Betriebe mit Milchviehhaltung in Deutschland und den Bundesländern aufgeteilt in Betriebsgrößenklassen

Betriebe Region	Betriebe mit Milchkuhhaltung Größenklassen der Großvieheinheiten				Insgesamt
	< 50	50 - 100	100 - 200	> 200	
Deutschland	26.024	18.709	16.416	7.905	69.054
Baden-Württemberg	3.265	2.119	1.813	375	7.572
Bayern	16.324	10.486	5.177	577	32.564
Berlin	0	1	1	0	2
Brandenburg	69	44	78	348	539
Bremen	6	12	23	9	50
Hamburg	8	5	0	0	21
Hessen	1.300	688	695	240	2.923
Mecklenburg-Vorpommern	119	53	119	421	712
Niedersachsen	1.688	2.057	3.763	2.572	10.080
Nordrhein-Westfalen	1.618	1.640	2.054	952	6.264
Rheinland-Pfalz	593	533	0	0	1.906
Saarland	41	57	75	33	206
Sachsen	349	179	168	334	1.030
Sachsen-Anhalt	70	44	106	300	520
Schleswig-Holstein	423	729	1.717	1.311	4.180
Thüringen	151	62	47	225	485

5.1.2. Betriebsgrößenstruktur in Deutschland nach Tierbestand in Großvieheinheiten

Betrachtet man die Verteilung der insgesamt 8,86 Millionen Rinder-Großvieheinheiten in Deutschland auf die einzelnen Bundesländer im Hinblick auf die Bestandsgrößenklassen der Betriebe stellt sich heraus, dass trotz einer höheren Anzahl an kleinen Betrieben die Anzahl der GV Rinder bei größerer Bestandsgrößenklasse höher liegt. Die Betriebe mit über 200 GV Rinder belegen einen Anteil von 37 % aller GV Rinder. Die kleinste Kategorie mit unter 50 GV Rinder im Bestand ist nur für einen Anteil von 15 % aller Rinder-GV verantwortlich. Im Süden bildet sich ein anderes Bild von der Verteilung der Großvieheinheiten zwischen großen, mittleren und kleinen Betrieben nach Bestandsgrößenklasse. In Bayern und Baden-Württemberg liegt die höchste Anzahl an Rinder-GV in der Bestandsgröße 50 – 200 GV. In diesen mittelgroßen Betriebsklasse liegen mit 1,5 Mio. GV-Rinder, knapp zwei Drittel aller Rinder-GV in Bayern. Ebenso in Baden-Württemberg, wo mit 439.277 Rinder-GV knapp 61 % aller Rinder-GV stehen. Ein konträres Bild dazu stellt die Bundesländer im Norden und Osten Deutschlands dar. Beispielsweise Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Brandenburg dar. Dort bildet die Betriebsgröße mit über 200 GV Rinder im Bestand die höchste Anzahl an Großvieheinheiten der Tierart Rinder. Eine sehr ähnliche Verteilung zeigt sich in der Milchviehhaltung.

Dies trifft genauso auf die Schweinehaltung zu. Die großen Schweinebetriebe mit über 200 GV im Bestand liegen im Norden und im Osten von Deutschland, vor allem in Niedersachsen, mit einem Anteil von 45 % aller Betriebe mit einem Besatz über 200 GV Schweine. Die höchste Anzahl an GV Schweinen in der Größenklasse von 100 – 200 GV an Schweinen im Bestand liegt in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen mit einem zusammengerechneten Anteil von knapp zwei Drittel aller GV Schweine in Deutschland in der Betriebsgröße 100 – 200 GV.

Tabelle 10 Anzahl an Rindern in Deutschland unterteilt in Betriebsgrößenklassen und dargestellt in Großvieheinheiten (GV).

Region	GV Rinder				Insgesamt
	Größenklassen der Großvieheinheiten				
	< 50	50 - 100	100 - 200	> 200	
Deutschland	1.330.898	1.657.938	2.552.454	3.319.560	8.860.849
Baden-Württemberg	174.210	178.565	260.712	104.498	717.984
Bayern	617.564	809.455	718.567	157.093	2.302.679
Berlin	0	0	0	0	340
Brandenburg	19.059	21.380	39.258	317.911	397.608
Bremen	0	0	3.572	2.363	7.645
Hamburg	1.077	842	0	0	4.341
Hessen	83.628	65.658	104.078	71.161	324.524
Mecklenburg-Vorpommern	16.205	13.832	37.908	334.086	402.031
Niedersachsen	131.063	205.919	605.721	861.663	1.804.366
Nordrhein-Westfalen	134.628	176.471	339.356	308.354	958.809
Rheinland-Pfalz	48.691	55.377	0	0	258.060
Saarland	5.816	7.478	11.832	10.610	35.736
Sachsen	31.485	22.953	31.723	275.577	361.738
Sachsen-Anhalt	12.481	9.809	25.622	200.994	248.906
Schleswig-Holstein	39.819	78.338	266.740	412.547	797.444
Thüringen	14.728	10.338	14.246	199.328	238.640

Tabelle 11 Anzahl an Schweinen in Deutschland unterteilt in Betriebsgrößenklassen und dargestellt in Großvieheinheiten (GV).

Region	GV Schweine				Insgesamt
	Größenklassen der Großvieheinheiten				
	< 50	50 - 100	100 - 200	> 200	
Deutschland	175.291	389.087	945.889	1.304.469	2.814.737
Baden-Württemberg	22.180	44.989	85.324	28.426	180.919
Bayern	59.010	92.435	164.100	41.865	357.410
Berlin	0	0	0	0	5
Brandenburg	554	985	3.625	67.418	72.581
Bremen	0	0	0	0	0
Hamburg	1	0	0	0	0
Hessen	11.157	13.164	25.676	12.509	62.505
Mecklenburg-Vorpommern	320	696	3.628	72.869	77.513
Niedersachsen	28.529	76.210	227.812	581.946	914.497
Nordrhein-Westfalen	44.601	140.564	381.991	172.518	739.673
Rheinland-Pfalz	2.819	4.699	0	0	18.654
Saarland	77	0	148	0	597
Sachsen	896	987	2.179	56.811	60.873
Sachsen-Anhalt	754	1.217	3.104	104.422	109.497
Schleswig-Holstein	3.612	12.302	39.076	93.982	148.972
Thüringen	774	505	2.604	66.943	70.827

Tabelle 12 Anzahl an Milchvieh in Deutschland unterteilt in Betriebsgrößenklassen und dargestellt in Großvieheinheiten (GV).

Region	GV Milchkühe				Insgesamt
	Größenklassen der Großvieheinheiten				
	< 50	50 - 100	100 - 200	> 200	
Deutschland	418.814	777.140	1.310.532	1.769.988	4.276.474
Baden-Württemberg	53.368	89.120	144.784	59.664	346.936
Bayern	281.825	441.411	398.531	86.873	1.208.640
Berlin	0	0	0	0	0
Brandenburg	526	1.608	6.552	151.278	159.964
Bremen	71	0	1.936	0	0
Hamburg	125	148	0	0	1.145
Hessen	16.662	27.072	57.595	41.980	143.309
Mecklenburg-Vorpommern	1.041	2.188	10.340	167.349	180.918
Niedersachsen	23.060	82.001	307.491	452.198	864.750
Nordrhein-Westfalen	22.292	66.505	165.342	163.451	417.590
Rheinland-Pfalz	8.481	23.085	0	0	115.749
Saarland	625	2.327	5.961	5.677	14.590
Sachsen	3.658	8.143	13.945	162.877	188.623
Sachsen-Anhalt	732	1.787	8.765	112.121	123.405
Schleswig-Holstein	4.993	28.357	137.347	225.661	396.358
Thüringen	1.355	2.789	3.756	102.602	110.502

5.1.3. Ermittlung des Rohstoff- / Güllepotentials in Deutschland

Die in den Tabellen 13, 14 und 15 ausgewiesenen Flüssiggülmengen sind in m³ angegeben, jedoch werden flüssige Substrate in landwirtschaftlichen Biogasanlagen näherungsweise mit einer Dichte von einer Tonne pro m³ bewertet und sind damit gleichzusetzen. In Deutschland fallen jährlich rund 170 Mio. Tonnen Gülle aus der Rinderhaltung an. Der größte Anteil, mit ca. 106 Mio. m³ und 62,5 % am gesamten Gülleanfall von Rindern, liefern Betriebe mit einer Betriebsgröße, gemessen an GV Rinder, von unter 200 GV. Der größte Anteil an kleinen bis mittelgroßen rinderhaltenden Betrieben am gesamten durch Rinder verursachten Flüssigmistanfall im Bundesland liegt in Bayern vor. Der Anteil beläuft sich mit knapp 41 Mio. m³ auf 93 % und weist auch das höchste Aufkommen von Flüssigmisterzeugung durch Rinderhaltung auf. Die 3 Stadtstaaten weisen mit zusammen lediglich 236.659 m³ den geringsten Anfall an Rindergülle auf. Außerhalb von Süddeutschland fällt in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen die größten Mengen an Rindergülle mit jeweils ungefähr 34 Mio. & 18 Mio. m³ an. In der Betriebsgrößenklasse von 100 bis 200 GV Rinder wird die maximale Menge an Rindergülle in Bayern erzeugt. Weiterhin sind bedeutende Bundesländer mit hohem Gülleanfall durch Rinderhaltung, in der Größenklasse 100 bis 200 GV, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen.

Tabelle 13 Flüssigmistanfall in der Rinderhaltung nach Bundesland und Betriebsgrößenklassen.

Region	Flüssigmistanfall Rinder in m ³					Insgesamt
	Größenklassen der Großvieheinheiten					
	< 50 GV	50 - 100 GV	100 - 200 GV	< 200 GV	> 200 GV	
Deutschland	25.553.242	31.832.410	49.007.117	106.392.768	63.735.552	170.128.301
Baden-Württemberg	3.344.832	3.428.448	5.005.670	11.778.950	2.006.362	13.785.293
Bayern	11.857.229	15.541.536	13.796.486	41.195.251	3.016.186	44.211.437
Berlin	0	0	0	0	0	6.528
Brandenburg	365.933	410.496	753.754	1.530.182	6.103.891	7.634.074
Bremen	0	0	68.582	68.582	45.370	146.784
Hamburg	20.678	16.166	0	36.845	0	83.347
Hessen	1.605.658	1.260.634	1.998.298	4.864.589	1.366.291	6.230.861
Mecklenburg-Vorpommern	311.136	265.574	727.834	1.304.544	6.414.451	7.718.995
Niedersachsen	2.516.410	3.953.645	11.629.843	18.099.898	16.543.930	34.643.827
Nordrhein-Westfalen	2.584.858	3.388.243	6.515.635	12.488.736	5.920.397	18.409.133
Rheinland-Pfalz	934.867	1.063.238	0	1.998.106	0	4.954.752
Saarland	111.667	143.578	227.174	482.419	203.712	686.131
Sachsen	604.512	440.698	609.082	1.654.291	5.291.078	6.945.370
Sachsen-Anhalt	239.635	188.333	491.942	919.910	3.859.085	4.778.995
Schleswig-Holstein	764.525	1.504.090	5.121.408	7.390.022	7.920.902	15.310.925
Thüringen	282.778	198.490	273.523	754.790	3.827.098	4.581.888

Tabelle 14 Flüssigmistanfall in der Schweinehaltung nach Bundesland und Betriebsgrößenklasse.

Region	Flüssigmistanfall Schweine m ³					Insgesamt
	Größenklassen der Großvieheinheiten					
	< 50 GV	50 - 100 GV	100 - 200 GV	< 200 GV	> 200 GV	
Deutschland	1.752.910	3.890.870	9.458.890	15.102.670	13.044.690	28.147.370
Baden-Württemberg	221.800	449.890	853.240	1.524.930	284.260	1.809.190
Bayern	590.100	924.350	1.641.000	3.155.450	418.650	3.574.100
Berlin	0	0	0	0	0	0
Brandenburg	5.540	9.850	36.250	51.640	674.180	725.810
Bremen	0	0	0	0	0	0
Hamburg	10	0	0	10	0	0
Hessen	111.570	131.640	256.760	499.970	125.090	625.050
Mecklenburg-Vorpommern	0	0	0	0	0	0
Niedersachsen	285.290	762.100	2.278.120	3.325.510	5.819.460	9.144.970
Nordrhein-Westfalen	446.010	1.405.640	3.819.910	5.671.560	1.725.180	7.396.730
Rheinland-Pfalz	28.190	46.990	0	75.180	0	186.540
Saarland	770	0	1.480	2.250	0	5.970
Sachsen	8.960	9.870	21.790	40.620	568.110	608.730
Sachsen-Anhalt	7.540	12.170	31.040	50.750	1.044.220	1.094.970
Schleswig-Holstein	36.120	123.020	390.760	549.900	939.820	1.489.720
Thüringen	7.740	5.050	26.040	38.830	669.430	708.270

Tabelle 15 Flüssigmistanfall in der Milchviehhaltung nach Bundesland und Betriebsgrößenklasse.

Region	Flüssigmistanfall Milchkühe in m ³					Insgesamt
	Größenklassen der Großvieheinheiten					
	< 50 GV	50 - 100 GV	100 - 200 GV	< 200 GV	> 200 GV	
Deutschland	8.376.280	15.542.800	26.210.640	50.129.720	35.399.760	85.529.480
Baden-Württemberg	1.067.360	1.782.400	2.895.680	5.745.440	1.193.280	6.938.720
Bayern	5.636.500	8.828.220	7.970.620	22.435.340	1.737.460	24.172.800
Berlin	0	0	0	0	0	0
Brandenburg	10.520	32.160	131.040	173.720	3.025.560	3.199.280
Bremen	1.420	0	38.720	40.140	0	0
Hamburg	2.500	2.960	0	5.460	0	22.900
Hessen	333.240	541.440	1.151.900	2.026.580	839.600	2.866.180
Mecklenburg-Vorpommern	20.820	43.760	206.800	271.380	3.346.980	3.618.360
Niedersachsen	461.200	1.640.020	6.149.820	8.251.040	9.043.960	17.295.000
Nordrhein-Westfalen	445.840	1.330.100	3.306.840	5.082.780	3.269.020	8.351.800
Rheinland-Pfalz	169.620	461.700	0	631.320	0	2.314.980
Saarland	12.500	46.540	119.220	178.260	113.540	291.800
Sachsen	73.160	162.860	278.900	514.920	3.257.540	3.772.460
Sachsen-Anhalt	14.640	35.740	175.300	225.680	2.242.420	2.468.100
Schleswig-Holstein	99.860	567.140	2.746.940	3.413.940	4.513.220	7.927.160
Thüringen	27.100	55.780	75.120	158.000	2.052.040	2.210.040

5.1.4. Beschreibung des landwirtschaftlichen Modellbetrieb als Planungsgrundlage zur zweistufigen Güllevergärung

Auf Basis der Anlage zur Gülleverordnung sowie des KTBL-GV-Schlüssels für Rinder wurden der Gülleanfall sowie der Bestand an Großvieheinheiten für den Beispielbetrieb berechnet. Ausgangspunkt der Berechnungen ist dabei ein Milchviehbetrieb mit 120 Milchkühen, in dem die gesamte weibliche Nachzucht aufgezogen wird. Den Berechnungen wird eine Milchleistung von 8.000 kg ECM sowie eine Zwischenkalbezeit von 400 Tagen zugrunde gelegt.

Tabelle 16 Kalkulation des Flüssigmistanfall des landwirtschaftlichen Modellbetriebs als weitere Planungsgrundlage zur Auslegung der zweistufigen Anlage zur Güllevergärung.

Position	Stück	GV/Stück	Gülle/Platz *		Gesamt	
			m ³ /a	% TS	m ³ /a	kg TS /a
Milchkühe Leistung 8000 kg ECM	120	1,2	20	11	2400	264.000
ZKZ 400 Tage, 5% Kälberverluste						
Kälber gesamt pro Jahr	104					
Alter 0 - 16 Wochen, weiblich	16	0,3	3	6	48	2.881
Weibl. Nachzucht, EKA 27 Monate	100		9,3	12	927	111.255
Bis 1 Jahr	35	0,3				
1-2 Jahre	52	0,6				
>2 Jahre	13	1,2				
Regenwasser/Schmutzwasser			6,0	0,0	720	
Summe		206,1	19,9	9,2	4.095	378.135

ECM Energiekorrigierte Milch
 ZKZ Zwischenkalbezeit
 EKA Erstkalbealter
 * Anlage 9, DüngeVo

Es ergibt sich für den Beispielbetrieb ein Gesamtbestand, beschrieben als Großvieheinheiten (GV) von 206 GV. In diesem Betrieb fallen jährlich 3.375 m³ Flüssigmist mit einem durchschnittlichen TS-Gehalt von 11,2% an. Die KTBL-Schrift „Betriebsplanung Landwirtschaft“ beschreibt einen Flüssigmistanfall von 26,34 m³ je Tier*a für Milchkühe der Rasse HF, bei einer Milchleistung von 8500 kg je Tier und Jahr (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft 2018). Diese Angabe beruht jedoch auf einem TS-Gehalt des Flüssigmistes von 7,5%. Daher wurden in die Berechnung zusätzlich 6 m³ Schmutzwasser je Milchkuh und Jahr mit aufgenommen.

Gemäß den Angaben des LAZBW sind bei der Berechnung der anfallenden Menge flüssiger Wirtschaftsdünger immer die Mengen an Wasserzuflüssen vollständig zu berücksichtigen. Dies ist neben dem Reinigungswasser aus dem Stall insbesondere das verunreinigte Niederschlagswasser, das u. a. auf der Fahrsiloanlage oder auf dem Laufhof anfällt. Aufgrund der Wasserzuflüsse schwanken die TM-Gehalte betriebsspezifisch sehr stark. Liegt der TM-Gehalt beispielsweise auf einem mittleren Niveau von 7,5 %, bedeutet das, dass der Gülleanfall anstatt bei 20 m³ (lt. DüV bei einer Milchkuh mit über 8.000 kg Milchleistung bei 11 % TM-Gehalt) bei 29,3 m³ liegt.

Für die Berechnung des Potenzials der Ausgangsstoffe wurden zusätzlich die anfallenden Futterreste sowie die geringen Mengen an Festmist mitberücksichtigt, die auch bei einer einstreulosen Haltung anfallen. Den Berechnungen wurden Futterreste in Höhe von 2,5 % der Futteraufnahme zugrunde gelegt, bei einer Futteraufnahme von 18,7 kg Trockenmasse

(TM) je GV und Tag. Unter diesen Annahmen fallen täglich 385 kg an Futterresten und 412 kg an Festmist an.

5.2. Auslegung und technische Beschreibung der Demetha-Anlage

5.2.1. Ausgangsubstrate und Massenbilanz

Basierend auf dem festgelegten landwirtschaftlichen Modellbetrieb, ergeben sich die in Tabelle 17 dargestellten Substratmengen und darauf aufbauend, die möglichen Methan- und Biogaserträge der zweistufigen Güllekleinanlage.

Tabelle 17 Biogaspotential und Gärrestanfall der zweistufigen Demetha-Anlage

Substrat	FM kg/d	TS %	oTS/TS %	oTS kg/d	SME m ³ /kg oTS	Methan m ³ /d	Biogas m ³ /d	Gärrest kg/d
Flüssigmistanfall	11.220	9	85	881	0,21	184,9	336,2	10.782
Futterreste*	385	25	92	89	0,30	26,6	48,3	322
Festmist**	412	25	85	88	0,24	21,0	38,2	362
Schmutzwasser	1.973	0	0	-	-	-	-	1.973
Summe	13.989			1.057		232,5	422,8	13.440

SME spezifischer Methanertrag
 * Futterreste: TS-Aufnahme, 18,7 kg/GV*d, 2,5% (Fahrsilo und Futtertisch)
 ** Festmistanfall: 2 kg je GV*d

Insgesamt stehen für die Biogaserzeugung 14.000 kg an Frischmasse (FM) zur Verfügung, woraus eine organische Trockenmasse von 1.050 kg/d resultiert, die in der Anlage zu verwerten ist. Unterstellt man die Standard-Methanerträge für die Substrate, ergibt sich ein täglicher Methanertrag von 230 m³, was einem Biogasertrag von ca. 420 m³/d entspricht. Aus der Vergärung fallen täglich ca. 13.440 kg an Gärrest an.

In der Mischung aus Flüssigmist und Schmutzwasser ergeben sich flüssige Einsatzstoffe mit einem TS-Gehalt von etwa 9%, die einen Anteil an Faserstoffen haben, dennoch fließfähig sind. Zu beachten ist das strukturviskose Verhalten des Flüssigmistes, d. h. die Viskosität verringert sich mit steigender Scherrate. Je intensiver der Flüssigmist durchmischt wird, desto höher wird die Fließfähigkeit. Der pH-Wert der Flüssigmist-/Wassermischung sollte üblicherweise zwischen 7,5 und 8,0 liegen.

Ausgehend von einer oTM-Fracht von 1.050 kg pro Tag beruhen die Planungen darauf, dass in dem Fermenter 1 der Anlage ca. 35% dieser Organik abgebaut werden, was ca. 370 kg pro Tag entspricht. Um die biologische Prozessstabilität des Fermenters nicht zu gefährden, sollte die Raumbelastung des Fermenters (organic loading rate (OLR), bezogen auf die zugeführte organische Trockenmasse, maximal 5 kg/(m³*d) betragen. Es ergibt sich

ein notwendiges Fermentervolumen von 75 m³. Aus der täglich zugeführten Frischmasse von 14.00 kg resultiert bei diesem Volumen eine hydraulische Verweilzeit von 6,6 Tagen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die nicht abgebauten Faserstoffe zurück in den Fermenter geführt werden. Damit ist die Verweilzeit der Feststoffe deutlich länger als die der Flüssigkeit.

Tabelle 18 Raumplanung der zweistufigen Anlagen zu Güllevergärung.

Parameter	Wert	Einheit
Tägliche organische Fracht	1.056,80	kg oTS/d
Feststoffabscheidung	35	%
oTS abgeschieden und F1 zugeführt	369,9	kg oTS/d
Maximal OLR im F1	5,0	kg oTS/(m ³ *d)
Volumen	74,0	m ³
Verweilzeit	6,6	d

Zwischen Fermenter 1 und Fermenter 2 ist ein Kantenspaltfilter zur Abscheidung der Faserstoffe installiert. Die Gärsubstrate werden aus dem Fermenter 1 über den Kantenspaltfilter in den Fermenter 2 gepumpt. Damit gelangen nur faserfreie Stoffe in den zweiten Fermenter.

Fermenter 2 ist als Festbettreaktor (Anaerobfilter) ausgeführt, d.h. er ist nahezu vollständig mit Füllkörpern gefüllt. Auf diesen Füllkörpern siedeln die am Biogasprozess beteiligten Mikroorganismen und nehmen die zu verwertende Organik aus der Flüssigkeit auf.

Der Fermenter besteht aus 2 unterschiedlichen Funktionsbereichen: Der eigentliche Anaerobfilter besteht aus einer losen Schüttung an Kunststoff-Füllkörpern (z.B. Bio-Flow 40), die die Oberfläche zur Ansiedlung der Mikroorganismen vergrößert. Gemäß der Kalkulation für den Beispielbetrieb müssen hier 690 kg organische Trockenmasse pro Tag abgebaut werden. Bei einer maximalen Raumbelastung von 10 kg oTS/(m³*d) ergibt sich ein notwendiges Fermentervolumen in diesem Bereich von ca. 70 m³. Bezogen auf die Einsatzstoffmenge von ca. 14 m³/d resultiert im Fermenter 2 eine Verweilzeit von ca. 6 Tagen, die für Festbettreaktoren relativ lang ist (übliche Verweilzeit in der Abwasserreinigung 12 – 72h).

Die Gesamtverweilzeit der flüssigen Phase beträgt damit im System 12,7 Tage. Nicht abgebaute Feststoffe verweilen deutlich länger.

Tabelle 19 Raumplanung Fermenter 2

Parameter	Wert	Einheit
oTS Fermenter 2	686,89	kg oTS d ⁻¹
HRT (min)	3,00	d
Volumen (min)	33,66	m ³
OLR (max)	10,00	kg CSB m ⁻³ * d ⁻¹
Volumen (max)	68,69	m ³
HRT Fermenter 2 (max)	6,12	d
Gesamtverweilzeit	12,72	d

5.2.2. Fermenter 1: CSTR

Anhand der erstellten Massenbilanz und Raumplanung konnten die weiteren Komponenten der geplanten Pilotanlage definiert werden. Daraus ergaben sich nachfolgende technische Anforderungen für den ersten Fermenter der zweistufigen Anlage.

Technische Anforderungen an den Fermenter 1:

- Reaktionsvolumen 80 m³
- Vollständig durchmischbar über ein leistungsfähiges Rührwerk, z.B. durchgehendes Haspelrührwerk bei einem liegenden Fermenter
- Wärmedämmung
- Dom zur Entnahme des Gases
- Anschlussflansch für die Zufuhr der frischen Substrate (ca. DN 150)
- Anschlussflansch für die Abfuhr der vergorenen Substrate (ca. DN 150)
- Strikt anaerobes Milieu. Keine Luftzufuhr, daher keine Kunststoffauskleidung bzw. Ausführung in Edelstahl notwendig.
- Mechanische Über-/Unterdrucksicherung für das produzierte Biogas
- Beheizung des Gärsubstrates entweder über eine innenliegende Heizung (z.B. über die Rührwerkswelle) oder über einen externen Wärmetauscher
- Sensor im Rührwerksdom zur Vermeidung von Überfüllungen
- Sensor im Gärsubstrat oberhalb der Entnahmeleitung zur Vermeidung von Unterfüllungen.
- Die Komponenten sollten auf einen thermophilen Betrieb bei einer Temperatur von 50 - 55 °C ausgelegt sein

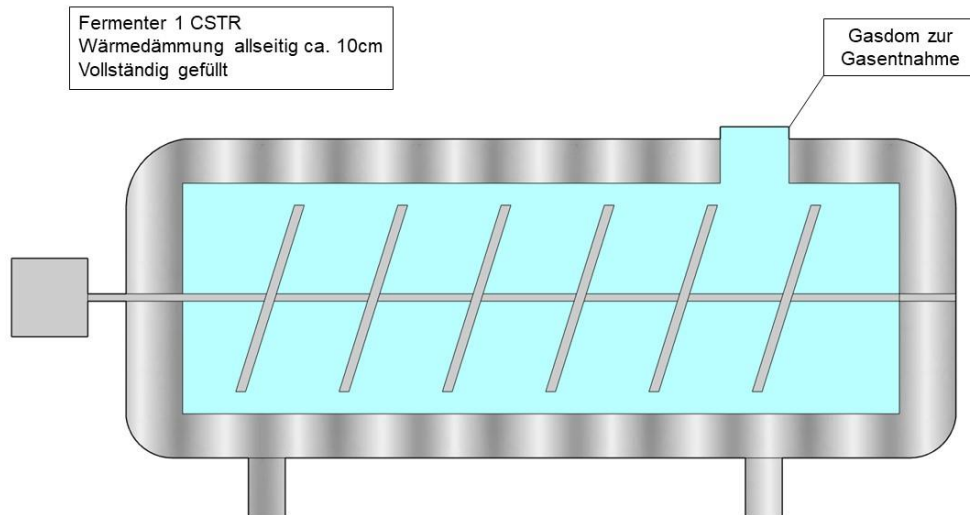


Abbildung 2 Vereinfachtes Schema des ersten Fermenters der 2-stufigen Pilotanlage mit horizontalem Rührwerk.

Auf der Basis dieser Anforderungen wurde ein liegender Fermenter der Fa. STAES ausgewählt (www.staes.com). Hier handelt es sich um eine Komplettlösung mit einem an dem Behälter angepassten Paddelrührwerk mit dem dazugehörigen Motor. Die Raumbelastungsberechnungen der Universität Hohenheim resultierten bei diesem Fermenter in ein notwendiges Behältervolumen von ca. 75 m³. Aufgrund des notwendigen Gasraumes wurde ein Gesamtvolumen von 80 m³ gewählt. Da die Gärungsprozesse im Fermenter 1 strikt unter anaeroben Bedingungen verlaufen, ist bei dem Behältermaterial kein Kunststoff zulässig. Aus diesem Grund und auch wegen der höheren Festigkeit wurde für die Behälterausführung Edelstahl gewählt. Um ganzjährig ein möglichst gleichbleibendes Temperaturniveau im Fermenter erhalten zu können wird der Behälter mit 100 mm Steinwolle isoliert. Die Temperierung des Fermenters wird mit einem in die Innenwand integrierten Wärmetauscher durchgeführt. Um die optimale Substrattemperatur von 50-55°C unabhängig von den Wetterbedingungen zu gewährleisten.

Das im Fermenter befindliche Substrat wird über das horizontal ausgerichtete Paddelrührwerk durchmischt. Dieses ist im Behälter integriert und verläuft über die ganze Länge des Fermenters und an beiden Enden mit einer doppelwirkenden Gleitringdichtung ausgestattet. Zusätzlich kann, um die Substratleckagen nach außen zu vermeiden, ein zusätzlicher Wasserkreislauf zur Schmierung und Druckbeaufschlagung um die Gleitringdichtung aufgebaut werden. Der Wasserkreislauf wird mit einem Mindestdruck von +2 bar über dem Behälterinnendruck betrieben. Das Rührwerk selbst wird von einem 5,5 kW starken Motor angetrieben. Über ein entsprechendes Getriebe, wird die Drehzahl reduziert auf das erforderliche Maß reduziert. Außerdem wird der Motor mit einem

Frequenzumrichter ausgestattet um die gewünschte Drehzahl einzustellen zu können. Dadurch kann eine maximale Geschwindigkeit des Rührwerks von 47 U/min ermöglicht werden.

Der gesamte Fermenteraufbau steht auf vier Füßen und kann im freien auf einer nivellierten Betonplatte aufgestellt werden. Er verfügt über alle notwendigen Rohrstützen zur Produktbeschickung- und Entnahme, sowie für die Messtechnik, einen Dom zur Entnahme des Biogases und eine Revisionsöffnung (Mannloch) 410x510 mm. Der Behälter kann mit einem Überdruck von 15 mBar und einem Unterdruck von -5 mBar (relativ) betrieben werden.

Tabelle 20 Technische Daten von Fermenter 1 in der horizontalen Variante mit durchgehendem horizontalem Rührwerk.

Parameter		Wert	Einheit
Abmessungen	Innendurchmesser	2.900	mm
	Außendurchmesser	3.180	mm
	Zylindrische Länge	12.000	mm
	Höhe des Auslaufs	500	mm
	Gesamthöhe	3.700	mm
	Gesamtlänge	11.100	mm
Volumina	Volumen (136mm unter dem oberen Rand)	80.000	L
	Gesamtvolumen	81.300	L
Arbeitstemperatur	Thermophil	50-55	°C
Druck (relativ)	Überdruck (max.)	15	mBar
	Unterdruck (max.)	5	mBar
Wärmetauscher	Druck	3	bar
	Temperatur	85	°C
	Fläche	18	m ²
Befüllen und Entleeren	Geschwindigkeit	30	m ³ /h
Material	Edelstahl	AISI 304 L (1.4307)	
	Dichtungen	EPDM	
Isolierung	Steinwolle	100	mm

Aufgrund des relativ hohen Preises des Rührwerks (ca. 60.000,-€) im Verhältnis zum Behälterpreis (ca. 90.000,-€), wurde entschieden nach alternativen Rührkonzepten zu prüfen. Als ein potenzieller Lieferant für diese Aufgabe wurde Fa. „Maschinenbau Peters AG“ (www.peters-mixer.com) ausgewählt. Sie ist vor allem auf den Rührwerkbau in der Landwirtschaft und Bioenergie spezialisiert. Jedoch aufgrund der aufwendigen Aufbauweise im horizontalen Behälter und damit verbundenes Risiko zum Biegen der Arbeitswelle, lagen die Beschaffungskosten für dieses Rührwerk noch höher wie die ursprünglich geplanten (Beschaffungspreis = 78.500,-€).

Zur weiteren Kostenreduzierung hat der Lieferant 2 weitere Alternativen vorgestellt (Abbildung 3, 4):

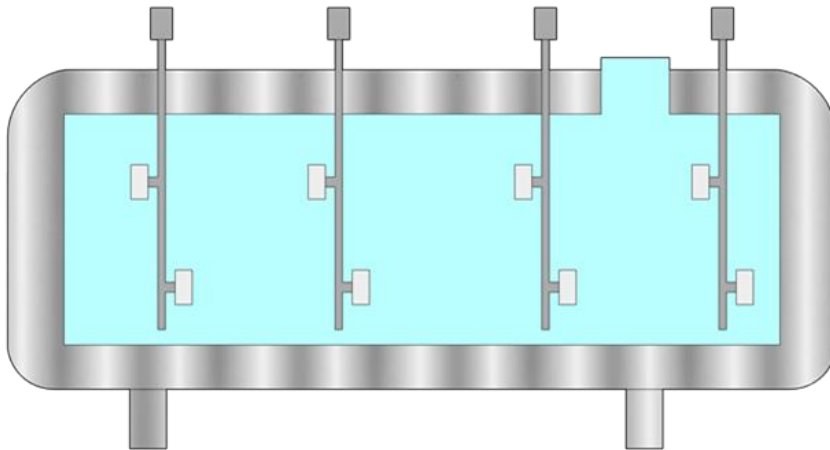


Abbildung 3: Variante liegend mit 4x stehenden Rührwerken nach dem Peters System.

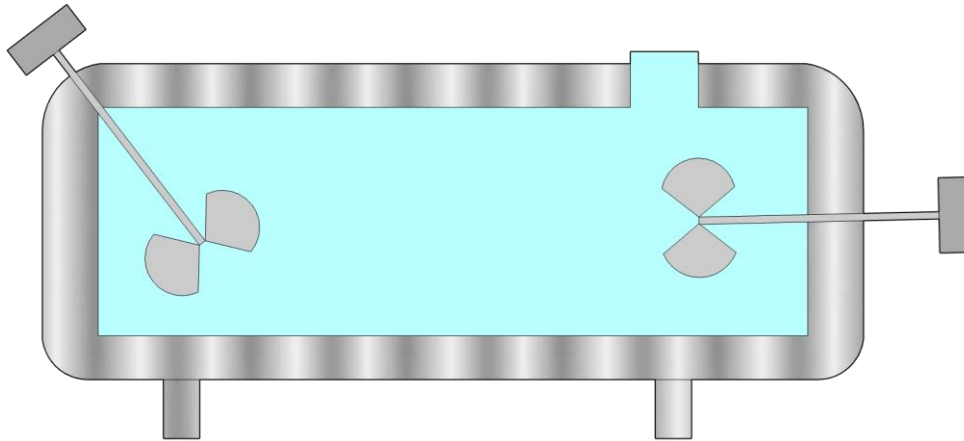


Abbildung 4: Variante liegend mit 2x Stabmixern, Einbau über Wand und Decke möglich.

Dabei belaufen sich die Budgetpreise auf jeweils 48.000,-€ und 30.000,-€. Nach Diskussion im Partnerkreis wurde schließlich, vor allem aus Kostengründen, eine vierte Option mit einem Tauchmotor-Rührwerk gewählt. Der Beschaffungspreis für diese Option wurde auf 20.000,-€ geschätzt.

5.2.3. Fermenter 2: Anaerobfilter

Anhand der erstellten Massenbilanz und Raumplanung konnten die weiteren Komponenten der geplanten Pilotanlage definiert werden. Daraus ergaben sich nachfolgende technische Anforderungen für den Festbettreaktor (Fermenter 2) der zweistufigen Anlage.

Technische Anforderungen an den Fermenter 2:

- Reaktionsvolumen 70 m³ (Festbettschüttung) + 80 cm Festbett in der Gasphase
- Kein Rührwerk. Fermenter ist nahezu vollständig mit den Füllkörpern gefüllt
- Wärmedämmung
- Zufuhr des Gärsubstrates von unten, Entnahme oberhalb des Festbettes
- Anschlussflansch für die Zufuhr der frischen Substrate (ca. DN 150)
- Anschlussflansch für die Abfuhr der vergorenen Substrate (ca. DN 150)
- Luftzufuhr im Bereich der Gasphase, daher im Bereich der Gasphase hochwertige Edelstähle oder Kunststoff / Kunststoffauskleidung notwendig
- Mechanische Über-/Unterdrucksicherung für das produzierte Biogas
- Beheizung des Gärsubstrates entweder über eine Wandheizung oder über einen externen Wärmetauscher (sofern eine Beheizung notwendig ist)
- Sensor zur Füllstandsmessung
- Sensor im Gärsubstrat oberhalb der Zufuhrleitung für die Substrate zur Vermeidung von Unterfüllungen.
- Betriebstemperatur: 50 – 55 °C

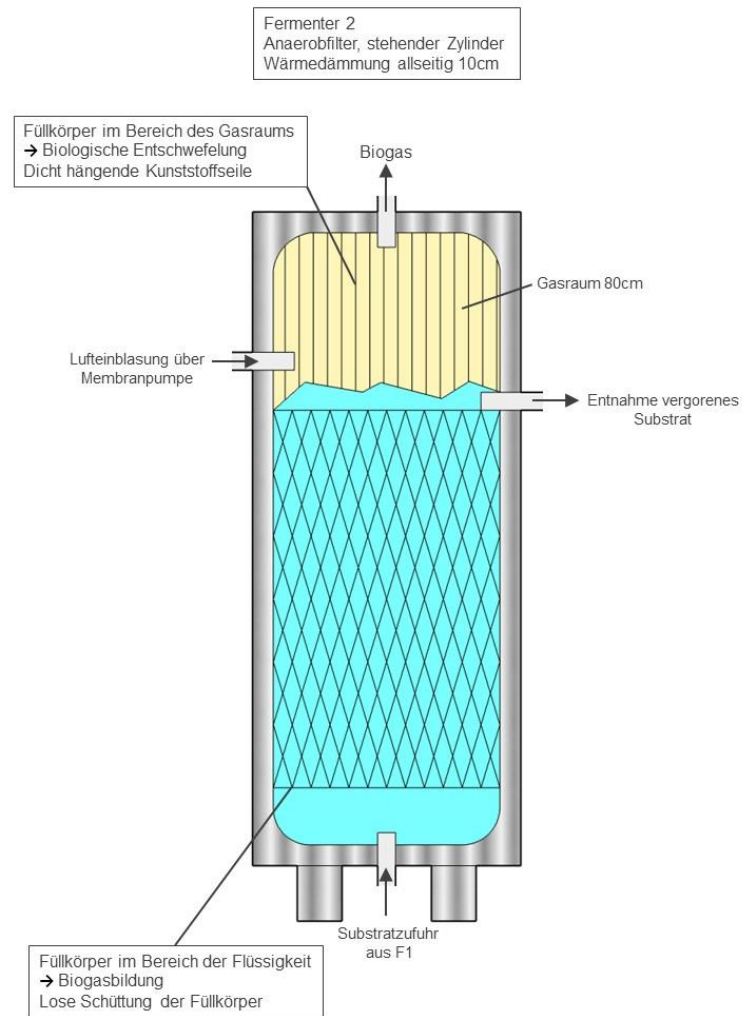


Abbildung 5 Fermenter 2 der zweistufigen Anlage zur Güllevergärung, Ausführung als Festbettreaktor mit Füllkörperschüttung.

Für den zweiten Fermenter wurde auf ein Kunststoffbehälter aus GFK der Fa. Fiberpipе entschieden. Dieser wird im Gegensatz zum Fermenter 1 vertikal aufgestellt. Zum einen bietet das GFK Material einen niedrigeren Preis im Vergleich zum Edelstahl und zum anderen eine höhere chemische Beständigkeit. Vor allem im Gasraum des Behälters ist die chemische Beständigkeit von entscheidender Bedeutung. Da dort die biologische Entschwefelung des Biogases stattfindet. Der Behälter wird zur Außenaufstellung ausgelegt und verfügt über eine 80 mm Isolierung.

Oberhalb der Flüssigphase, in der Gasphase, ist auf einer Höhe von ca. 80 cm – 100 cm ein zweites Festbett angebracht. Dort findet die Entschwefelung durch schwefeloxidierende Bakterien statt. Zu diesem Zweck wird eine kleine Menge an Umgebungsluft mittels einer Membranpumpe in den Gasraum dosiert. Durch den in der Luft enthaltenen Sauerstoff wird das im Biogas befindliche H_2S zu elementarem Schwefel oxidiert. Dieser Bereich ist zusätzlich mit hängenden Nylonseilen aufgefüllt (zweites Festbett). Diese dienen als Lebensraum für die schwefeloxidierende Mikroorganismen Diese wandeln den im Biogas enthaltenen Schwefelwasserstoff in elementarem Schwefel um, der sich im Festbett

ablagert oder mit dem Gärsubstrat aus dem Fermenter ausgetragen wird. Bei dieser biologischen Entschwefelung entsteht jedoch auch Schwefelsäure und schweflige Säure, die den Fermenter in diesem Bereich chemisch angreift. Daher sind für den Fermenter in diesem Bereich entweder hochwertige Edelstähle (1.4571, „V4A“), Kunststoff oder eine Auskleidung mit Kunststoff vorzusehen.

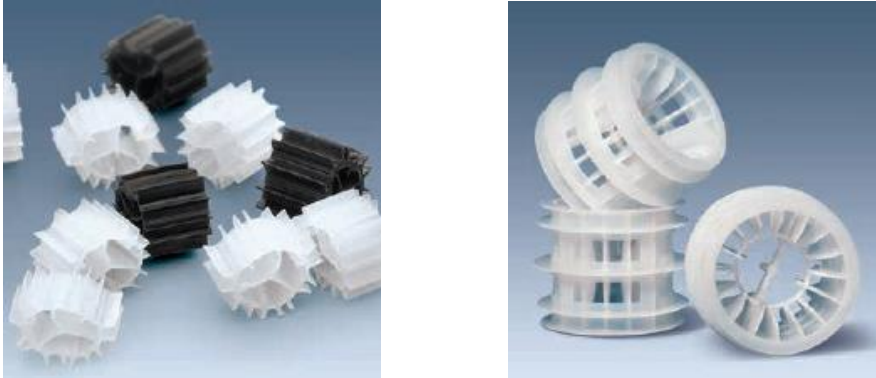


Abbildung 6 Füllkörper „Bioflow“ (RVT Process Equipment GmbH).

Nach der ersten Auslegung wurde der Behälter mit einem Fassungsvermögen von 70 m³ angefragt. Der Preis für diese Ausführung betrug in dieser Ausführung ca. 55.000,-€. Nach weiteren Optimierungsmaßnahmen und der Neuberechnung der Raumbelastung, wurde das Arbeitsvolumen auf 55 m³ reduziert. Damit reduzierte sich der Preis auf ca. 45.000,-€. Zusätzlich wird mit der Verringerung des Nennvolumens auch das Volumen der Füllkörper reduziert, was zur weiteren Reduzierung der Kosten beiträgt. Die Füllkörper werden mit einem Preis von ca. 300 €/m³ angeboten. Damit wird hier mit einem Ersparnis von ca. 4.500 € gerechnet. Die Füllkörper dienen als Siedlungsfläche für die Mikroorganismen und zur Erhöhung der spezifischen Oberfläche im Fermenter.

Nachfolgend sind die technischen Rahmendaten von Fermenter 2 dargestellt:

- Harzsystem: Vinylesterharz 411-350 auf Bisphenol-A-Basis
- Innenlayer: Chemieschutzschicht CSS 2,5 mm
- Außenlayer: UV-Schutz
- Füllmedium: Gärsubstrat / Biogas
- Behälterdurchmesser: innen Ø 3.000 mm
- Ausführung: Klöpperboden beidseitig
- Aufstellung: auf Standbeinen
- Aufstellung: Vertikal im Freien
- Betriebstemperatur: + 50°C / + 55°C
- Betriebsdruck: Überdruck: max. 7mbar / Unterdruck: max. 2,5mbar
- Länge: ca. 8.500 mm Zylinder

- Volumen: ca. 60 m³
- Farbe: Natur
- Isolierung: 80 mm Steinwolle
- Ausrüstung: Mannloch DN600 mit Blinddeckel
- Flanschanschlussmaße: DIN EN 1092 PN10
- Inkl. alle notwendige Stutzen und Anschlüsse.

5.2.4. Gasspeicher

Nachfolgende Anforderungen wurden für die Auslegung des Gasspeichers verwendet:

- Geeignete PE bzw. PVC Gewebefolie (Temperatur, UV-beständig, gasundurchlässig)
- Ausführung als hängender Gasspeicher
- Hart-Verdrahteter Unterdruck-Abschalter zur Sicherung des BHKW
- Druckmessung zur Regelung / Steuerung des BHKW

Zu diesem Zweck wurden mehrere Lieferanten mit unterschiedlichen Ausführungen angefragt. Nachfolgend sind diese mit dem jeweiligen Angebotspreis aufgelistet (Tabelle 22).

Tabelle 21 Auflistung unterschiedlicher Ausführungen und Angebote für einen Gasspeicher zur flexiblen Bereitstellung von Strom durch die zweistufige Demetha-Anlage.

Lieferant	Beschreibung	Angebotspreis
Ennox GmbH	Gasspeicher (Stahlsilo mit eingehängtem Gassack)	79.768 €
Lipp GmbH	Gasspeicher (Stahlsilo mit eingehängtem Gassack)	80.201 €
Lipp GmbH	Gasspeicherfüllstandsmessung (Radar-Gasfüllstandssensor)	5.381 €
Environtec GmbH	Doppelmembrangasspeicher (ähnlich Tragluftdach)	33.800 €
Baur Folien GmbH	Doppelmembrangasspeicher D10,5m / H5m	30.370 €
Baur Folien GmbH	Doppelmembrangasspeicher D12,5m / H4m	25.770 €
Baur Folien GmbH	Foliengasspeicher Zylinderform D7mxH7,6m	9.555 €
Agrotel GmbH	Foliengasspeicher Zylinderform D6mxL9m	9.435 €
HUESKER Synthetic GmbH	Doppelmembrangasspeicher D9m / H6,5m (ähnlich Tragluftdach)	35.000 €
HUESKER Synthetic GmbH	Überdrucksicherung für Doppelmembrangasspeicher	4.000 €
Bieri Tenta AG	Gasspeicherballon Zylinderform D5,7mxL11,4m	16.800 €
Bieri Tenta AG	Stahlrohrrahmen zur Deckenmontage Gasspeicherballon + Überdruckventil	3.800 €

Im Hinblick auf das gute Preis-Leistungsverhältnis entschied man sich für einen Doppelmembrangasspeicher der Fa. Baur.

Nachfolgend sind die technischen Daten dargestellt. Der Doppelmembrangasspeicher bestehend aus:

- Gasspeicherfolie PE LD, schwarz
- Wetterschutzmembran aus PES-Gewebe beidseitig PVC-beschichtet
- Tragluftgebläseset ATEX-Ausführung, mit Zubehör
- Bodenabdichtung mit PELD für den Gasraumabschluss nach unten, mit Schutzvliesvlieslage
- inkl. Einbindung von 2 Standardanschlüssen DN150
- Füllstandsanzeige mit Sensor-Signal 4-20 mA, ATEX-Ausführung, mit Beruhigungssystem
- Befestigung mit Edelstahl-Flachprofil, (Klemmung erfolgt auf dem Betonringfundament)

- ohne Service-Schächte oder ähnliche Einbauten
- Auslegung: Betriebsdruck +3,5 mbar, -1,0 mbar, max. Gasdruck +5,0 mbar, max. Gasentnahme von 300m³/h (erweiterbar)
- Gasvolumen: 245 m³
- Kugelkappenform Höhe = 1/3 D
- Durchmesser: 12,5 m
- Höhe: ca. 4,0 m



Abbildung 7 Fundament externer Gasspeicher (Baur Folien GmbH)



Abbildung 8 Aufgebauter externer Gasspeicher (Baur Folien GmbH)

5.2.5. Technische Beschreibung der Gesamtanlage

Anhand der technischen Auslegung und der Festlegung auf zentrale Anlagenkomponenten wurde für die Demetha-Anlage ein Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild erstellt (Abbildung 3). Anhand der Abbildung 9 wird die Funktionsweise der Anlage beschrieben und einzelne Prozessschritte im Detail erläutert.

Zufuhr von Gülle und Feststoff

Die Gülle wird über die Pumpe P1 (z.B. Exzenter-Schneckenpumpe) aus der Vorgrube angesaugt und über einen Gegenstrom-Wärmetauscher in den Fermenter 1 gefördert. Gleichzeitig fließt vergorenes Material (Effluent) aus dem Fermenter 2 über den Gegenstrom-Wärmetauscher ab, so dass die darin enthaltene Wärme partiell zurückgewonnen werden kann. Feststoffe werden über eine Rachenpumpe, die mit einem kleinen Vorratsbehälter oberhalb der Schnecke ausgerüstet ist, direkt in den Güllestrom gefördert.

Fermenter 1

Im Fermenter 1 wird das Gärsubstrat mit einem Rührwerk durchmischt. Die Beheizung des Substrates kann über eine beheizte Rührwerkswelle erfolgen. Das gebildete Biogas wird über einen Gasdom entnommen und dem Gasspeicher zugeführt, bzw. in den Fermenter 2 geleitet. Der Fermenter wird mit einer mechanischen Über- und Unterdrucksicherung geschützt. Ein Überfüllsensor verhindert die Überfüllung, ein zweiter Sensor die Unterfüllung und gleichzeitig die Füllstandsmessung. V-02 ermöglicht in Kombination mit V-02 und P1 das Abführen von Sedimenten aus Fermenter 1. Die Temperatur wird mit Hilfe eines Temperatursensors geregelt. Die Beheizung erfolgt mit der Abwärme des BHKW.

Mit der Pumpe P2 wird während der Befüllung über P1 die gleiche Menge an Substrat aus dem Fermenter 1 entnommen und über den Kantenspaltfilter in den Fermenter 2 gefördert. Im Kantenspaltfilter werden die nicht abgebauten Faserstoffe abgetrennt. Steigt die Druckdifferenz vor und hinter dem Filter über einen festgelegten Wert, ist der Filter vollständig belegt und dieser muss gespült werden. Dazu werden V-07 und V-08 geschlossen und V-06 geöffnet, so dass die Faserstoffe mit der Pumpe P2 zurück in den Fermenter 1 gefördert werden.

Fermenter 2

Fermenter 2 wird im Up-Flow-Verfahren von unten beschickt. Die Flüssigkeit durchströmt dabei das Festbett und die gelösten organischen Verbindungen werden von den Mikroorganismen verwertet. Über einen freien Überlauf fließt das vergorene Material ab. Der Fermenter 2 ist über V-09 auch saugseitig an die P2 angebunden, so dass über V-08 ein Zirkulieren des Inhaltes und ein Umkehren der Fließrichtung zum Lösen von Verstopfungen möglich ist. Zwei Sensoren verhindern die Über- und Unterfüllung des Fermenters.

Oberhalb der Flüssigphase ist im Fermenter 2 ein zweites Festbett bestehend aus Nylonseilen angebracht. Hier siedeln schwefeloxidierende Bakterien, die den im Biogas enthaltenen Schwefelwasserstoff in elementaren Schwefel umwandeln. Dazu wird

Umgebungsluft über eine kleine Membranpumpe in den Fermenter eingetragen was ca. 5 % der gebildeten Biogasmenge entspricht.

Der Fermenter wird mit einer mechanischen Über- und Unterdrucksicherung geschützt. Auch in Fermenter 2 werden über Füllstandsensoren eine Über- oder Unterfüllung des Fermenters verhindert. Gleichzeitig wird auch hier die Temperatur im Fermenter durch einen Temperatursensor überwacht.

Gasspeicher

Aus dem Fermenter 2 strömt das Biogas in den externen Gasspeicher. Das sich im Gasspeicher bildende Kondensat kann über einen Siphon zurück in den Fermenter 1 geführt werden. Der Gasspeicher ist mit einem Drucksensor zur Regelung des BHKW sowie mit einem Unterdruckschalter ausgestattet.

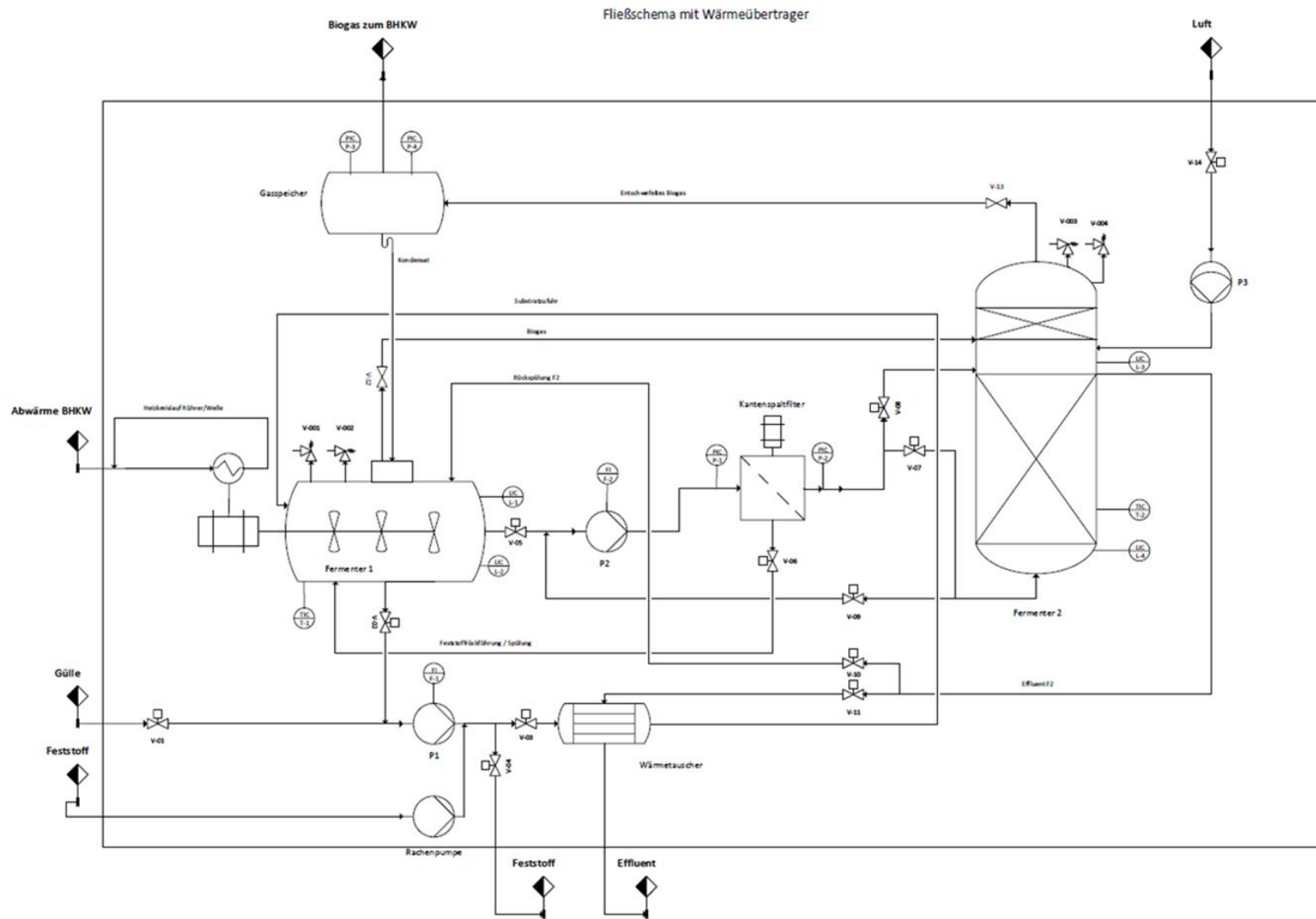


Abbildung 9 Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild der zweistufigen Anlage zur Güllevergärung

5.3. Technische Analyse der Güllevergärung in zweistufigen Kleinanlagen

5.3.1. Strom und Wärmebilanz

Für ein 50 kW BHKW und eine zugrunde gelegte Laufzeit von 16 h bei einem Wirkungsgrad von 35%_{el} und 50%_{th} ergeben sich tägliche Strommengen von 821 kWh/d und Wärmemengen von 1.155 kWh/d. Bei einem Eigenstrombedarf von 10% steht ein täglicher Stromüberschuss von 739 kWh/d zur Verfügung. Über das gesamte Jahr werden somit 296.610 kWh Strom produziert und stehen 269.610 kWh zur Einspeisung zur Verfügung.

Tabelle 22 Auslegung BHKW einschließlich Strom- und Wärmeertrag.

Parameter	Wert	Einheit
Methanertrag	232,52	m ³ d ⁻¹
Energiegehalt	2318,45	kWh d ⁻¹
Wirkungsgrad BHKW	elektrisch 35,4	%
	thermisch 49,8	%
Strom	820,73	kWh d ⁻¹
Wärme	1.154,59	kWh d ⁻¹
Laufzeit BHKW	16,25	h d ⁻¹
Leistung BHKW	50,51	kW _{el.}

Im Hinblick auf den Wärmebedarf muss der Jahreszeitenwechseln in die Betrachtungen aufgenommen werden, um eine Unterversorgung mit Wärme in den Wintermonaten zu vermeiden. Die ist vor allem im Bereich der Güllekleinanlagen wichtig, da ein Großteil der produzierten Wärme für das Erhitzen der eingesetzten Substrate benötigt wird. Deshalb wurde ein zusätzliches Szenario mit Wärmerückgewinnung über einen Wärmetauscher berechnet. Dabei wurde der Berechnung eine theoretische Einsparung von 40% für das Erhitzen der eingesetzten Substrate zugrunde gelegt. Abbildung 10 zeigt den theoretischen täglichen Wärmebedarf, Wärmeproduktion und den Wärmeüberschuss für beide Szenarien. Durch eine mögliche Wärmerückgewinnung könnte auch in den Wintermonaten ein theoretischer Wärmeüberschuss zur Verfügung stehen. Allerdings ist der Wärmeüberschuss durch eine Rückgewinnung ein rein theoretischer Wert. Der Ansatz und das Gesamtverfahren müssen sich noch im praktischen Einsatz als funktionsfähig und sinnvoll erweisen. Außerdem wurden die Berechnungen mit durchschnittlichen Monatstemperaturen durchgeführt, sodass Temperaturschwankungen und Extremwetterereignisse nicht berücksichtigt wurden.

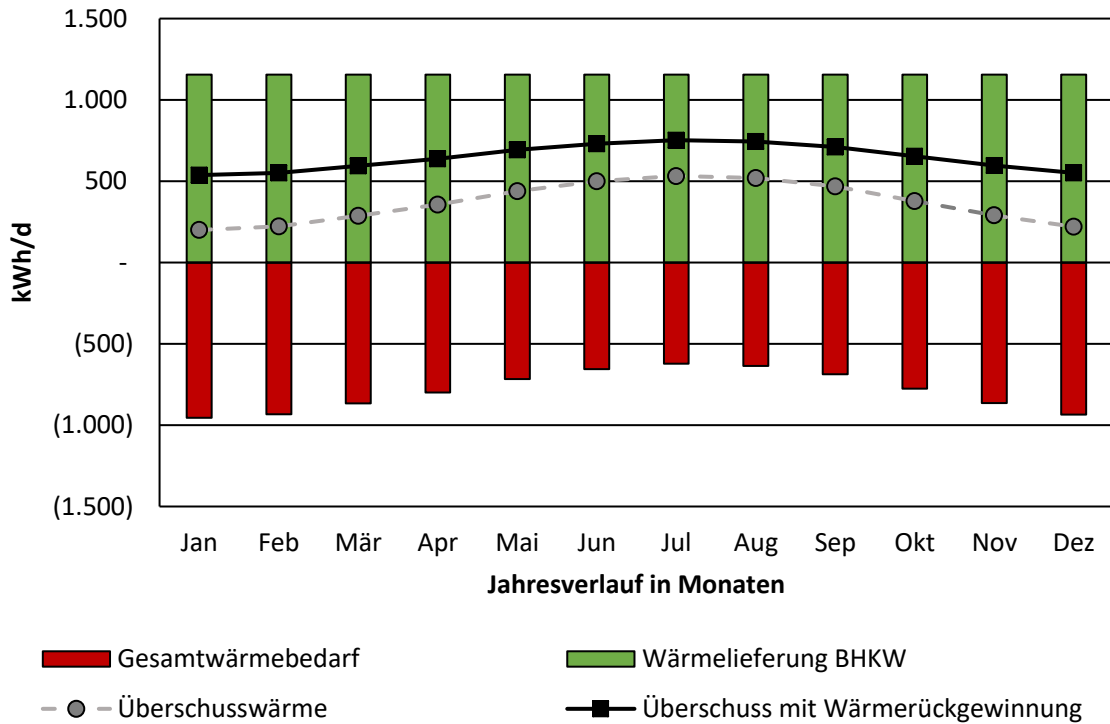


Abbildung 10 Wärmeproduktion und Eigenwärmebedarf mit theoretischem Wärmeüberschuss sowohl mit als auch ohne Wärmerückgewinnung im Jahresverlauf.

5.3.2. Gesamtkonzept „Energie und Effizienz“

Ein Gesamtkonzept zur Energienutzung muss auf die jeweiligen technischen und baulichen Voraussetzungen individuell abgestimmt werden. Da sich die einzelnen landwirtschaftlichen Betriebe teils erheblich voneinander unterscheiden und damit sehr ungleiche Anforderungen an die Eigenwärme- und Stromnutzung und -bereitstellung stellen. Aber es kann davon ausgegangen werden das gerade in den Wintermonaten ein hoher Wärmebedarf vorherrscht der nicht vollständig durch die Überschusswärme einer Güllekleinanlage gedeckt werden kann und somit eine Wärmerückgewinnung aus dem Gärrest erforderlich ist.

5.4. Wirtschaftlichkeit der Güllevergärung in zweistufigen Kleinanlagen

5.4.1. Investitionskosten

Nachfolgend werden die Anlagenkalkulationen und deren Optimierungsverlauf dargestellt. Es ist zu vermerken, dass die ausgeführten Kosten allein die Selbstkosten der Fa. Natec (Stand 2021) darstellen.

In der ersten Kalkulation sind die Komponenten erster Wahl ausgeführt. Nach der Erstellung wurde jedoch festgestellt, dass allein die Summe der Gesamtkosten der gewählten Komponenten sehr stark von einem realistischen Verkaufspreis, welcher eine grundlegende Wirtschaftlichkeit einer solchen zweistufigen Güllekleinanlage gewähren würde (ca. 520.000 €), abweicht.

Tabelle 23 Investitionskostenaufstellung der zweistufigen Biogaspilotanlage.

Fermenter 1 = CSTR / 80m³			
STAES Edeltank 304L (1.4307) Di 2,9m x L 12,0m	90.100,00 €	1	90.100,00 €
STAES Rührwerk	59.227,00 €	1	59.227,00 €
STAES Rührwerksbeölung Wellenabdichtung	4.137,00 €	1	4.137,00 €
Container für Technik			
See- bzw. Lagercontainer 20 Fuß neu	3.300,00 €	2	6.600,00 €
Fermenter 2 = Festbettreaktor / 70m³			
Fiberpiepe Vinylesterharz 411-350 Di=3m x L11,3m (stehend)	55.435,00 €	1	55.435,00 €
Festbett Flüssigkeit Fermenter 2			
RVT - Bioflow 40 (ca. 280, -€/m ³ bei 70m ³)	20.000,00 €	1	20.000,00 €
Festbett Gasraum Fermenter 2			
Nylonseil von der Decke hängend	5.000,00 €	1	5.000,00 €
Filter			
MTS Apic Kantenspaltfilter AS175-Einarm	8.620,00 €	2	17.240,00 €
Substratwärmetauscher			
Doppelrohrwärmetauscher DN150	33.070,00 €	1	33.070,00 €
Pumpe 1			
Wangen Pumpen KL50S 101.0 / 5,5kW DN150	5.392,80 €	1	5.392,80 €
Rachenpumpe			
Seepex Trichterpumpe BTEX 70-12R / 4kW DN150	25.785,00 €	1	25.785,00 €
Pumpe 2			
Wangen Pumpen KL50S 101.1/5,5kW DN150	5.910,40 €	1	5.910,40 €
Pumpe 3			
Membranpumpe	600,00 €	1	600,00 €

Rohrleitungen			
Rohrleitung DN150, inkl. Fittings, [lfm] PE100	35,00 €	100	3.500,00 €
Rohrleitung DN25, inkl. Fittings, Messing [lfm]	10,00 €	200	2.000,00 €
Ventile			
Stoffschieberventil ZFA hand DN150	207,00 €	1	207,00 €
Stoffschieberventil ZFA pneum. DN150	306,00 €	9	2.754,00 €
Absperrklappe ZFA hand DN150 (DVGW)	103,20 €	2	206,40 €
Absperrklappe ZFA pneum. DN150 (DVGW)	224,80 €	1	224,80 €
Absperrschieber Messing 1/2"-2"	20,00 €	20	400,00 €
Steuerkomponenten / Elektrik			
Leistungsschrank	8.000,00 €	1	8.000,00 €
Steuerschrank	8.000,00 €	1	8.000,00 €
Temperaturfühler	250,00 €	4	1.000,00 €
Druckmessung	450,00 €	4	1.800,00 €
Durchflussmessung	1.300,00 €	2	2.600,00 €
Füllstandsmessung kont.	800,00 €	2	1.600,00 €
Grenzwertgeber	350,00 €	2	700,00 €
Gasspeicher ca. 240m³			
Bauer Doppelmembrangasspeicher D12,5m / H4m (ähnlich Tragluftdach)	25.770,00 €	1	25.770,00 €
Gasfackel			
Gasfackel	7.000,00 €	1	7.000,00 €
BHKW 50kW el			
2G Container BHKW (Gas-Ottomotor 50kWel / 70kWtherm)	149.721,30 €	1	149.721,30 €
2G Gasaufbereitung	28.098,15 €	1	28.098,15 €
Summe Material			572.079, - €
Gesamt Selbstkosten Natec			831.960, - €

Nach einigen Optimierungsmaßnahmen, auch in der Kooperation mit der Universität Hohenheim und Renergie Allgäu e.V. war es möglich die benötigten Investitionskosten zu reduzieren. Die geänderten Positionen gegenüber der ersten Kostenschätzung sind in Tabelle 25 dargestellt und rot markiert.

Folgende Maßnahmen wurden getroffen:

- Anstelle des aufwendigen und teuren Paddelrührwerks entschied man sich für ein Tauchmotorrührwerk.
- Das Volumen des Fermenters 1 wurde aufgrund der Neuberechneten Raumbelastung reduziert.
- Das Volumen des Füllkörperfestbetts in Fermenter 2 wurde reduziert.

- Anstelle der 2 Kantenspaltfilter im Redundant-Betrieb entschied man sich für einen einzelnen Kantenspaltfilter.
- Ein großes Einsparpotential wurde mit einem neuen BHKW-Lieferanten erzielt.
- Die Gesamtstunden für die Anlagenherstellung wurden halbiert.

Tabelle 24 Optimierte Investitionskostenkalkulation der zweistufigen Biogaspilotanlage.

Fermenter 1 = CSTR / 80m³			
STAES Edeltank 304L (1.4307) Di2,9m x Li12,0m	90.100,00 €	1	90.100,00 €
Tauchmotor-RW	20.000,00 €	1	20.000,00 €
Container für Technik			
See- bzw. Lagercontainer 20 Fuß neu	3.300,00 €	2	6.600,00 €
Fermenter 2 = Festbettreaktor / 55 m³			
Fiberpiepe Vinelesterharz 411-350, Di= 3 m x L= 8,5 m, Vertikal im Freien	45.500,00 €	1	45.500,00 €
Festbett Flüssigkeit Fermenter 2			
RVT - Bioflow 40 (ca. 280,-€/m ³ bei 70m ³)	15.400,00 €	1	15.400,00 €
Festbett Gasraum Fermenter 2			
Nylonseil von der Decke hängend	5.000,00 €	1	5.000,00 €
Filter			
MTS Apic Kantenspaltfilter AS175-Einarm	8.620,00 €	1	8.620,00 €
Substratwärmetauscher			
Substratheizer DN150 inkl. Isolierung	33.070,00 €	1	33.070,00 €
Pumpe 1			
Wangen Pumpen KL50S 101.0 / 5,5kW DN150	5.392,80 €	1	5.392,80 €
Rachenpumpe, Schneckenbeförderer			
Wangen Pumpen	24.000,00 €	1	24.000,00 €
Pumpe 2			
Wangen Pumpen KL50S 101.1/5,5kW DN150	5.910,40 €	1	5.910,40 €
Pumpe 3			
Membranpumpe	600,00 €	1	600,00 €
Rohrleitungen			
Rohrleitung DN150, inkl. Fittings, [lfm] PE100	35,00 €	100	3.500,00 €
Rohrleitung DN25, inkl. Fittings, Messing [lfm]	10,00 €	200	2.000,00 €
Ventile			
Stoffschieberventil ZFA hand DN150	207,00 €	1	207,00 €
Stoffschieberventil ZFA pneum. DN150	306,00 €	9	2.754,00 €
Absperrklappe ZFA hand DN150 (DVGW)	103,20 €	2	206,40 €
Absperrklappe ZFA pneum. DN150 (DVGW)	224,80 €	1	224,80 €
Absperrschieber messing 1/2"-2"	20,00 €	20	400,00 €

Steuerkomponenten / Elektrik			
Leistungsschrank	8.000,00 €	1	8.000,00 €
Steuerschrank	8.000,00 €	1	8.000,00 €
Temperaturfühler	250,00 €	4	1.000,00 €
Druckmessung	450,00 €	4	1.800,00 €
Durchflussmessung	1.300,00 €	2	2.600,00 €
Füllstandsmessung kont.	800,00 €	2	1.600,00 €
Grenzwertgeber	350,00 €	2	700,00 €
Gasspeicher ca. 240m³			
Bauer Doppelmembrangasspeicher D12,5m / H4m (ähnlich Tragluftdach)	25.770,00 €	1	25.770,00 €
BHKW 50kW el			
2G Gasaufbereitung	28.098,15 €	1	28.098,15 €
Hagl, BHKW 50 kW nackt	42.100,00 €	1	42.100,00 €
Hagl, 5m Container für BHKW 50 kW	29.000,00 €	1	29.000,00 €
Hagl, Zubehör	5.008,00 €	1	5.008,00 €
Summe Material			423.162, - €
ges. Stunden			340
Gesamt Selbstkosten Natec			603.780, - €

Trotz des enormen Ersparnis gegenüber der ersten Kalkulation sind wir von dem Ziel-Verkaufspreis von ca. 520.000 € sehr entfernt.

Zum preislichen Vergleich des zweistufigen Konzepts mit dem klassischen 1-stufigen Biogasverfahren wurde ein Richtpreisangebot über einen kompletten Fermenter beschafft. Dieser wurde in die aktuellen Kostenkalkulation anstelle der zwei Fermenter mit der dazugehörigen Peripherie integriert. Die nachfolgende Aufstellung in Tabelle 26 zeigt das Ergebnis dieses Vergleichs.

Tabelle 25 Vergleich der Investitionskosten des Konzepts der zweistufigen Biogaspilotanlage zur Güllevergärung mit einem klassischen Verfahrenskonzept.

Container für Technik			
See- bzw. Lagercontainer 20 Fuß neu	3.300,00 €	2	6.600,00 €
Substratwärmetauscher			
Substratheizer DN150 inkl. Isolierung	33.070,00 €	1	33.070,00 €
Pumpe 1			
Wangen Pumpen KL50S 101.0 / 5,5kW DN150	5.392,80 €	1	5.392,80 €
Rachenpumpe, Schneckenbeförderer			
Fluiteco (San Marino) Schneckenförderer CCS400	24.000,00 €	1	24.000,00 €
Pumpe 2			
Wangen Pumpen KL50S 101.1/5,5kW DN150	5.910,40 €	1	5.910,40 €
Rohrleitungen			
Rohrleitung DN150, inkl. Fittings, [lfm] PE100	35,00 €	100	3.500,00 €
Rohrleitung DN25, inkl. Fittings, Messing [lfm]	10,00 €	200	2.000,00 €
Ventile			
Stoffschieberventil ZFA hand DN150	207,00 €	1	207,00 €
Stoffschieberventil ZFA pneum. DN150	306,00 €	3	918,00 €
Absperrklappe ZFA hand DN150 (DVGW)	103,20 €	2	206,40 €
Absperrschieber Messing 1/2"-2"	20,00 €	20	400,00 €
Steuerkomponenten / Elektrik			
Leistungsschrank	8.000,00 €	1	8.000,00 €
Steuerschrank	8.000,00 €	1	8.000,00 €
Temperaturfühler	250,00 €	4	1.000,00 €
Druckmessung	450,00 €	2	900,00 €
Durchflussmessung	1.300,00 €	2	2.600,00 €
BHKW 50kW el			
2G Gasaufbereitung	28.098,15 €	1	28.098,15 €
Hagl, BHKW 50 kW nackt	42.100,00 €	1	42.100,00 €
Hagl, 5m Container für BHKW 50 kW	29.000,00 €	1	29.000,00 €
Hagl, Zubehör	5.008,00 €	1	5.008,00 €
Fermenter 1-stufig			
Weltec Fermenter 843m ³	195.000,00 €	1	195.000,00 €
Bodenplatte Fermenter	27.000,00 €	1	27.000,00 €
abzgl. Marge aus dem Angebot-Weltec	geschätzt	10%	- 19.500,00 €
Summe Material			409.411 €
ges. Stunden			340
Gesamt Selbstkosten Natec			581.463 €

5.4.2. Betriebskosten

Die jährlichen Kosten der Demetha-Anlage setzen sich aus variablen Kosten und fixen Kosten zusammen. Die variablen Kosten belaufen sich für diese Anlagenkombination auf insgesamt 30.728 €/a. Den größten Anteil haben die Kosten für Betriebsstoffe mit 19.994 € und für Wartungen und Reparaturen mit 10.334 €. Die Höhe der Kosten für Betriebsstoffe basiert auf Standardwerten des KTBL für etablierte Güllekleinanlagenkonzepte. Im Falle der Wartungskosten wurden 4% der Investitionskosten der Anlagentechnik als jährliche Kosten angenommen. Neben den Kosten für Betriebsstoffe und Wartungskosten, ist ein weiterer typischer Kostenpunkt die Substratbereitstellung. Für die Demetha-Anlage wurden keine Substratbereitstellungskosten angenommen da die Gülle und Reststoffe ohnehin auf dem Betrieb anfallen und im Fall der Gülle, diese direkt aus dem Güllelagerbehälter in die Anlage gefüttert wird und im Fall der Futterreste, diese ohnehin aus dem Stall abtransportiert oder entsorgt werden müssen und daher angenommen wurde das kein zusätzlicher Aufwand erforderlich ist.

Im Hinblick auf die fixen Kosten mit 70.755 €/a, machen diese größten Anteil an den jährlichen Aufwendungen aus. Diese setzen sich aus der Summe an Abschreibungen mit 51.669 €, dem Zinssatz mit 6.459 €, nötigen Versicherungen mit 2.705 € und Arbeitskosten in Höhe von 9.923 € zusammen. Die Summe an Abschreibungen lässt sich noch in Abschreibungen für Technik (32.293 €) und Abschreibungen für Gebäude (19.376 €) unterteilen. Für die Zinskosten wurde ein Zinssatz von 2% angenommen und eine Abschreibungsdauer von 20 Jahren für Gebäude und 8 Jahren für die Anlagentechnik.

5.4.3. Einnahmen aus Strom und Wärmeverkauf

Die Gesamteinnahmen setzen sich aus der eingespeisten Strommenge und der verkauften Wärmemenge zusammen. Der Erlös aus dem Stromverkauf wird dabei über den Vergütungssatz für Strom aus Güllekleinanlagen mit einem Gülleanteil >80% und der eingespeisten Strommenge berechnet. Die Stromvergütung aus einer reinen Güllevergärung liegt dabei aktuell bei 23,14 ct/kWh. Zusammen mit der eingespeisten Strommenge von 269.610 kWh/a, ergibt sich ein Erlös für die eingespeiste Strommenge von 62.388 €/a. Wobei ein Eigenstrombedarf von 10% an der produzierten Gesamtstrommenge von 299.567 kWh angenommen wurde.

Für den Wärmeverkauf wurde eine Vergütung von 5,5 ct/kWh Überschusswärme angesetzt. Daraus ergibt sich bei einem Wärmeüberschuss der Demetha-Anlage von 108.591 kWh/a, ein Jahreserlös von 5.808 €. Der Wärmeüberschuss.

5.4.4. Zusammenfassung und Vergleich der Kosten und Erträge

Vergleicht man die möglichen jährlichen Erlöse aus der Stromeinspeisung und dem Wärmeverkauf mit den anfallenden jährlichen Kosten, so ergibt sich ein Jahresdefizit von 30.787 € und Kosten für die Stromerzeugung von 37,92 ct/kWh. Stellt man diese Werte vergleichbaren Anlagenkombinationen (Modelle I und II) in Tabelle 27 gegenüber liegen die Kosten der Stromerzeugung mit der Demetha-Anlage 42% über den Stromerzeugungskosten von Modellanlage I und 76% über den Stromerzeugungskosten von Modellanlage II. Obwohl die jährlichen Gesamtkosten geringer ausfallen, reicht diese Einsparung nicht aus um die niedrigeren Stromerlöse aufzuwiegen. Aufgrund des geringeren Substrataufkommens und einer geringeren installierten elektrischen Leistung fällt auch die Stromproduktion geringer aus und drängt damit die spezifischen Kosten in die Höhe. Gleiches gilt auch für die spezifischen Investitionskosten, welche mit $12.917 \text{ €/kW}_{\text{el}}$ P_{inst} deutlich über den spezifischen Investitionskosten anderer Güllekleinanlagen liegen. Allerdings ist für das Demetha-Anlagenkonzept zu berücksichtigen, dass es sich um eine Pilotanlage handelt und Produktions- und Kostenoptimierungen noch nicht zum Tragen kommen. Nichtsdestotrotz, müssen, um eine Wirtschaftlichkeit des Demetha-Anlagenkonzeptes zu erreichen weitere Einsparungen ermöglicht werden. Dies könnte unter anderem über einen hohen Grad an Standardisierung und eine Serienfertigung erreicht werden. Vor allem für die Fermenter, welche den größten Kostenblock darstellen, sind durchaus Einsparungen durch Standardisierung und Serienfertigung im Bereich von 30-40% im Vergleich zum angefragten Preis denkbar.

Tabelle 26 Übersicht der Kennwerte der Demetha-Anlage und Vergleich mit zwei Güllekleinanlagen (75kW) als Modellanlagen mit reiner Gülle-/Festmistvergärung (Modell II), mit einem Gülle und Maissilage Substratmix (Model I) und einer flexibel betriebenen Anlage mit einem Gülle/Maissilage Substratmix und einer Bemessungsleistung von 500kW (Modell III).

Kennwert	Einheit	Modell I	Modell II	Modell III	Demetha-Anlage
installierte Leistung	kW _{el}	75	75	1.000	50
Bemessungsleistung	kW _{el}	68	68	500	34
Eingesetzte Substrate					
Rindergülle	t FM/a	3.300	3.500	10.000	4.095
Rindermist	t FM/a		1.970		150
Maissilage ¹⁾	t FM/a	790		7.750	
Futterreste	t FM/a				362
Schmutzwasser	t FM/a				720
Technische Daten					
Bauart des Motors		Zündstrahl	Zündstrahl	Gas-Otto	Gas-Otto
Elektrischer Wirkungsgrad	%	39	39	42	36
Thermischer Wirkungsgrad	%	38	38	43	49
Verfahrenstechnische Daten					
Durchschnittlicher TS-Gehalt des Substratgemisches	%	14,8	16,8	20,9	9,0
Fermentervolumen (Brutto, gesamt)	m ³	600	700	4.200	135
Mittlere hydraulische Verweilzeit	d	39	42	68	12
Faulraumbelastung	kg oTS/(m ³ *d)	3	3	3	5
Gärrestlagervolumen	m ³	2.100	2.200	8.400	

Tabelle 27 Übersicht der Kosten und Erträge der Demetha-Anlage und Vergleich mit Modellanlagen des KTBL bestehend aus zwei Güllekleinanlagen (75kW) mit reiner Gülle-/Festmistvergärung (Modell II), mit einem Gülle und Maissilage Substratmix (Modell I) und einer flexibel betriebenen Anlage mit einem Gülle/Maissilage Substratmix und einer Bemessungsleistung von 500kW (Modell III).

Investitionen					
Baugruppe	Einheit	Modell I	Modell II	Modell III	Demetha-Anlage
Lagerung und Einbringung	€	147.383,00 €	101.264,00 €	511.207,00 €	121.953,41 €
Fermenter (1&2)	€	127.439,00 €	139.945,00 €	542.046,00 €	265.015,35 €
Gasverwertung und Steuerung	€	164.281,00 €	166.892,00 €	982.311,00 €	215.887,45 €
Gärrestlager	€	200.039,00 €	155.370,00 €	606.132,00 €	
Summe Baugruppen	€	639.142,00 €	563.471,00 €	2.641.696,00 €	602.856,21 €
Planungs-, Genehmigungskostenzuschlag	€	44.740,00 €	39.443,00 €	184.919,00 €	28.000,00 €
Grundstück, Straßen- und Wegebau	€	26.000,00 €	26.000,00 €	243.620,00 €	15.000,00 €
Gesamtinvestitionen	€	709.882,00 €	628.914,00 €	3.070.235,00 €	645.856,21 €
spezifische Investition	€/kW_{el} P_{inst}	9.465,09 €	8.385,52 €	6.140,47 €	12.917,12 €

Leistungs-Kostenrechnung					
Variable Kosten		Modell I	Modell II	Modell III	Demetha-Anlage
Substratkosten	€/a	27.650,00 €		271.250,00 €	
Betriebsstoffe	€/a	19.994,00 €	21.918,00 €	84.341,00 €	19.994,00 €
Wartung und Reparaturen	€/a	21.538,00 €	21.304,00 €	64.467,00 €	10.333,70 €
Laboranalysen	€/a	400,00 €	400,00 €	400,00 €	400,00 €
Summe Variable Kosten	€/a	69.582,00 €	43.622,00 €	420.458,00 €	30.727,70 €

Fixe Kosten		Modell I	Modell II	Modell III	Demetha-Anlage
Summe Abschreibungen	€/a	63.733,00 €	59.539,00 €	240.282,00 €	51.668,50 €
Zinssatz	€/a	11.126,00 €	9.969,00 €	48.627,00 €	6.458,56 €
Versicherungen	€/a	2.946,00 €	2.705,00 €	12.821,00 €	2.705,00 €
Arbeitszeitbedarf, Betreuung Biogasanlage	Akh/d	1,55	1,58	2,86	1,55
	Akh/a	567,00	577,00	1044,00	567,00

Schlussbericht DEMETHA

Arbeitskosten (Lohnansatz 17,5€/Akh)	€/a	9.923,00 €	10.098,00 €	18.270,00 €	9.923,00 €
Summe Fixe Kosten	€/a	87.728,00 €	82.311,00 €	320.000,00 €	70.755,06 €
Gemeinkosten					
	€/a	750,00 €	750,00 €	5.000,00 €	750,00 €
Gesamtkosten					
	€/a	158.060,00 €	126.683,00 €	745.458,00 €	102.232,76 €
Leistungen					
eingespeiste Strommenge	kWh _{el}	593.568	593.086	4.333.934	269.610
Stromvergütung	ct/kWh _{el}	22,59	22,59	14,73	23,14
Ertrag aus Stromverkauf	€/a	134.087,01 €	133.978,13 €	638.388,48 €	62.387,83 €
Ertrag aus Wärmeverkauf (2ct/kWh _{th})	€/a	2.321,00 €	2.319,00 €	30.772,00 €	5.807,52 €
Flexibilitätszuschlag	€/a			40.000,00 €	3.250,00 €
Summe Leistungen exkl. Flexibilitätszuschlag	€/a	136.408,01 €	136.297,13 €	669.160,48 €	68.195,35 €
Summe Leistungen		136.408,01 €	136.297,13 €	709.160,48 €	71.445,35 €
Jahresüberschuss (Gewinn) vor Steuern	€/a	- 21.651,99 €	9.614,13 €	- 76.297,52 €	- 30.787,41 €
Stromerzeugungskosten	ct/kWh	26,63	21,36	17,20	37,92

5.4.5. Marktanalyse und Vermarktungsstrategie

Für das klassische Verfahren der reinen Güllevergärung kommen nur Betriebe mit einer bestimmten Mindestzahl und damit mit einem entsprechenden Anfall an Flüssig- und Festmist infrage um einen wirtschaftlichen Betrieb der Kleingülleanlage zu ermöglichen. Daher eignen sich in erster Linie Betriebe ab >200 GV für die Güllevergärung in Kleinanlagen. Betrachtet man die in Kapitel 5.1 dargestellten Betriebszahlen in der Schweine-, Rinder- und Milchviehhaltung, ergibt sich eine Summe von 21.967 Betrieben in Deutschland welche theoretisch für eine zweistufige Güllekleinanlage in Frage kommen würden. Bezieht man außerdem die nächst kleinere Betriebsgrößenklasse von 100-200 GV als mögliche Standorte einer zweistufigen Güllekleinanlage mit ein, ergibt sich eine Anzahl von 44.825 Betrieben in der Größenklassen von 100-200 GV und in der Summe mit den Betrieben >200 GV eine Anzahl von 66.792. Die genaue Anzahl an Betrieben, welche in der jeweiligen Betriebsgrößenklassen schon eine Güllekleinanlage betreiben oder die produzierte Gülle anderen Biogasanlagenbetreibern zur Verfügung stellen, lässt sich nicht ermitteln. Allerdings können über die aktuelle Anzahl an Güllekleinanlagen und Biogasanlagen insgesamt, indirekt Rückschlüsse auf das theoretische Marktpotential der Demetha-Anlage geschlossen werden. Im Jahr wurden 9.692 Biogasanlagen in Deutschland gezählt (Fachverband Biogas e.V. 2021). Davon ca. 800 Güllekleinanlagen nach der Sonderkategorie des EEG (bis 75 kW_{el}) (Majer et al. 2019). Vergleicht man die schon vorhandene Anzahl an Biogasanlagen und Güllekleinanlagen mit der Anzahl an möglichen Betrieben, ergibt sich trotz der schon vorhandenen Anzahl ein erhebliches theoretisches Marktpotential für weitere Güllekleinanlagen, welches Mangels Wirtschaftlichkeit bestehender Anlagenkonzepte nicht genutzt wird. In diesem Zusammenhang sind die hohen spezifischen Investitionskosten und Stromerzeugungskosten mit ca. 9.000 €/kWh_{el} und >30 ct/kWh ein großes Problem der Güllekleinanlagen (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2021). Auch für das Konzept der zweistufigen Güllevergärung wurden für den Bau einer möglichen Pilotanlage entsprechend hohe spezifische Kosten ermittelt. Gleichzeitig muss sich dieses Anlagenkonzept zuallererst im Praxismaßstab bewähren und parallel technisch weiter optimiert werden um für einen großflächigen Einsatz und die Emissionsvermeidung in der Landwirtschaft in Frage zu kommen. Um die Kosten eines solchen Anlagenkonzeptes weiter zu minimieren, muss in der Produktion ein hoher Grad an Standardisierung und eine Serienfertigung mit hohen Stückzahlen erreicht werden um die Kosten insgesamt weiter zu reduzieren und schlüsselfertige Biogaskleinanlagen bereitstellen zu können. Gleichzeitig können dadurch aufwändige Arbeiten am Standort des Kunden auf ein Mindestmaß begrenzt werden. Durch diese Maßnahmen muss mindestens eine Reduktion der Investitionskosten von 20-30% erreicht werden damit eine solche Anlagen wirtschaftlich

betrieben werden kann und für Landwirtschaftliche Betriebe eine attraktive Alternative zur bisherigen Gülleverwertung wird.

5.5. Treibhausgasminderungspotential und spezifische Kosten

Das Treibhausgasminderungspotential bei einer flächendeckenden Nutzung des theoretischen nutzbaren Potentials auf Basis der Rinderhaltungen in GV und des daraus resultierenden Gülleanfalls von Rindergülle liegt bei 6.458 Mio. Tonnen CO₂ bei einer kalkulierten Stromerzeugung von 10,9 Terrawattstunden (TWh) und einem Methanertragungspotential von ca. 2.878 Mio. m³ pro Jahr. Davon beträgt das Rohstoffpotential der Rindergülle aller viehhaltenden Betriebe in Süddeutschland ein Methanertragungspotential von 1.168 Mio. m³ pro Jahr und ein THG-Minderungspotential von 10,85 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente. Die Betriebe mit mittlerer bis geringer Tierbesatz (<200 GV) in Deutschland können potentiell 6,74 TWh bei einer Leistung von 769 Megawatt (MW) erzeugen und dadurch 6,71 Mio. Tonnen CO₂ einsparen. Dies sind 61% des gesamten theoretischen Rohstoffpotentials der rinderhaltenden Betriebe. Davon beträgt das Stromerzeugungspotential der Betriebe in Süddeutschland mit einem Besatz von 100 bis 200 GV Rindern einen Anteil von ca. 20 % und liegt bei 1,33 TWh bei einer theoretischen Stromerzeugungsleistung von 152 MW was einem THG-Minderungspotential von 1,33 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente entspricht (Tabelle 28).

Im Fall einer flächendeckenden Nutzung des theoretischen Rohstoffpotentials des Flüssigmistanfalls der Schweinegülle kann ein Stromerzeugungspotential von 1,18 TWh erreicht und damit eine Minderung der Treibhausgase von 1,18 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente mit einem Methanertragungspotential von 312 Mio. m³ pro Jahr. Die Betriebe mit Bestandsgröße 100 bis 200 GV liegen bei einem THG-Minderungspotential von 400.000 Tonnen CO₂-Äquivalente bei einem Methanertragungspotential von 105 Mio. Tonnen m³ pro Jahr. In Süddeutschland liegt der Anteil der Betriebe mit Bestandsgröße unter 200 GV bei ca. 85 %. Im Vergleich dazu beträgt der Anteil der Betriebe mit kleiner bis mittlerer Bestandsgröße in Mittel- und Norddeutschland (Rest) ungefähr 45 %. Die Betriebe in Süddeutschland mit geringer Besatzdichte an Schweinen weisen ein Stromerzeugungspotential des theoretisch nutzbaren Rohstoffpotentials von ca. 120 GWh sowie ein potentiell THG-Minderungspotential an CO₂-Äquivalenten von 120.000 t auf (Tabelle 29).

In Tabelle 30 & 31 ist die Berechnung des Stromerzeugungspotential sowie das Treibhausgasminderungspotential des technisch nutzbaren Vorkommens von Flüssigmist aus der Rinder- & Schweinehaltung dargestellt. Das Stromerzeugungspotential der technisch nutzbaren Rindergülle beträgt 6,21 TWh pro Jahr mit einem THG-Minderungspotential von 5,59 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente. Davon beträgt der Anteil der

Betriebe mit einer Bestandsgröße von 100 bis 200 GV Rinder in Deutschland von ca. 29 %. In Süddeutschland beträgt der Anteil der Betriebe mit 100 bis 200 GV Rinder ebenfalls ca. 29 % mit einem Minderungspotential der Treibhausgase von 680.000 Tonnen CO₂-Äquivalenten. Die Betriebe mit mittlerem bis kleinem Besatz an Rindern bedingen bei flächendeckender Nutzung des technischen Potentials ein THG-Minderungspotential von 3,46 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten mit einem Stromerzeugungspotential von 3,84 TWh und einem Methanertragspotential von 1,01 Mrd. m³ im Jahr.

Im Fall einer technischen Nutzung des Rohstoffpotentials des Flüssigmist an Schweinegülle in Deutschland kann ein Stromerzeugungspotential von 1,06 TWh erreicht und damit eine Minderung der Treibhausgase von 1,06 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente mit einem Methanertragspotential von 280 Mio. m³ pro Jahr. Die Betriebe mit Bestandsgröße 100 bis 200 GV liegen bei einem THG-Minderungspotential von 355.973 Tonnen CO₂-Äquivalente bei einem Methanertragspotential von 94,39 Mio. Tonnen m³ pro Jahr. Die Betriebe im Rest von Deutschland mit einer geringen Besatzdichte an Schweinen weisen ein Stromerzeugungspotential des technisch nutzbaren Rohstoffpotentials von ca. 253.550 MWh auf sowie ein potentiell THG-Minderungspotential an CO₂-Äquivalenten von 252.387 t auf. Das Treibhausgas-minderungspotential des Flüssigmist von Schweinen in Betrieben unter 200 GV, das technisch in Deutschland nutzbar ist, liegt außerhalb von Süddeutschland bei 252.387 Tonnen CO₂-Äquivalenten mit einem Methanertragspotential dieser Betriebsstruktur von ungefähr 109 Mio. Tonnen CH₄ (Tabelle 31).

Tabelle 28 Theoretisches THG-Minderungspotential des technisch nutzbaren Rohstoffpotentials aus Gülle der Milchviehhaltung in Deutschland.

Region	Größenklasse	theoretisch nutzbares Rohstoffpotential***		Leistung	Stromerzeugungspotential		THG-Minderung in Mio. t CO ₂ - Äquivalente
		in Mio. t	Methanmenge in Mio. m ³ / a		MW	TWh	
Deutschland	alle	172,10	2.877,51	1244,49	10,90	10,85	
	< 200	106,39	1.778,89	769,35	6,74	6,71	
	100 - 200	49,01	819,40	354,38	3,10	3,09	
Süd- deutschland *	alle	69,87	1.168,20	505,23	4,43	4,41	
	< 200	60,32	1.008,54	436,18	3,82	3,80	
	100 - 200	21,03	351,58	152,06	1,33	1,33	
Rest**	alle	100,26	1.676,34	725,00	6,35	6,32	
	< 200	46,07	770,35	333,17	2,92	2,91	
	100 - 200	27,98	467,82	202,33	1,77	1,76	

*Süddeutschland: Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland

**Norddeutschland: alle Regionen in Deutschland außerhalb Süddeutschlands*

Tabelle 29 Theoretisches THG-Minderungspotential des technisch nutzbaren Rohstoffpotentials aus Schweinegülle in Deutschland.

Region	Größenklasse	theoretisch nutzbares Rohstoff-potential***	Methanmenge	Stromerzeugungs-potential		THG-Minderung
		in Mio. t	in Mio. m ³ / a	Leistung MW	TWh	in Mio. t CO ₂ -Äquivalente
Deutschland	alle	28,15	312,10	134,98	1,18	1,18
	< 200	15,10	167,46	72,42	0,63	0,63
	100 - 200	9,46	104,88	45,36	0,40	0,40
Süd-deutschland *	alle	6,20	68,76	29,74	0,26	0,26
	< 200	5,26	58,30	25,21	0,22	0,22
	100 - 200	2,75	30,52	13,20	0,12	0,12
Rest**	alle	21,95	243,34	105,24	0,92	0,92
	< 200	9,84	109,16	47,21	0,41	0,41
	100 - 200	6,71	74,36	32,16	0,28	0,28

*Süddeutschland: Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland

**Norddeutschland: alle Regionen in Deutschland außerhalb Süddeutschlands*

Tabelle 30 Theoretisches THG-Minderungspotential des technisch nutzbaren Rohstoffpotentials aus Rindergülle in Deutschland.

Region	Größenklasse	technisch nutzbares Rohstoffpotential***	Methanmenge	Stromerzeugungs-potential		THG-Minderung
		in Mio. t	in Mio. m ³ / a	Leistung MW	TWh	in Mio. t CO ₂ -Äquivalente
Deutschland	alle	98,10	1.640,18	709,36	6,21	5,59
	< 200	60,64	1.013,97	438,53	3,84	3,46
	100 - 200	27,93	467,06	202,00	1,77	1,59
Süd-deutschland *	alle	39,83	665,87	287,98	2,52	2,27
	< 200	34,38	574,87	248,62	2,18	1,96
	100 - 200	11,99	200,40	86,67	0,76	0,68
Rest**	alle	57,15	955,52	413,25	3,62	3,26
	< 200	26,26	439,10	189,91	1,66	1,50
	100 - 200	15,95	266,66	115,33	1,01	0,91

*Süddeutschland: Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland

**Norddeutschland: alle Regionen in Deutschland außerhalb Süddeutschlands*

Tabelle 31 Theoretisches THG-Minderungspotential des technisch nutzbaren Rohstoffpotentials des Flüssigmistanfalls aus Schweinegülle in Deutschland.

Region	Größenklasse	technisch nutzbares		Stromerzeugungs-		THG-Minderung in Mio. t CO ₂ - Äquivalente
		Rohstoff-potential***	Methanmenge	Leistung	potential	
	in GV	in Mio. t	in Mio. m ³ / a	MW	TWh	
Deutschland	alle	25,33	280,89	121,48	1,06	1,06
	< 200	13,59	150,71	65,18	0,57	0,57
	100 - 200	8,51	94,39	40,82	0,36	0,36
Süd- deutschland *	alle	5,58	61,88	26,76	0,23	0,23
	< 200	4,73	52,47	22,69	0,20	0,20
	100 - 200	2,48	27,47	11,88	0,10	0,10
Rest**	alle	19,75	219,01	94,72	0,83	0,83
	< 200	8,86	98,24	42,49	0,37	0,37
	100 - 200	6,04	66,92	28,94	0,25	0,25

*Süddeutschland: Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland

**Norddeutschland: alle Regionen in Deutschland außerhalb Süddeutschlands*

5.6. Auswahl geeigneter Beispielbetriebe zur Erprobung der Pilotanlage

Durch Renergie Allgäu e.V. konnten auf Basis der Vorgaben insgesamt drei mögliche Standorte im Süddeutschen Raum mit teils hohem Interesse an der Umsetzung einer zweistufigen Güllekleinanlage ausgemacht werden. Die geographischen Daten der möglichen Standorte sind auf Landkreisebene dargestellt. Gleichzeitig wurden die Standorte anonymisiert und damit auf die Angabe von personenbezogenen Daten verzichtet.

5.6.1. Betriebsstandort 1

Standort:	Landkreis Weißenburg-Gunzenhausen
Beschreibung:	Landwirtschaftlicher Betrieb mit Tierhaltung 100 Milchkühe mit weiblicher Nachzucht

Der landwirtschaftliche Betriebsstandort 1 im mittelfränkischen Landkreis Weißenburg-Gunzenhausen betreibt einen tierhaltenden Betrieb mit ungefähr 100 Milchkühen mit weiblicher Nachzucht. Der Tierbestand liegt bei 150 Großvieheinheiten (GV). Dadurch beträgt der Tierbesatz 2,1 GV/ha. Die Gülle, die in der eigenen Tierhaltung anfällt, beläuft sich auf 8-9 Tonnen Frischmasse pro Tag und einer Jahresmenge von 2.900 bis 3.300 Tonnen Frischmasse. Die anfallende Gülle ist veterinärämtlich genehmigt sowie aufgrund des Ertrags aus der Nutztierhaltung konform nach EEG-Definition aus dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz. Ein Einsatz von Fremdgülle steht nicht zur Verfügung und ist nicht geplant. Dadurch entstehen auf der einen Seite keine Fahrtkosten für den Fremdgüllebezug, jedoch ist der zur Verfügung stehende Rohstoff limitiert auf den Gülleanfall aus der eigenen Tierhaltung. Die Sicherheit der Güllielieferung für die Biogasanlage ist durch die Eigenversorgung mit Rindergülle sehr hoch. Der Betrieb visiert eine Vor-Ort-Verstromung an, durch den der Strombedarf der Tierhaltung und Landwirtschaft gedeckt werden soll. Dadurch steht das Vorhaben in einem räumlich funktionalen Zusammenhang mit dem Betrieb. Aufgrund der Betriebsgröße wird die Errichtung einer Biogasanlage unter 100 kW angestrebt, sodass keine Vorgabe zur 2,2-fachen Überbauung aus dem EEG 2021 besteht. Der Stromverbrauch des Betriebs liegt jährlich bei 75.000 kWh. Der Strombedarf wird mit ca. 37.000 kWh zu 50% bereits durch Eigenversorgung durch die PV-Anlage bereitgestellt. Die Stromverbrauchscharakteristik ist über das Jahr weitestgehend konstant und ausgeglichen. Der Strombedarf wird für den im Betrieb tätigen Melkroboter, den Melkstand und der Milchkühlung sowie der Stallbelüftung verbraucht.

Der Wärmeverbrauch des Betriebs ist im Sommer sehr niedrig. Hier wird die Wärme vor allem zur Warmwasseraufbereitung benötigt. Aufgrund der im Winter benötigten Wärme für das Wohnhaus und den Stall steigt der Wärmeverbrauch stark an. Der Wärmeverbrauch liegt im Jahr bei ungefähr 4.000 Liter Heizöl. Es existiert bisher auch keine Biogasanlage auf dem Betriebs- und Hofgelände, sodass die Errichtung der DEMETHA-Anlage als privilegiertes Bauvorhaben gilt. Außerdem verfügt der Betrieb über ausreichend Fläche zur Errichtung der Anlagenkomponenten mit Nähe zur Tierhaltung. Der Betrieb hat ein hohes Interesse an der Errichtung der DEMETHA-Anlage zur verbesserten Kreislaufschließung von Tierhaltung und Landwirtschaft. Der Betrieb hat sich außerdem zur Zusammenarbeit mit den Projektpartnern bereit erklärt und ist mit der Bereitstellung von Anlagen- und Betriebsdaten im Projektzeitraum einverstanden.

Kriterien	Bemerkung:
Tierbestand (GV):	Ca. 150 GV (8 - 9 % TS-Gehalt)
Tierbesatz (GV/ha):	Ca. 2,1 GV/ha
Gülleanfall der eigenen Tierhaltung:	Ungefähr 8,5-9 t FM Gülleanfall am Tag
Güllebegriff des EEG eingehalten - Verordnung (EU) Nr. 1385/2013 (ABl. L 354 vom 28.12.2013, S. 86) - Verordnung (EG) Nr. 1069/2009	Einsatz von Rindergülle aus der eigenen Milchviehhaltung Rindergülle veterinärämtlich genehmigt
Anteil Einsatz von Eigen- und Fremdgülle	100 % Einsatz von Eigengülle geplant
Fremdgülle-Verwendung veterinärrechtlich genehmigt.	Nur Einsatz von Eigengülle, kein Bezug von Fremdgülle geplant
Fremdgülle mit kurzen Fahrwegen < 3 km und langfristig gesichertem Abnahmevertrag	100 % Einsatz von Gülle aus eigenem Betrieb. Sicherheit der Güllielieferung für 20 Jahre sicher
Vor-Ort-Verstromung	Vorhaben muss in einem räumlich-funktionalen Zusammenhang mit dem Betrieb stehen
Interesse an Biogasanlage unter 150 kW inst. Leistung	Kategorie Güllekleinanlage
Interesse an Biogasanlage unter 100 kW inst. Leistung:	Keine Vorgabe zur 2,2 -fachen Überbauung (EEG 2021)
Stromverbrauch:	Stromverbrauch bei 75.000 kWh pro Jahr 50 % des Bedarfs wird bereits über die PV-Dachanlage gedeckt

Stromverbrauchscharakteristik:	<p>Grundlast über das Jahr ausgeglichen und konstant</p> <ul style="list-style-type: none"> - Melkroboter - Milchkühlung - Melkstand - Belüftung (Stall etc.)
Wärmebedarf:	<p>Liegt ungefähr bei 4.000 Liter Heizöl: entspricht 40.000 kWh (4,6 kW_{thermisch})</p>
Wärmebedarfscharakteristik:	<p>Wärmeabnehmer im Sommer sehr gering, nur für Warmwasseraufbereitung</p> <p>Im Winter hoher Bedarf an Wärme für Haus, Stall etc.</p>
Privilegierung zur Errichtung einer Biogasanlage nach Baugesetzbuch (§35 BauGB):	<p>Pilotanlage ist einzige Biogasanlage auf der Hofstelle & Betriebsstandort</p>
Aufstellungsfläche für Anlagenkomponenten:	<p>Ausreichend Platz für Gärbehälter; Gasspeicher; Technikcontainer</p>
Bereitstellung der Betriebs- und Anlagendaten:	<p>Der Betreiber ist während der Projektlaufzeit einverstanden Betriebs- und Anlagendaten den Projektpartnern zur Verfügung zu stellen</p>
Errichtungsfläche für Anlage in räumlicher Nähe zur Tierhaltung:	<p>Die benötigte Fläche von 22 x 22 m ist in räumlicher Nähe zur Tierhaltung (< 50m) vorhanden</p>
Einverständnis über Aufbau der Pilotanlage:	<p>Das Interesse des Betreibers zur Errichtung der DEMETHA-Pilotanlage kann als sehr hoch angegeben werden</p>

5.6.2. Betriebsstandort 2

Standort:	Landkreis Unterallgäu
Beschreibung:	Landwirtschaftlicher Betrieb mit Tierhaltung, Kälber- und Rinderaufzucht & Milchviehhaltung

Der Betriebsstandort 2 unterhält im Landkreis Unterallgäu einen landwirtschaftlichen Betrieb mit Tierhaltung. Gehalten werden 550 Tiere mit insgesamt ca. 417 GV wobei davon ungefähr 250 GV an Milchkühen gehalten werden. Daraus ergibt sich ein geschätzter Gülleanfall von knapp 25 m³ pro Tag und ca. 9.000 m³ im Jahr. Die EEG-Konformität der stofflichen Nutzung der anfallenden Gülle ist durch die Herkunft aus der Nutztierhaltung von Rindern gewahrt. Ein zusätzlicher Einsatz von Fremdgülle ist vorerst nicht geplant, dadurch liegt der Anteil der Gülle aus eigener Tierhaltung bei 100 %. Dadurch ist eine hohe Sicherheit der Verfügbarkeit an Gülle für die Laufzeit von 20 Jahren gewährleistet. Eine Vor-Ort-Verstromung des in der Vergärungsanlage produzierten Biogas ist gewünscht. Die kalkulierte Leistung der Biogasanlage auf Basis des verfügbaren Gülleanfalls im landwirtschaftlichen Betrieb liegt bei ca. 90 kW. Aufgrund der EEG-Regelung der doppelten Überbauung bei einer installierten Leistung von mehr als 100 kW könnten im Durchschnitt nur 75 kW im Jahr eingespeist werden wenn die installierte Anlagenleistung bei 150 kW liegt. Das Biogaspotential der Tierhaltung könnte daher nicht vollständig ausgeschöpft werden. Aufgrund dessen macht eine Güllekleinanlage nach EEG mit 150 kW installierter Leistung für den Standort keinen Sinn. Somit kommt nur eine Biogasanlage unter 100 kW in der Güllekleinanlagenkategorie für den Standort in Frage. Eine flexible Fahrweise der Biogasanlage mit Fahrplan ist potentiell möglich. Der Strombedarf des landwirtschaftlichen Betriebs umfasst laut Betreiber ca. 90.000 kWh im Jahr und wird hauptsächlich durch die Tierhaltung verbraucht. Erfahrungsgemäß erzeugt das Melkkarussell mit 28 Plätzen einen Lastgang mit Bedarfsspitzen. Der Wärmebedarf auf dem Hof ist im Sommer gering und wird nur für die Warmwasserbereithaltung benötigt. Im Winter steigt der Bedarf an für die Beheizung von Betriebsgebäuden.

Aktuell besitzt der Hof keine Biogasanlage, somit wäre der Bau der DEMETHA-Anlage baurechtlich privilegiert nach Baugesetzbuch. Außerdem verfügt der Betrieb über genügend Platz auf der Hofstelle zur Errichtung einer Güllekleinanlage in unmittelbarer räumlicher Nähe zur Tierhaltung.

Kriterien	Bemerkung:
Tierbestand (GV):	550 Tiere, über 250 GV Milchkühe
Tierbesatz (GV/ha):	n.A.
Gülleanfall der eigenen Tierhaltung:	Geschätzt laut Betreiber: ca. 15 m ³ pro Tag
Güllebegriff des EEG eingehalten - Verordnung (EU) Nr. 1385/2013 (ABl. L 354 vom 28.12.2013, S. 86) - Verordnung (EG) Nr. 1069/2009	Einsatz von Rindergülle aus der eigenen Milchviehhaltung Rindergülle veterinärämtlich genehmigt
Anteil Einsatz von Eigen- und Fremdgülle	100 % Einsatz von Eigengülle geplant
Fremdgülle-Verwendung veterinärrechtlich genehmigt.	Nur Einsatz von Eigengülle, kein Bezug von Fremdgülle geplant
Fremdgülle mit kurzen Fahrwegen < 3 km und langfristig gesichertem Abnahmevertrag	100 % Einsatz von Gülle aus eigenem Betrieb. Sicherheit der Güllielieferung für 20 Jahre sicher
Vor-Ort-Verstromung	Vor-Ort-Verstromung geplant
Interesse an Biogasanlage unter 150 kW inst. Leistung	n.A.
Interesse an Biogasanlage unter 100 kW inst. Leistung:	Keine Vorgabe zur 2,2-fachen Überbauung (EEG 2021) – kein Bedürfnis zur flexiblen Fahrweise
Stromverbrauch:	Geschätzt: 90.000 kWh
Stromverbrauchscharakteristik:	Strombedarf mit vielen Spitzen im Jahresverlauf durch Melkkarussell mit 28 Plätzen. Stromverbrauch durch: - Milchkühlung - Melkkarussell (28 Plätze) - Belüftung (Stall etc.) - Maschinenhalle
Wärmebedarf:	Geschätzt: 50.000 – 60.000 kWh
Wärmebedarfscharakteristik:	Wärmeabnehmer im Sommer sehr gering, nur für Warmwasseraufbereitung Im Winter höherer Bedarf an Wärme

Privilegierung zur Errichtung einer Biogasanlage nach Baugesetzbuch (§35 BauGB):	Pilotanlage ist einzige Biogasanlage auf der Hofstelle & Betriebsstandort
Aufstellungsfläche für Anlagenkomponenten:	Ausreichend Platz für Gärbehälter; Gasspeicher; Technikcontainer
Bereitstellung der Betriebs- und Anlagendaten:	Der Betreiber ist während der Projektlaufzeit einverstanden Betriebs- und Anlagendaten den Projektpartnern zur Verfügung zu stellen
Errichtungsfläche für Anlage in räumlicher Nähe zur Tierhaltung:	Die benötigte Fläche von 22 x 22 m ist in räumlicher Nähe zur Tierhaltung (< 50m) vorhanden
Einverständnis über Aufbau der Pilotanlage:	Das Interesse zur Errichtung der DEMETHA-Pilotanlage ist hoch, jedoch Unsicherheit über den fachmännischen Betrieb der Anlage

5.6.3. Betriebsstandort 3

Standort:	Landkreis Kempten
Beschreibung:	Landwirtschaftliche Versuchsanstalt mit Rinderhaltung, 130 Kühe mit entsprechender Nachzucht der Rasse Braunvieh

Der Betriebsstandort 3 ist eine landwirtschaftliche Versuchsanstalt mit Rinderhaltung. Der Betrieb unterhält 130 Milchkühe mit Nachzucht. Insgesamt werden 210 GV Rinder gehalten, die für einen Gülleanfall von ca. 11-12 Tonnen pro Tag und ungefähr 4.200 t Gülle pro Jahr sorgen. Die Nutzung der Gülle wäre lediglich auf die eigene in der Tierhaltung anfallende Gülle ohne Fremdgüllebezug beschränkt. Es entstehen somit keine geplanten zusätzlichen Kosten für den Bezug weiterer Güllmengen. Das Biogaspotential der technisch nutzbaren Gülle liegt ungefähr bei 17 -20 m³ Biogas pro Stunde. Dementsprechend liegt das Stromerzeugungspotential bei einer Erzeugungsleistung von ca. 35 - 40 kW. Daher reicht eine Dimensionierung der BHKW-Leistung von unter 75 bzw. unter 100 kW aus. Der Standort am Spitalhof besitzt außerdem ausreichend Fläche zur Errichtung der DEMETHA-Anlage in unmittelbarer Nähe zur Tierhaltung mit geplanter Vor-Ort-Verstromung des Biogases. Der Stromverbrauch liegt bei ca. 2.000.000 kWh. Der Strom wird durch die Schulungs- und Seminarräume, die Labore, Büros und Werkstätten sowie dem Milchviehstall der landwirtschaftlichen Versuchsanstalt verbraucht. Durch die hohe Auslastung der Schule im Sommer und der erhöhten Kühllast der Molkerei liegt der Strombedarf im Sommer deutlich höher mit einigen Spitzen. Die installierte PV-Anlage mit 99 kWp deckt nur zu einem sehr geringen Teil den Eigenstrombedarf des Betriebs. Der Wärmebedarf liegt ungefähr bei 500.000 kWh im Jahr. Dabei ist im Gegensatz zum niedrigen Wärmeverbrauch im Sommer, der Verbrauch der Versuchsanstalt im Winter sehr hoch. Die DEMETHA-Pilotanlage wäre zum aktuellen Stand die einzige Biogasanlage auf dem Betriebsgelände. Dadurch besteht eine Privilegierung im Baurecht.

Kriterien	Bemerkung:
Tierbestand (GV):	Ca. 210 GV (9,2 % TS-Gehalt)
Tierbesatz (GV/ha):	n.A.
Gülleanfall der eigenen Tierhaltung:	Ungefähr 11-12 t FM Gülleanfall am Tag
Gülebegriff des EEG eingehalten - Verordnung (EU) Nr. 1385/2013 (ABl. L 354 vom 28.12.2013, S. 86) - Verordnung (EG) Nr. 1069/2009	Einsatz von Rindergülle aus der eigenen Milchviehhaltung Rindergülle veterinärämtlich genehmigt
Anteil Einsatz von Eigen- und Fremdgülle	100 % Einsatz von Eigengülle geplant
Fremdgülle-Verwendung veterinärrechtlich genehmigt.	Nur Einsatz von Eigengülle, kein Bezug von Fremdgülle geplant
Fremdgülle mit kurzen Fahrwegen < 3 km und langfristig gesichertem Abnahmevertrag	100 % Einsatz von Gülle aus eigenem Betrieb. Sicherheit der Güllieferung für 20 Jahre sicher
Vor-Ort-Verstromung	Vorhaben muss in einem räumlich-funktionalen Zusammenhang mit dem Betrieb stehen,
Interesse an Biogasanlage unter 150 kW inst. Leistung	Kategorie Güllekleinanlage: Interesse an Güllekleinanlage
Interesse an Biogasanlage unter 100 kW inst. Leistung:	Keine Vorgabe zur 2,2-fachen Überbauung (EEG 2021) – Interesse besteht
Stromverbrauch:	Stromverbrauch bei 2.000.000 kWh pro Jahr (Daten aus 2020)
Stromverbrauchscharakteristik:	Hoher Stromverbrauch im Sommer durch hohe Kühllast und stärkerem Betrieb in der Molkereischule sowie erhöhtem Kursbetrieb und starke Auslastung der Küche Stromverbraucher - Milchviehstall - Labor - Schulgebäude - Büros und Werkstätten
Wärmebedarf:	Liegt ungefähr bei 490.000 – 500.000 kWh (Daten aus 2020)
Wärmebedarfscharakteristik:	Wärmebedarf im Sommer sehr gering und sehr hoher Wärmebedarf im Winter Wärmeabnehmer: - Technikum - Schulgebäude - Küchen

	- Internat
Privilegierung zur Errichtung einer Biogasanlage nach Baugesetzbuch (§35 BauGB):	Pilotanlage ist einzige Biogasanlage auf der Hofstelle & Betriebsstandort
Aufstellungsfläche für Anlagenkomponenten:	Ausreichend Platz für Gärbehälter ; Gasspeicher; Technikcontainer
Bereitstellung der Betriebs- und Anlagendaten:	Der Betreiber ist während der Projektlaufzeit einverstanden Betriebs- und Anlagendaten den Projektpartnern zur Verfügung zu stellen
Errichtungsfläche für Anlage in räumlicher Nähe zur Tierhaltung:	Die benötigte Fläche von 22 x 22 m ist in räumlicher Nähe zur Tierhaltung (< 50m) vorhanden
Einverständnis über Aufbau der Pilotanlage:	Das Interesse zur Errichtung der DEMETHA-Pilotanlage ist sehr hoch.

5.7. Zusammenfassung und Ausblick

Trotz des großen Zubaus an Biogasanlagen in den letzten 15 Jahren, wird nur ca. 1/3 der in der Landwirtschaft anfallenden Güllemengen in Biogasanlagen verwertet und einer energetischen Nutzung zugeführt. Daher besteht noch ein erhebliches Rohstoffpotential in der tierhaltenden Landwirtschaft für die Erzeugung von Biogas.

Das System der zweistufigen Güllevergärung kann diese Rohstoffpotential teilweise erschließen und auf diese Weise einen Beitrag sowohl zur Emissionsminderung in der Landwirtschaft als auch zur dezentral Strom- und Wärmeversorgung leisten. Ferner kann es auch zum Erhalt von dezentralen landwirtschaftlichen Strukturen beitragen. Überdies besteht über einen Gasspeicher die Möglichkeit Energie bedarfsgerecht bereitzustellen und gepaart mit einer hohen Anlagenanzahl auch die Ausfallsicherheit gegenüber Großanlagen zur Stromerzeugung zu erhöhen und eine Stabilisierung der Stromnetze zu erreichen.

Ferner können über die Verwertung des Flüssigmistes in einer Biogasanlage auch die Geruchsemissionen aus der Gülle erheblich reduziert werden. Auf diese Weise kann die Akzeptanz in der Bevölkerung gegenüber der Tierhaltung in der Landwirtschaft merklich erhöht werden und negative Effekte auf beispielsweise den Fremdenverkehr vermieden werden.

Durch die Entwicklung eines hochgradig standardisierten Anlagenkonzeptes können im besten Fall die Kosten gesenkt und gleichzeitig auch eine erhöhte Betriebssicherheit gewährleistet werden. Darüber hinaus erfolgt durch die Behandlung der Gülle in einer Biogasanlage eine Verbesserung der Düngeeigenschaften durch bessere Infiltration und Reduzierung der Viskosität. Außerdem werden Unkrautsamen abgetötet, was indirekt zu einem geringeren Einsatz von Pflanzenschutzmitteln führt.

Neben den Vorteilen zur Emissionsminderung verspricht das Hohenheimer System zur zweistufigen Güllevergärung auch verfahrenstechnische Vorteile. Diese umfassen kleinere Reaktorvolumina, kürzere Verweilzeiten, bei hohen organischen Raumbelastungen und durch die Integration eines Festbettreaktors auch eine erhöhte Lastflexibilität.

Trotz der möglichen Vorteile eines solchen Systems muss sich dieses zuallererst im praktischen Betrieb beweisen und weiter optimiert werden. Außerdem sind die für eine erste Pilotanlage veranschlagten Investitionskosten mit ca. 640.000 € bzw. spezifischen Investitionskosten von ca. 13.000 €/kWh noch zu hoch um einen wirtschaftlichen Betrieb zu erlauben. Daher sollte in einem nächsten Schritt eine Pilotanlage gebaut und unter Realbedingungen getestet werden. Währenddessen und im Anschluss an die Testphase muss das Anlagenkonzept technisch und wirtschaftlich weiter optimiert werden. Nichtsdestotrotz könnten die Kosten für ein solches Anlagenkonzept über einen hohen Grad an Standardisierung und eine Serienfertigung mit hohen Stückzahlen weiter gesenkt werden. Dadurch besteht noch erhebliches Potential zur weiteren Kostenreduktion.

Aufgrund der hohen Rohstoffverfügbarkeit an Flüssigmist in Deutschland, ist ein hohes Potential zur Verbreitung eines solchen Anlagentyps vorhanden und bietet die Chance eine hohe Zahl an zweistufigen Güllekleinanlagen zu verkaufen. Außerdem wird den tierhaltenden landwirtschaftlichen Betrieben mittel- bis langfristig die Möglichkeit gegeben ihre Treibhausgasemissionen zu senken, dezentral Energie bereitstellen zu können und zusätzliche Wertschöpfung zu generieren.

Literaturverzeichnis

- Achilles, Werner; Anter, Jano; Belau, Till; Blankenburg, Joachim (Hg.) (2018): Faustzahlen für die Landwirtschaft. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. 15. Auflage. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).
- American Society of Mechanical Engineers (1974): Two-stage methane production from solid wastes. Winter Annual Meeting. New York, 17.-22.11.1974.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hg.) (2017): Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik.
- Demirel, Burak; Yenigün, Orhan (2002): Two-phase anaerobic digestion processes: a review. In: *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 77 (7), S. 743–755. DOI: 10.1002/jctb.630.
- Deutsche Umwelthilfe e.V. (Hg.) (2018): Methanminderung für kosteneffizienten Klimaschutz in der Landwirtschaft. Online verfügbar unter https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Verkehr/Methan/Minus-Methan_Hintergrundpapier-Sammlung.pdf, zuletzt geprüft am 20.10.2021.
- Europäisches Parlament und Rat (11.12.2018): RICHTLINIE (EU) 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. In: Amtsblatt der Europäischen Union.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hg.) (2021): Faustzahlen Biogas. Online verfügbar unter <https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen>, zuletzt geprüft am 06.12.2021.
- Fachverband Biogas e.V. (Hg.) (2021): Branchenzahlen 2020 und Prognose der Branchenentwicklung 2021. Online verfügbar unter [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/21-10-14_Biogas_Branchenzahlen-2020_Prognose-2021.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/21-10-14_Biogas_Branchenzahlen-2020_Prognose-2021.pdf), zuletzt geprüft am 08.12.2021.
- Ghosh, Sambhuanth (1987): Improved Sludge Gasification by Two-Phase Anaerobic Digestion. In: *Journal of Environmental Engineering* 113 (6), S. 1265–1284. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1987)113:6(1265).
- Gruber, Leonhard; Pries, Martin; Schwarz, Frieder-Jörg; Spiekers, Hubert; Staudacher, Walter (2006): Schätzung der Futteraufnahme bei der Milchkuh. Unter Mitarbeit von Leonhard Priv.-Doz. Gruber, Martin Pries, Frieder-Jörg Schwarz, Hubert Spiekers und Walter Staudacher. Hg. v. DLG-Arbeitskreis Futter und Fütterung und Bundesarbeitskreis der Fütterungsreferenten in der DLG. Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ite/dateien/futteraufnahme_milchkuhdlg_1_06.pdf, zuletzt geprüft am 19.10.2021.
- Krause, Tim; Pohl, Marcel; Klemm, Marco; Wirth, Benjamin; Gröngroft, Arne; Müller-Langer, Franziska et al. (2020): Nationales Monitoring biogener Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle in Deutschland Teil 2 : Rohstoffeigenschaften und Konversionsfaktoren.
- Krümpel, Johannes; Schäufele, Friedrich; Schneider, Johannes; Jungbluth, Thomas; Zielonka, Simon; Lemmer, Andreas (2016): Kinetics of biogas production in Anaerobic Filters. In: *Bioresource technology* 200, S. 230–234. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.10.030.
- Krümpel, Johannes Hagen; Illi, Lukas; Lemmer, Andreas (2018): Intrinsic gas production kinetics of selected intermediates in anaerobic filters for demand-orientated energy supply. In: *Environmental technology* 39 (5), S. 558–565. DOI: 10.1080/09593330.2017.1308439.

- KTBL (Hg.) (2018): Betriebsplanung Landwirtschaft 2018/2019. 26. Aufl. Darmstadt.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2018): Betriebsplanung Landwirtschaft 2018/19. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. 26. Auflage. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.
- Lemmer, Andreas; Krümpel, Johannes (2017): Demand-driven biogas production in anaerobic filters. In: *Applied Energy* 185, S. 885–894. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.073.
- Lindner, Jonas; Zielonka, Simon; Oechsner, Hans; Lemmer, Andreas (2015): Effect of different pH-values on process parameters in two-phase anaerobic digestion of high-solid substrates. In: *Environmental technology* 36 (1-4), S. 198–207. DOI: 10.1080/09593330.2014.941944.
- Lindner, Jonas; Zielonka, Simon; Oechsner, Hans; Lemmer, Andreas (2016): Is the continuous two-stage anaerobic digestion process well suited for all substrates? In: *Bioresource technology* 200, S. 470–476. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.10.052.
- Majer, Stefan; Kornatz, Peter; Daniel-Gromke, Jaqueline; Rensberg, Nadja; Brosowski, André; Oehmichen, Katja; Liebetrau, Jan (Hg.) (2019): Stand und Perspektiven der Biogaserzeugung aus Gülle. Deutsches Biomasseforschungszentrum. Leipzig: Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. Online verfügbar unter <https://edocs.tib.eu/files/e01fn21/1770081690.pdf>.
- Rosenwinkel, K.-H.; Kroiss, H.; Dichtl, N.; Seyfried, C.-F.; Weiland, P. (Hg.) (2015): Anaerobtechnik. 3. Aufl. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schultheiß, Ute; Döhler, Helmut; Schwab, Markus (2010): Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft–jährliche Anfallmengen in der Bundesrepublik Deutschland. In: *Landtechnik* 5, S. 354–356.
- Statistisches Bundesamt (Hg.) (2016): Viehhaltung der Betriebe Agrarstrukturerhebung. Fachserie 3 (2.1.3).
- Tauseef, S. M.; Abbasi, Tasneem; Abbasi, S. A. (2013): Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19, S. 704–741. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.056.
- Umweltbundesamt (Hg.) (2021a): Ammoniak-Emissionen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/ammoniak-emissionen#beschlusse-zur-emissionsminderung->.
- Umweltbundesamt (Hg.) (2021b): Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Strommix>.
- Zielonka, Simon; Lemmer, Andreas; Oechsner, Hans; Jungbluth, Thomas (2007): Zweiphasige Vergärung nachwachsender Rohstoffe - Einsatz des Bioleaching-Verfahrens zur Verwertung von Grassilage. 338–339 Seiten / *LANDTECHNIK*, Bd. 62 Nr. 5 (2007). DOI: 10.1515/lt.2007.1008.
- Zielonka, Simon; Lemmer, Andreas; Oechsner, Hans; Jungbluth, Thomas (2010): Energy balance of a two-phase anaerobic digestion process for energy crops. In: *Eng. Life Sci.* 10 (6), S. 515–519. DOI: 10.1002/elsc.201000071.