



*Fokusheft im Projekt Pilot-SBG*

## BEISPIELKONZEPT

zur Bereitstellung von erneuerbarem LNG aus biogenen Rest- und Abfallstoffen und erneuerbarem Wasserstoff im kommerziellen Maßstab

Vorstellung eines Beispielkonzeptes für fortschrittliche Biokraftstoffe im Verkehrssektor

Emissionsminderung im Vergleich zu fossilen Brennstoffen

Grüner Wasserstoff und die Wirtschaftlichkeit der Methanproduktion

# INHALTSVERZEICHNIS

Übersicht .....	4
Hintergrund .....	5
Vorgehen zur Entwicklung der Anlagenkonzepte .....	6
Rohstoffpotenziale .....	7
Anlagenkonzeptentwicklung .....	8
Beispielkonzept Agrar .....	10
Beispielkonzept Urban .....	11
Bewertungsmethoden .....	14
Technische Bewertung .....	14
Ökologische Bewertung .....	15
Ökonomische Bewertung .....	15
Ergebnisse und Diskussion .....	16
Technische Bewertung .....	16
Ökologische Bewertung .....	19
Ökonomische Bewertung .....	20
Fazit und Ausblick .....	23
Das Vorhaben Pilot-SBG .....	24
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis .....	28
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....	29
Literaturverzeichnis .....	30

# IMPRESSUM

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Torgauer Straße 116  
DE-04347 Leipzig  
+49 (0)341 2434-112  
[info@dbfz.de](mailto:info@dbfz.de)  
[www.dbfz.de](http://www.dbfz.de)

**Autor:innen:** Lilli Sophia Röder, Roy Nitzsche, Hendrik Etzold, Katja Oehmichen

**Datum der Veröffentlichung:** 19. Januar 2024

**Zitierempfehlung:** Röder, L. S.; Nitzsche, R.; Etzold, H.; Oehmichen, K. (2024). Beispielkonzept zur Bereitstellung von erneuerbarem LNG aus biogenen Rest- und Abfallstoffen und erneuerbarem Wasserstoff im kommerziellen Maßstab: Fokusheft im Projekt Pilot-SBG. Leipzig: DBFZ. 31 S. ISBN: 978-3-949807-06-0. DOI: 10.48480/jsct-z879.

**ISBN:** 978-3-949807-06-0

**DOI:** <https://doi.org/10.48480/jsct-z879>

**Layout:** Rico Ehrentraut

Die dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt ausschließlich beim Autor.

## ÜBERSICHT

Der Schwerpunkt dieser Broschüre liegt auf dem technischen Design und der ökologischen und ökonomischen Bewertung eines Bioraffineriekonzeptes für die Bereitstellung von erneuerbarem Methan für den Transportsektor. Die hypothetischen Konzepte für kommerzielle Anlagen im landwirtschaftlichen und

urbanen Raum werden auf Grundlage einer Pilotanlage entwickelt. In **dieser integrierten Anlage werden die modularen Prozessschritte miteinander verbunden und als Kette ganzheitlich demonstriert.** Die Übertragung der Ergebnisse experimenteller Forschungsarbeiten im Technikums- bzw. Pilotmaßstab auf

den kommerziellen Maßstab erfolgt mithilfe digitaler Prozesssimulation. Ziel ist es, die Vorteilhaftigkeit der entwickelten Anlagenkonzepte im Vergleich zu bereits etablierten Verfahren und Verfahrensketten herauszuarbeiten und damit für die kommerzielle Nutzung interessant zu machen.

### Kernthemen der Broschüre

- ▶▶▶ Bewertung eines Beispielkonzeptes zur Herstellung von erneuerbarem Methan aus biogenen Reststoffen und erneuerbarem Wasserstoff
- ▶▶▶ Rahmenbedingungen und Entscheidungsgrundlagen für Anlagenkonzepte im landwirtschaftlichen und urbanen Raum
- ▶▶▶ Methodenbeschreibung zur technischen, ökologischen und ökonomischen Bewertung der entwickelten Anlagenkonzepte
- ▶▶▶ Bewertungsergebnisse eines Anlagenkonzeptes für den landwirtschaftlichen Raum

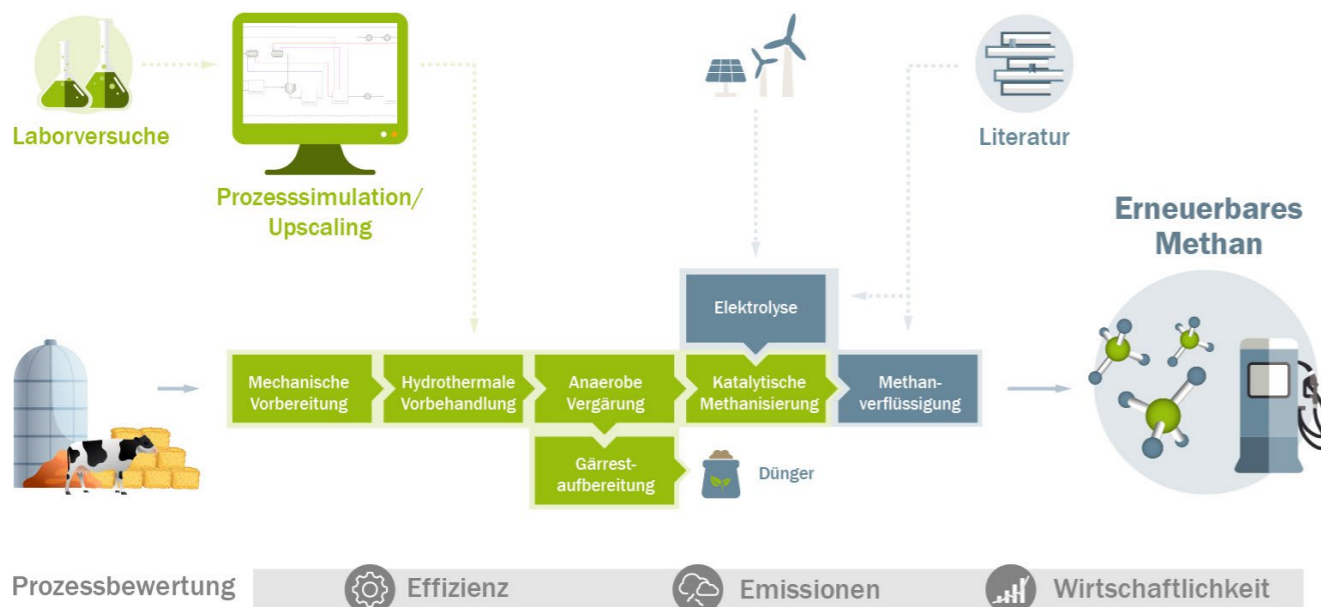


Abbildung 1: Techno-Ökonomische und Ökologische Bewertung einer Bioraffinerie zur Erzeugung von erneuerbarem Methan und Düngemitteln aus biobasierten Rest- und Abfallstoffen



Aun Photographer / shutterstock.com

## HINTERGRUND

Um Emissionen in Verkehr zu reduzieren, muss der Sektor von fossilen Kraftstoffen auf erneuerbare Optionen wie Biokraftstoffe und Elektrofahrzeuge umsteigen. Der Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge ist vielversprechend, aber die geringe Energiedichte der derzeitigen Batterietechnologien stellt ein erhebliches Hindernis für die Elektrifizierung des Langstrecken-, Schwerlast- und Schifffahrtsverkehrs dar. Aktuell wird jedoch derzeit nur ein Bruchteil des Gesamtenergieverbrauchs im Verkehrssektor in Deutschland durch erneuerbare Energiequellen gedeckt [Schröder and Naumann, 2022]. Die überarbeitete EU-Richtlinie für erneuerbare Energien sieht vor, dass bis 2030 14 % der Energie im Verkehrssektor aus erneuerbaren Quellen stammen soll, wobei der Schwerpunkt auf fortschrittlichen Kraftstoffen aus Reststoffen liegt [Schröder and Naumann, 2022].

In Deutschland ist ein großes Potenzial für biogene Reststoffe in landwirtschaftlichen und städtischen Gebieten für die Biokraftstoffproduktion zu sehen. Die anaerobe Vergärung ist eine etablierte Technologie zur Umwandlung von organischen Rohstoffen in Biogas, das hauptsächlich aus

Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) besteht. Biogas kann durch Entfernen des  $\text{CO}_2$  zu Biomethan aufbereitet und als Kraftstoff verwendet oder als Ersatz für fossiles Erdgas in das Erdgasnetz eingespeist werden.

Ein weiterer Ansatz zur Herstellung fortschrittlicher Kraftstoffe ist die Verwendung von erneuerbarem Strom zur Erzeugung von grünem Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) durch Elektrolyse, der dann mit  $\text{CO}_2$  kombiniert werden kann, um erneuerbares  $\text{CH}_4$  zu erzeugen. Eine Trennkaskade zur Verarbeitung der anaeroben Gärreste erweitert das Produktportfolio der Anlage um wertvolle organische und anorganische Düngemittel. Durch die Kombination dieser Technologien kann eine kaskadierte Bioraffinerie geschaffen werden, die fortschrittliche Kraftstoffe und wertvolle Nebenprodukte aus Reststoffen erzeugt, ohne dass Abfälle anfallen.

Diese Broschüre konzentriert sich auf das technische Design sowie die wirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Bioraffineriekonzeptes für die Integration von Biomethan und erneuerbarem  $\text{H}_2$  in den Verkehrssektor. Prozesssimulation wurde als Mittel genutzt, um Ergebnisse

experimenteller Forschungsarbeiten im Technikums- und Pilotmaßstab auf eine kommerzielle Größe zu skalieren und die ökologische und ökonomische Bewertung der wichtigsten Kostentreiber und Umweltauswirkungen vorzunehmen. Der Entwurf und die Planung von Anlagenkonzepten im industriellen Maßstab soll als Grundlage für die Bewertung einer wirtschaftsrelevanten Anlage dienen. Dadurch ist eine techno-ökonomische Bewertung der Anlage erst sinnvoll und durchführbar.

Auf Grundlage der am Deutschen Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ) errichteten Pilotanlage wurden Beispielkonzepte für den landwirtschaftlichen (Agrar) und urbanen (Urban) Raum entwickelt. Diese Anlagenkonzepte stellen eine Basis für die weitere Prozessentwicklung und Erörterung offener Forschungsfragen dar. Im Rahmen der Pilotierung sollen diese Ansätze möglichst zu vielversprechenden Ergebnissen führen. Ziel ist es, die Vorteilhaftigkeit der entwickelten Anlagenkonzepte im Vergleich zu bereits etablierten Verfahren und Verfahrensketten herauszuarbeiten und somit für die kommerzielle Nutzung interessant zu machen.

## VORGEHEN ZUR ENTWICKLUNG DER ANLAGENKONZEPTE

Um ein Anlagenkonzept im industriellen Maßstab zu beschreiben und zu bewerten, ist es wichtig, alle relevanten Rahmenbedingungen einzubeziehen:

- Verfügbarkeit und regionale Verteilung geeigneter Ressourcen:
  - ▶▶▶ Fokusheft *Standortanalyse und Ressourcenverteilung für erneuerbares LNG im Verkehr*
- Standortoptimierung hinsichtlich Vermarktung und Distribution von Endprodukten
  - ▶▶▶ Fokusheft *Standortanalyse und Ressourcenverteilung für erneuerbares LNG im Verkehr*
  - ▶▶▶ Fokusheft *Infrastruktur für erneuerbares Methan im Verkehr*
- Rechtliche Rahmenbedingungen und Marktmechanismen für Methan als Kraftstoff
  - ▶▶▶ Fokusheft *Marktanalyse und Treibhausgasquote für erneuerbares Methan im Verkehr*

Es werden grundsätzlich zwei beispielhafte Bereitstellungskonzepte für den kommerziellen Maßstab abgebildet:

1. im landwirtschaftlichen Raum (Agrar) zur Verarbeitung von Rindergülle sowie Getreidestroh mit erneuerbarem Wasserstoff und
2. im städtischen Raum (Urban) zur Verarbeitung von Biogut und Grüngut sowie erneuerbarem Wasserstoff.



Fokusheft im Projekt Pilot-SBG  
**Standortanalyse und Ressourcenverteilung für erneuerbares LNG im Verkehr**



Fokusheft im Projekt Pilot-SBG  
**Infrastruktur für erneuerbares Methan im Verkehr**



Fokusheft im Projekt Pilot-SBG  
**Marktanalyse und Treibhausgasquote für erneuerbares Methan im Verkehr**



## ROHSTOFFPOTENZIALE

Die Dimensionierung der Anlagenkonzepte zur Herstellung von erneuerbarem CH<sub>4</sub> aus biogenen Reststoffen und erneuerbarem Wasserstoff orientiert sich im Wesentlichen an der Verteilung und Verfügbarkeit der nutzbaren Rohstoffe in der Beispielregion Sachsen/Sachsen-Anhalt. Darüber hinaus werden ökonomische Abschätzungen zu angemessenen Transportentfernungen der Rohstoffe mitberücksichtigt. Im Folgenden werden die Rohstoffpotenziale und die sich daraus ergebenden potenziellen Substratmassenströme dargestellt.

Für das Beispielkonzept Agrar die Ressourcen Getreidestroh und Rindergülle:

- Setzt man den Flächenanteil der Beispielregion ins Verhältnis zu Gesamtdeutschland so zeigt sich eine überdurchschnittliche Verfügbarkeit für Getreidestroh. Die Beschaffungskosten werden hauptsächlich durch den Rohstoffpreis und nur geringfügig durch Trans-

portkosten bestimmt. Das heißt, auch größere Transportradien von bis zu 50 km stellen logistisch kein Hindernis dar. In diesem Umkreis wären in der Beispielregion Anlagendimensionen von 80.000 – 160.000 t/a Getreidestroh denkbar.

- Verfügbare bzw. noch ungenutzte Rindergüllepotenziale finden sich vor allem in kleineren Betrieben, was zu einem hohen logistischen Aufwand führt. Zudem stellen Transportradien von größer 10 – 20 km eine Herausforderung dar, da es z. B. zur Sedimentation von Partikeln in den Transporttanks kommen kann und somit zu einer erschwerten Entleerung dieser. Wird also ein Entfernungsradius von maximal 10 km angenommen, so finden sich in der Beispielregion viele Bereiche wo bis zu 30.000 t/a Rindergülle zur Verfügung stehen. Die Transportkosten für diese Distanz betragen in etwa 3,3 – 5,0 €/t.

Für das Beispielkonzept Urban die Ressourcen Grün- und Biogut (DBFZ, 2020):

Bezogen auf die Fläche liegt das technische Biomassepotenzial für Bio- und Grüngut in der Beispielregion unter dem bundesdeutschen Durchschnitt. Aufgrund der grundsätzlich sehr heterogenen Verteilung der anfallenden und gesammelten Mengen wird für ein möglichst breit übertragbares Beispielkonzept die Nutzung von jeweils 10.000 – 15.000 t/a Bio- und Grüngut angenommen.

- ▶▶▶ Fokusheft *Standortanalyse und Ressourcenverteilung für erneuerbares LNG im Verkehr*



## ANLAGENKONZEPTENTWICKLUNG

Die beispielhaften Anlagenkonzepte zur Herstellung von erneuerbarem CH<sub>4</sub> aus biogenen Rest- und Abfallstoffen und erneuerbarem Wasserstoff sind in Form eines schematischen Blockfließbildes in Abbildung 3 dargestellt. Das Beispielkonzept Agrar umfasst die Prozessschritte: mechanische Vorbereitung und Mischung, hydrothermale Vorbehandlung, anaerobe Vergärung, katalytische Methanisierung, Gasverflüssigung und Gärrestaufbereitung bestehend aus einer Fest-Flüssig- und Flüssig-Flüssig-Trennung. Das Beispielkonzept Urban umfasst die Prozessschritte mechanische Vorbereitung, anaerobe Vergärung, katalytische Methanisierung, Gasverflüssigung, hydrothermale Karbonisierung, mechanische Entwässerung und Nährstoffrückgewinnung (Flüssig-Flüssig-Trennung).

Das erneuerbare H<sub>2</sub> für die katalytische Methanisierung wird mittels alkalischer Elektrolyse mit einem spezifischen Energiebedarf von 4,6 kWh/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub> bereitgestellt [Smolinka and Garche, 2022].

Mit Ausnahme der Gasverflüssigung wurden für die anderen Prozessschritte konzeptionelle Fließbilder entwickelt und in die Flowsheeting Software Aspen Plus® V10 überführt. Datengrundlage für die Prozesssimulation/-bilanzierung mit Aspen Plus® V10 sind die Ergebnisse der Vorversuche am DBFZ zum Betrieb der Pilotanlage sowie Literaturdaten. Die Gasverflüssigung erfolgt nach dem Verfahren des Mixed Refrigerant Cycle mit einem spezifischen Energiebedarf von 0,65 kWh/kg [angelehnt an Spoof-Tuomi, 2020].

Für die Beispielkonzepte wird eine jährliche Betriebszeit von 8.000 Stunden vorausgesetzt, so sind Eventualitäten wie Reparatur- und Wartungsarbeiten, Shut-Downs etc. gut abgedeckt. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass der benötigte Strom für die einzelnen Prozessschritte durch Solar- und Windenergie aus dem Stromnetz bereitgestellt wird und ein mit Holzhackschnitzeln befeuerter Dampferzeuger Prozesswärme von bis zu 500 °C bereitstellt [Lenz et al., 2020].

Grundlage für Dimensionierungen und Substratverhältnisse bilden die zuvor dargestellte Potenzialanalyse (Kapitel >>> Rohstoffpotenziale) sowie Überlegungen und experimentelle Erkenntnisse zu geeigneten Kohlenstoff (C) zu Stickstoff (N) Gewichtsanteilen während der anaeroben Vergärung [Weinrich, 2017].

Die innovativen Anlagenkonzepte setzen sich aus zum Teil bereits etablierten Prozessschritten sowie neuen Verfahrensansätzen zusammen. Im Folgenden werden diese getrennt nach den Beispielkonzepten Agrar und Urban beschrieben.

Abbildung 2: Pilotanlage für erneuerbares Methan aus biogenen Reststoffen und grünem Wasserstoff am Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH in Leipzig

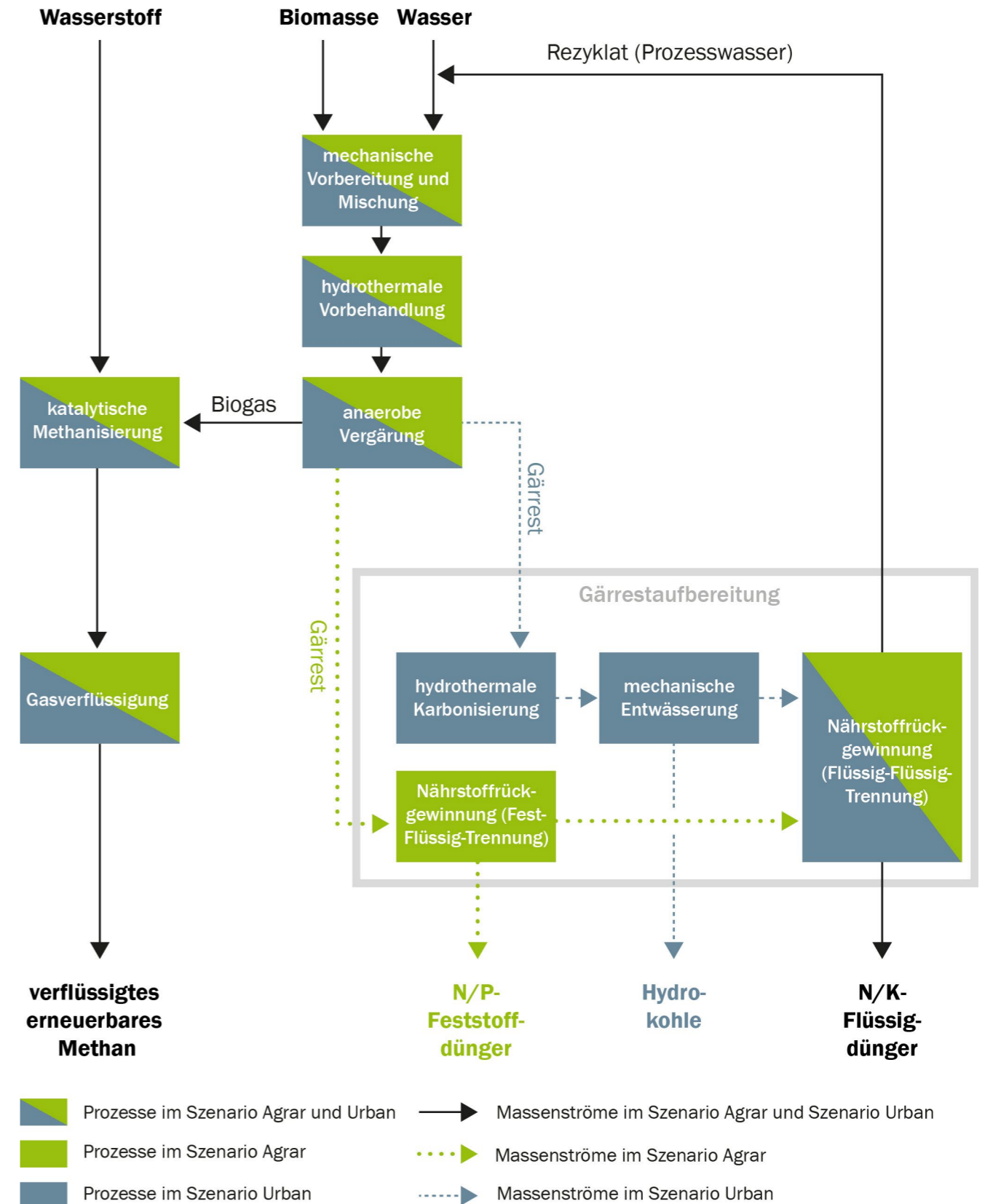


Abbildung 3: Blockfließbild für die Beispielkonzepte zur Herstellung von erneuerbarem CH<sub>4</sub> aus biogenen Rest- und Abfallstoffen und erneuerbarem Wasserstoff

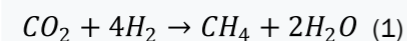
## Beispielkonzept Agrar

Im Beispielkonzept Agrar werden im ersten Prozessschritt der mechanischen Vorbereitung Getreidestroh durch eine Strohmühle und Rindergülle mittels Lochscheibenzerkleinerer zerkleinert und Störstoffe abgeschieden. Das vergrößert die Partikeloberfläche und führt zu einer besseren Verfügbarkeit abbaubarer Substanzen, wodurch höhere Gasausbeuten und eine bessere Förderbarkeit erzielt werden. Die zerkleinerte Biomasse wird anschließend mit Wasser auf einen Trockensubstanzgehalt von 10 % angemaischt und über eine Förderschnecke der hydrothermalen Vorbehandlung, d. h. einem Prozess bei erhöhter Temperatur (160 °C) und Druck (7 bar), zugeführt. Die hydrothermale Vorbehandlung ermöglicht die Umwandlung schwervergärbare Kohlenhydrate (z. B. Cellulose und Hemicellulose) in zuckerreiche, leicht vergärbare Bestandteile. Dadurch kann die hydraulische Verweilzeit während der anaeroben Vergärung um bis zu 30 % reduziert werden [Zerback et al., 2022].

Die im Beispielkonzept Agrar für die anaerobe Vergärung zum Einsatz kommende Rührkesselfermenter sind für die Verarbeitung landwirtschaftlicher Ressourcen bereits etabliert und in der breiten Anwendung. Der vorbehandelten Substratmischung wird in den Fermentern Harnstoff hinzugefügt, um ein C:N-Verhältnis von 35:1(m/m) zu erreichen. Bei einer Temperatur von 39 °C, Umgebungsdruck und einer Verweilzeit von 18 Tagen werden die organischen Substanzen mit Hilfe

von Mikroorganismen in  $\text{CH}_4$  und  $\text{CO}_2$  umgewandelt, das so genannte Biogas.

In der katalytischen Methanisierung wird das Rohbiogas zuerst gereinigt, d.h. Störstoffe wie z. B. Schwefelwasserstoff werden entfernt, und anschließend zweistufig auf 25 bar komprimiert. Das gereinigte und komprimierte Biogas wird auf 300 °C aufgeheizt und dem Methanisierungsreaktor zugeführt. Dort reagiert das im biologischen Prozess erzeugte  $\text{CO}_2$  mit elektrolytisch hergestelltem  $\text{H}_2$  zu  $\text{CH}_4$  (Gl. (1)) und erhöht somit die  $\text{CH}_4$ -Ausbeute.



Im Anschluss an die Methanisierungsreaktion wird das produzierte Wasser bei 45 °C und Umgebungsdruck auskondensiert. Um die Anforderungen der Gasverflüssigung zu erfüllen muss der Wassergehalt im Produktgas weiter gesenkt werden. Zu diesem Zweck wird das Gas mit Molekularsieben weiter getrocknet.

Die katalytische Methanisierung ist eine exotherme Reaktion, d. h. sie setzt Wärme frei, welche mit Wasser gekühlt wird. Diese Überschuss- bzw. Abwärme kann genutzt werden, um andere Verfahrensschritte in der Prozesskette, wie z. B. die hydrothermale Vorbehandlung und/oder anaerobe Vergärung, mit Energie zur versorgen. Hauptprodukt des Beispielkonzeptes ist erneuerbares verflüssigtes  $\text{CH}_4$ .

Der nicht zu Biogas vergorene Anteil der Biomasse, der so genannte Gärrest, wird während der Gärrestaufbereitung zu einem festen Dünger, der reich an N und Phosphor (P) ist, und einem flüssigen Dünger, der reich an N und Kalium (K) ist, aufbereitet wie in Abbildung 4 dargestellt.

Die Feststoffe im Gärrest werden in einer ersten Fest-Flüssig-Trennung mittels Pressschnecke separator abgetrennt. Für die weitere Klärung der resultierenden Flüssigphase werden der Suspension Flockungsmittel zugesetzt und unter Verwendung einer Dekanterzentrifuge separiert. Die Feststoffe der mechanischen Trennprozesse werden zusammengeführt und ergeben einen N/P-Feststoffdünger. 30 % der flüssigen Phase wird in die mechanische Vorbereitung zurückgeführt, um zum einen Frischwasser einzusparen und zum anderen die Kapazität der nachfolgenden Filtrationsprozesse zu reduzieren. Während der Ultrafiltration (UF) wird ein wesentlicher Anteil der gelösten Organik, insbesondere Makromoleküle, zurückgehalten, aufkonzentriert und erneut der Dekanterzentrifuge zugeführt. Der Permeatstrom wird mit konzentrierter Schwefelsäure angesäuert, um das Gleichgewicht zwischen Ammonium und Ammoniak selektiv zu verschieben. Im finalen Schritt werden die Nährstoffe durch Umkehrosiose (UO) zu einem N/K-Flüssigdünger aufkonzentriert und gereinigtes Wasser wird für die Anmischung in der mechanischen Vorbereitung bereitgestellt.

## Beispielkonzept Urban

Im urbanen Beispielkonzept findet die Rohstoffvorbereitung von Grün- und Biogut analog zum Konzept Agrar statt. Sofern sie sich als vorteilhaft herausstellt, kann auch eine optionale hydrothermale Vorbehandlung zum Einsatz kommen. Die Biomasse wird anschließend mit Wasser auf einen TS-Gehalt von 25 % angemaischt. Die anaerobe Vergärung findet in einem Pflropfenstromfermenter statt, da der Verschleiß im Vergleich zu herkömmlichen Rührkesselfermentern geringer ist und tendenziell höhere Ausbeuten an Biogas zu erwarten sind. Das gewon-

nene Biogas wird in der katalytischen Methanisierung und in der anschließenden Gasverflüssigung zu verflüssigtem erneuerbarem  $\text{CH}_4$  prozessiert. Die Gärreste werden in einer nachgeschalteten hydrothermalen Karbonisierung zu einem kohleartigen Festbrennstoff bzw. Hydrokohle umgewandelt. Die mechanische Entwässerung der Hydrokohle findet mittels Kammerfilterpresse bis zu einem TS-Gehalt von 35 % und die weitere Trocknung in einem Trommelrockner bis zu einem TS-Gehalt von 90 % statt. Das Karbonisierungsprodukt weist dabei eine deutlich bessere

mechanische Entwässerbarkeit auf im Vergleich zu den unbehandelten Gärresten. Die anfallenden Flüssigfraktionen nach der mechanischen Entwässerung werden wie beschrieben über UF und UO zu einem N/K-Flüssigdünger aufgearbeitet. Das aufgereinigte Prozesswasser wird für die Anmischung recirculiert.

Die Infobox fasst wichtige Unterschiede für das urbane Beispielkonzept zusammengefasst. Es handelt sich größtenteils um Annahmen, welche im weiteren Projektverlauf untersucht und bewertet werden sollen.



### Unterschiede Urban

#### Ressourcen und Produkte

- Das urbane Beispielkonzept hat eine Verarbeitungskapazität von 20.000–25.000 t/a (bezogen auf Frischmasse), zusammengesetzt aus einem 1:1 (m/m) Verhältnis aus Grüngut und Biogut. Dies entspricht in etwa dem Aufkommen in durchschnittlichen kreisfreien Städten und Landkreisen.
- Es stellt sich die generelle Frage der Nutzbarkeit der Flüssigfraktion nach der hydrothermalen Karbonisierung als potenzielles Düngemittel bzw. generell alternativen Nutzungsmöglichkeiten der urbanen Gärreste

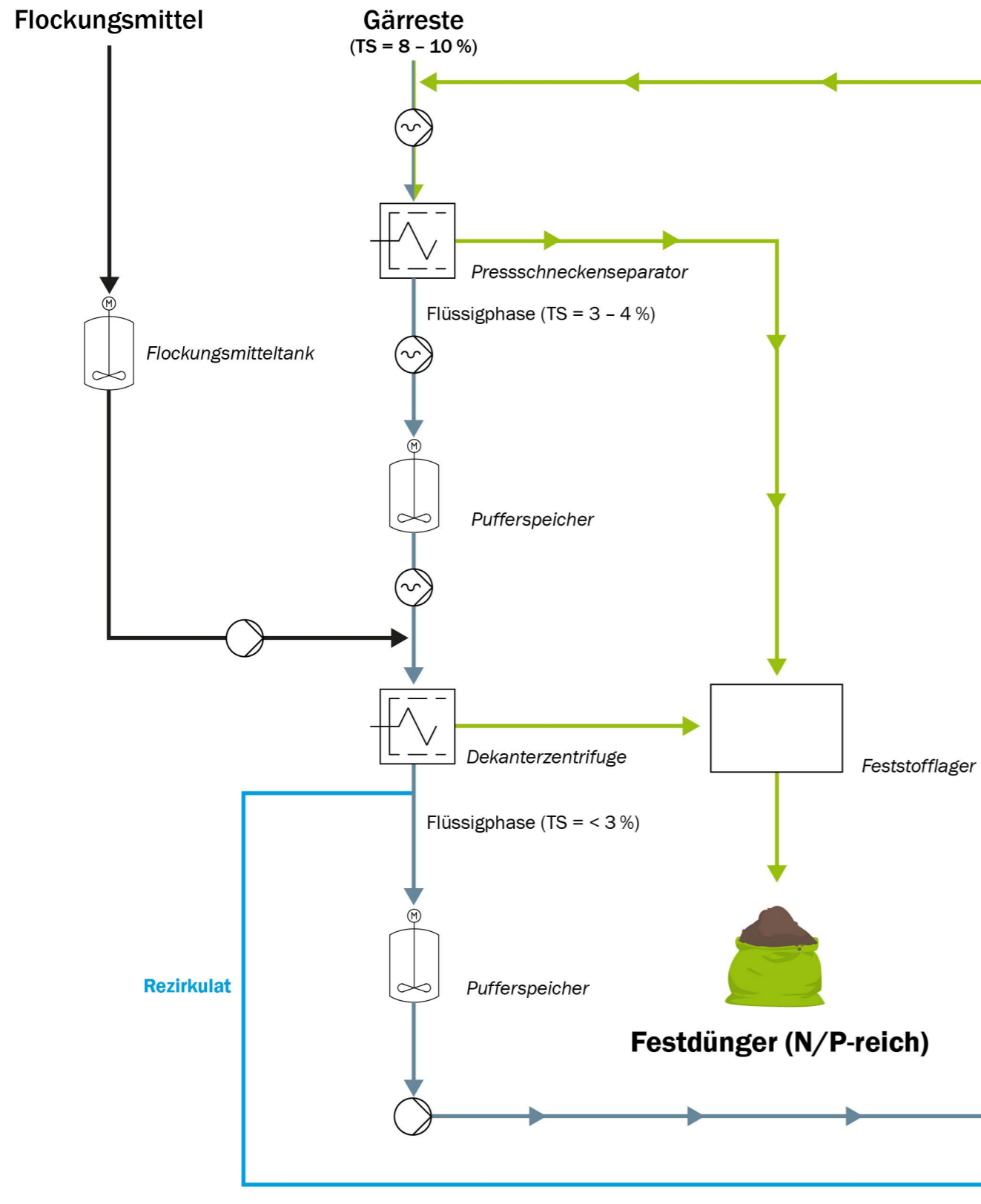
#### Anlagengröße

- Die Anlagengröße des Urbanen Beispielkonzeptes fällt auf Grund der geringeren Ressourcenströme, des geringeren Wassergehaltes im Pflropfenstromfermenter und des eventuell höheren spezifischen Biogasertrags von Biogut und Grünschnitt gegenüber den Reststoffen aus dem ländlichen Raum deutlich geringer aus.

#### Anlagenteile

- Die anaerobe Vergärung erfolgt in einem Pflropfenstromfermenter, da der Verschleiß im Vergleich zu herkömmlichen Rührkesselfermentern geringer ist und tendenziell höhere Ausbeuten an Biogas zu erwarten sind [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe et al., 2016].
- Eine hydrothermale Vorbehandlung findet ggf. nur für das Grüngut statt. Dieses hat einen höheren Wassergehalt als das Stroh im Beispielkonzept Agrar und erfordert eine geringere Wasserzugabe.

## Fest-Flüssig-Trennung



## Flüssig-Flüssig-Trennung

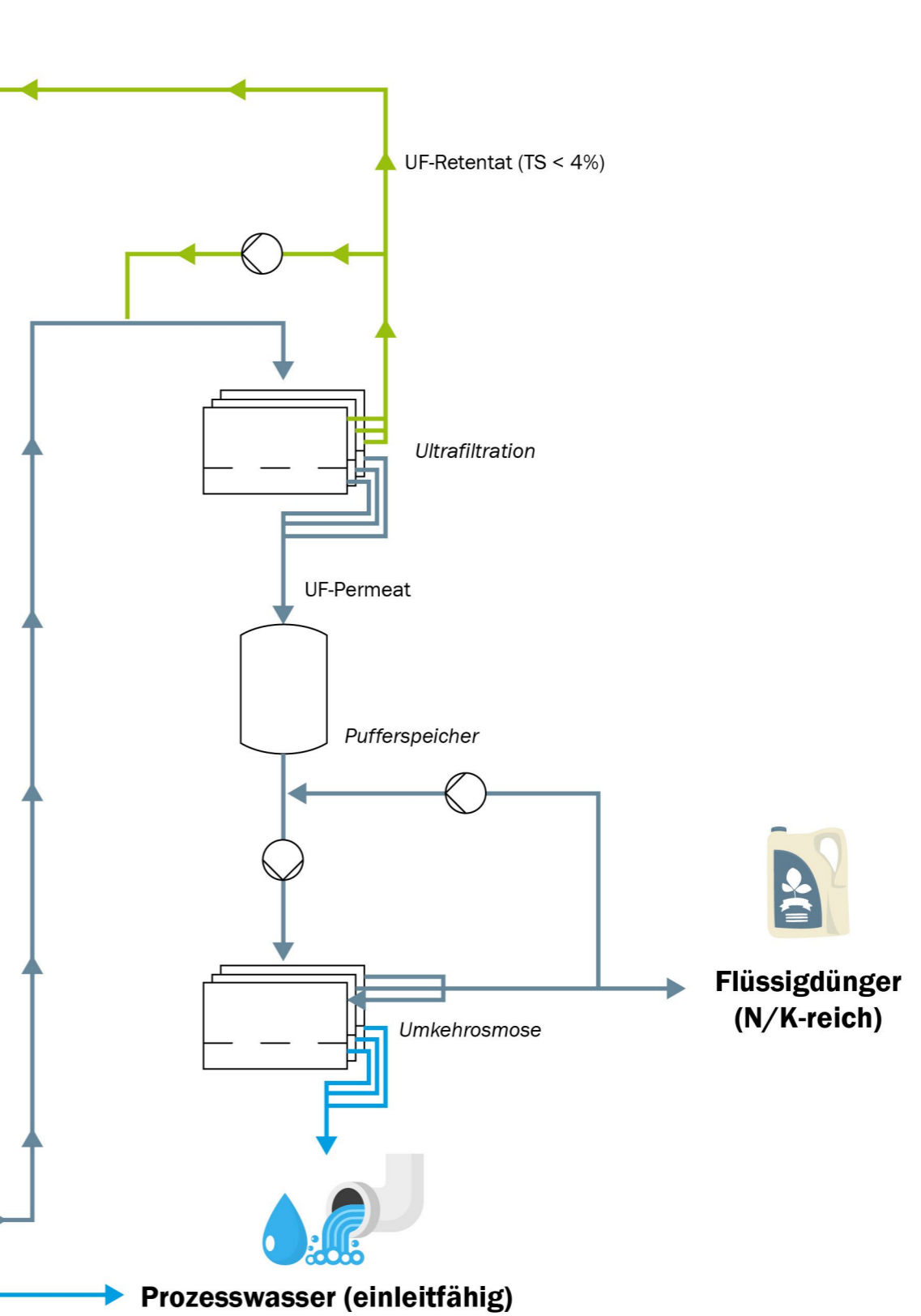


Abbildung 4: Fließbild der Gärrestaufbereitung

## BEWERTUNGSMETHODEN

Als Grundlage für die Bewertung der Beispielkonzepte wurde eine Simulation mittels Aspen Plus V10 erstellt. Eine detailliertere Beschreibung der Simulation kann in der Veröffentlichung von Etzold et al. [2023] nachgelesen werden. Dadurch können Massen- und Energiebilanzen erstellt werden, auf deren Grundlage eine ökologische und ökonomische Bewertung erfolgt.

### Technische Bewertung

Bei der Entwicklung neuer Anlagenkonzepte oder der Übertragung etablierter Verfahren auf neue Anwendungen sollte von Beginn an eine **technische Bewertung** erfolgen, um frühzeitig technische Probleme und Barrieren zu identifizieren [Lindorfer et al., 2019]. Die Erhebung der Massen- und Energiebilanz basiert auf der Einpflegung von Literaturwerten und Ergebnissen experimenteller Ergebnisse in die Prozesssimulation. Der Bedarf an Prozessdampf und prozessinterner Wärmerückgewinnung wird simulationsbasiert ermittelt. Eine einfache Wärmerückgewinnungsanalyse mit der Aspen Energieanalyse ist nicht möglich, da das Programm dickflüssige, inerte Stoffe wie Stroh-Rindergülle nicht berücksichtigt. Daher ist in der Simulation an relevanten Stellen Wärmetauscher eingefügt und so das Potenzial zur Wärmerückgewinnung ermittelt.

Die **Biomassenutzungseffizienz** ist das massenspezifische Verhältnis der nutzbaren Biomasse, die in den Produktströmen endet, im Bezug zur Input-Biomasse [Iffland et al., 2015]. Je näher das Verhältnis an 100% liegt, desto effizienter ist die Biomassekonversion und umso weniger Abfall fällt an. Es kann zwischen der stofflichen ( $BUE_M$ ) und der energetischen ( $BUE_E$ ) Produktnutzung unterschieden werden [Andersen et al., 2018].  $BUE_M$  wird nach Gl. (2) als Summe der Masse der verschiedenen Produkte ( $m_{P,i}$ ), d. h. der festen und flüssigen Düngemittel, geteilt durch die Masse der Input-Biomasse ( $m_{IB}$ ) berechnet.

$$BUE_M = \frac{\sum m_{P,i}}{m_{IB}} \quad (2)$$

$BUE_E$  wird nach Gl. (3) berechnet als die Masse des bereitgestellten Energieträgers ( $m_E$ ), d. h. das Methan im Biogas, geteilt durch die Masse der Input-Biomasse.

$$BUE_E = \frac{m_E}{m_{IB}} \quad (3)$$

Die **Energiekonversionseffizienz** (ECE) als energetischer Bewertungsindikator (Gl. (4)) ist definiert als der Energieoutput in den Produkten ( $m_{P,i} \cdot LHV_{P,i}$ ) geteilt durch den Energieinput, welcher die Rohstoffe ( $m_{R,i} \cdot LHV_{R,i}$ ), elektrische Energie ( $Q_E$ )

$$ECE = \frac{\sum m_{P,i} \cdot LHV_{P,i}}{\sum m_{R,i} \cdot LHV_{R,i} + \frac{Q_E}{\eta_E} + \frac{Q_W}{\eta_W}} \quad (4)$$

und den Wärmebedarf ( $Q_W$ ) enthält. Die Berechnungen basieren auf den folgenden Annahmen: (a) die unteren Heizwerte ( $LHV$ ) der Rohstoffe und der Produkte werden nach Boie bestimmt [Grote and Feldhusen, 2014], (b) Elektrizität wird durch das Stromnetz mit einem Wirkungsgrad von 100% ( $\eta_E$ ) bereitgestellt und (c) Prozesswärme bis 500 °C wird durch einen holzschnitzelbefeuerten Dampferzeuger mit einem Wirkungsgrad von 87% ( $\eta_W$ ) bereitgestellt [Klavina and Selegovskis].

## Ökologische Bewertung

Die Bilanzierung von Treibhausgasen ist häufig Teil einer umfassenden Ökobilanz. Zur Erstellung einer Ökobilanz wird der Lebenszyklus des untersuchten Produktes von der Rohstofferschließung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung analysiert. Dabei werden auch alle entlang des Lebensweges verwendeten Hilfs- und Betriebsstoffe betrachtet. Die mit der Produktion und Nutzung dieser Hilfs- und Betriebsstoffe sowie der sonstigen Produkte und Dienstleistungen verbundenen Aufwendungen und Emissionen werden in der THG-Bilanz berücksichtigt. Die Methode der Ökobilanzierung ist definiert in den DIN ISO Standards 14040 und 14044 [ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006].

Der Bilanzierungsrahmen umfasst die gesamte Prozesskette zur  $CH_4$ -Bereitstellung und beginnt für beide Beispielkonzepte Agrar und Urban mit der Sammlung und dem Transport der Substrate Gülle, Stroh und Bioabfall. Da es sich bei diesen Substraten um Rest- und Abfallstoffe handelt, werden vorgelagerte Prozesse nicht berücksichtigt.

Die beschriebene Methodik ermöglicht es, Gutschriften für die Verwendung von Gülle als Biogassubstrat zu berücksichtigen. Die konventionelle Lagerung von Gülle kann zu erheblichen  $CH_4$ -Emissionen führen [Dämmgen and Webb, 2006]. Diese Emissionen können reduziert werden, wenn Gülle als Substrat zeitnah für die Biogasproduktion ver-

wendet wird [Haenel et al., 2014; Oehmichen and Thrän, 2017]. Dafür kann eine Gutschrift von 45 g  $CO_2$ -Äq. pro verwendetem MJ Gülle (d.h. 54 kg  $CO_2$ -Äq./t bezogen auf Frischmasse) vergeben werden [European Commission, 2018]. Für die diffusen  $CH_4$ -Emissionen aus der Biogasproduktion findet sich sehr häufig ein Emissionswert von 1%  $CH_4$ -Verlust, bezogen auf die produzierte  $CH_4$ -Menge [Vetter and Arnold, 2010]. Dieser Wert fand auch in den vorliegenden Berechnungen Anwendung.

Die Massen- und Energieströme für das betrachtete  $CH_4$ -Produktionskonzept wurden anhand von Prozesssimulationen ermittelt. Die Ergebnisse der THG-Bilanzierung sind auf 1 MJ  $CH_4$  bezogen.

## Ökonomische Bewertung

Zur Abschätzung der betriebswirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit des untersuchten Anlagenkonzeptes sind die Gesteungskosten in Anlehnung an die Richtlinie VDI 6025 ermittelt. Im Rahmen dieses Projektes eignet sich insbesondere die Annuitätenmethode und die Berechnung der mittleren spezifischen Gesteungskosten. Damit kann später das erneuerbare  $CH_4$  mit einem Substitut am Markt verglichen werden.

Die jährlichen Gesteungskosten des Hauptproduktes setzen sich aus kapitalgebundenen, verbrauchsgebundenen, betriebsgebundenen und sonstigen Kosten, abzüglich der Erlöse für Nebenprodukte zusam-

men. Die kapitalgebundenen Kosten umfassen Investitionen, Wartungen und kalkulatorische Zinsen. Die verbrauchsgebundenen Kosten umfassen die Aufwendungen für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie die Energiekosten. Zu den betriebsgebundenen Kosten zählen die Aufwendungen für Personal und Instandhaltung. In den sonstigen Kosten sind Aufwendungen für Versicherungen, Verwaltung und ein Unsicherheitszuschlag enthalten. Mit Hilfe der Annuitätenmethode werden auch nichtperiodische Zahlungen (z. B. Investitionen) sowie periodische Zahlungen mit variablen Beträgen (z. B. Zinsen) in periodisch konstante Zahlungen über den Betrachtungszeitraum umgerechnet und durch Division mit der jährlich konstanten Produktionsmenge in die durchschnittlichen Herstellungskosten überführt. Eine ausführlichere Beschreibung der ökonomischen Annahmen und kann der Veröffentlichung von Etzold et al. [2023] entnommen werden.



## ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Zum aktuellen Zeitpunkt sind die Wissens- und Datengrundlage für das Beispielkonzept Agrar aufgrund umfassender experimenteller Voruntersuchungen deutlich ausgereifter als jene für das urbane. Deshalb sind im nachfolgenden Kapitel zunächst die Ergebnisse dieser Bewertung dargestellt. Ein Ausblick welche Änderung eine Betrachtung des urbanen Beispielkonzeptes mit sich bringen könnte, wird ebenfalls gegeben. Eine umfangreiche Beschreibung zum Vorgehen und zur Einordnung dieser Bewertung kann Etzold et al. [2023] entnommen werden.

## TECHNISCHE BEWERTUNG

Basierend auf den per Simulation erstellten Massen- und Energiebilanzen werden Biomassenutzungs- und Energiekonversionseffizienz berechnet. Zudem werden ausgehend von den in die jeweiligen Prozesse eingehenden Masse- und Energieströmen ökonomische Faktoren wie Dimensionierung der Anlagenteile und Betriebskosten bestimmt. Ebenfalls hängen ökologische Bewertungen von diesen Ressourcenströmen ab. Die Massen- und Energiebilanzen für das Beispielkonzept Agrar sind in Abbildung 5 und Abbildung 6 dargestellt.

Die Verarbeitungskapazität im Beispielkonzept Agrar beträgt 51.520 t/a FM zusammengesetzt aus einem 1:1 (m/m) Verhältnis aus

Getreidestroh und Rindergülle. Diese Verarbeitungskapazität entspricht damit in etwa der von Biomethananlagen mit einer Einspeisekapazität von ca. 1500 m<sup>3</sup>/h bzw. von Biogasanlagen, die das Biogas mit einer elektrischen Leistung von etwa 2,5 MW (jeweils ohne Methanisierung mit Wasserstoff) verstromen.

Das Anmischen im Anschluss an die mechanische Vorbereitung der Einsatzstoffe ist durch einen hohen Prozesswasserbedarf von 26,16 t/h gekennzeichnet um die trockenen Rohstoffe einzuweichen, pumpfähig und verarbeitbar zu machen. Durch internes Wasserrecycling kann der

Nettobedarf auf 3,14 t/h reduziert werden. Bei der hydrothermalen Vorbehandlung wird das schwer vergärbare Biomassesubstrat in ein leicht vergärbares, zuckerhaltiges Gemisch umgewandelt. Hierfür müssen keine zusätzlichen Stoffströme zugeführt werden. Um ein ausreichend hohes C:N-Verhältnis in der anaeroben Vergärung zu erreichen, wird dem Prozess Harnstoff gemischt mit Wasser zugeführt. Vor der katalytischen Methanisierung werden Wasser und Verunreinigungen aus dem Rohbiogas abgetrennt, welches dann dem exothermen Reaktorsystem zugeführt wird. Die resultierenden 1,10 t/h erneuerbares CH<sub>4</sub> werden anschließend verflüssigt.

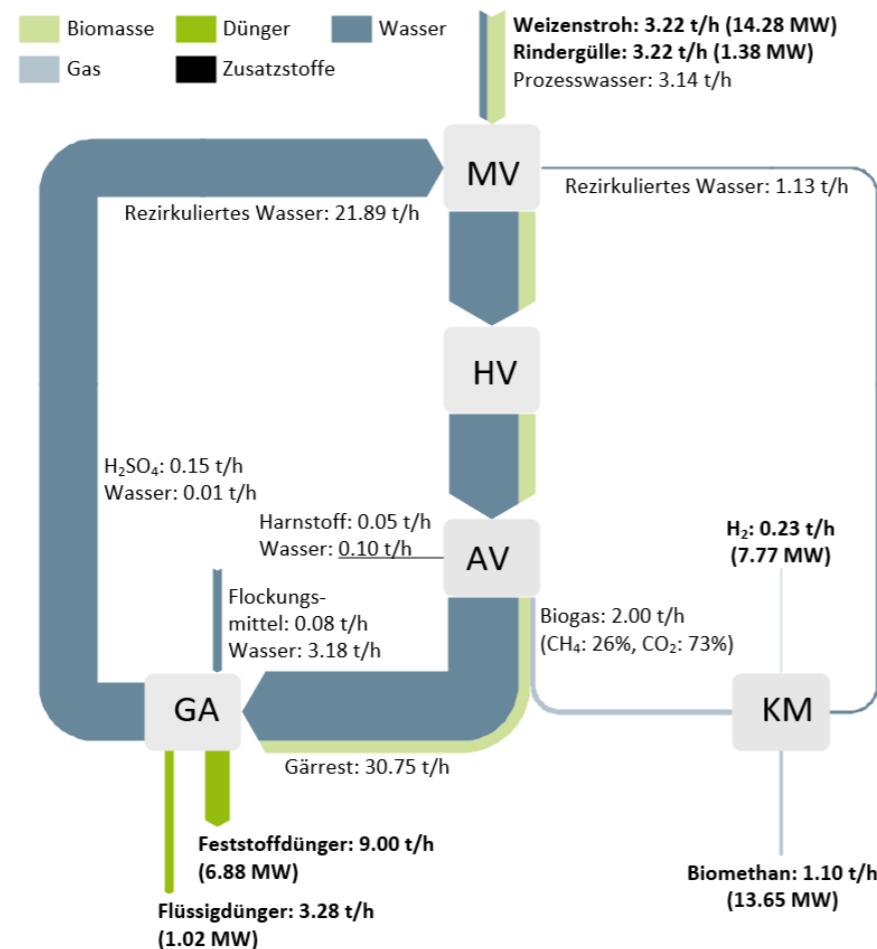


Abbildung 5: Massenbilanz des Beispielkonzeptes Agrar (MV: Mechanische Vorbereitung, HV: Hydrothermale Vorbehandlung, AV: Anaerober Vergärung, KM: Katalytische Methanisierung, GA: Gärrestauffbereitung)

Die Zugabe von 0,08 t/h Flockungsmittel mit 3,18 t/h Wasser in die Gärrestauffbereitung verbessert die Feststoffabtrennung und es werden etwa 9 t/h N/P-reicher Feststoffdünger erzeugt. Zur Verbesserung des Ammoniakrückhalts wird 0,015 konzentriertes H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (96 %) der UO zugesetzt, was zu 3,28 t/h N/K-reichen Flüssigdünger führt. Insgesamt 91,6% der gesamten Prozesswasserbedarfs können durch interne Rezirkulation gedeckt werden.

Von der insgesamt verbrauchten elektrischen Energie entfallen 36,7% auf die Gasverflüssigung, 18,9% auf die hydrothermale Vorbehandlung und jeweils 16,3% auf die katalytische Methanisierung und Gärrestauffbereitung. Für die Bereitstellung des Wasserstoffs mittels alkalischer Elektrolyse wird mehr als sechsmal so viel elektrische Energie (11.868 kW) benötigt wie für die gesamte Bioraffinerie.

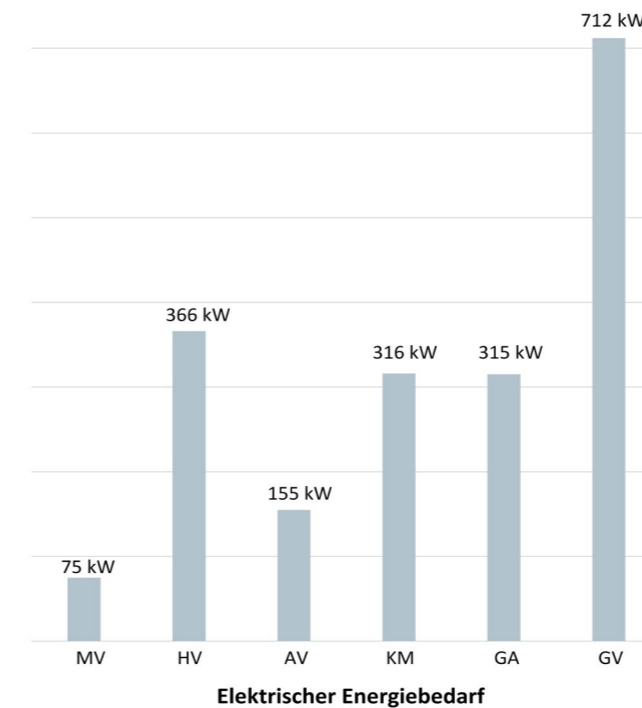
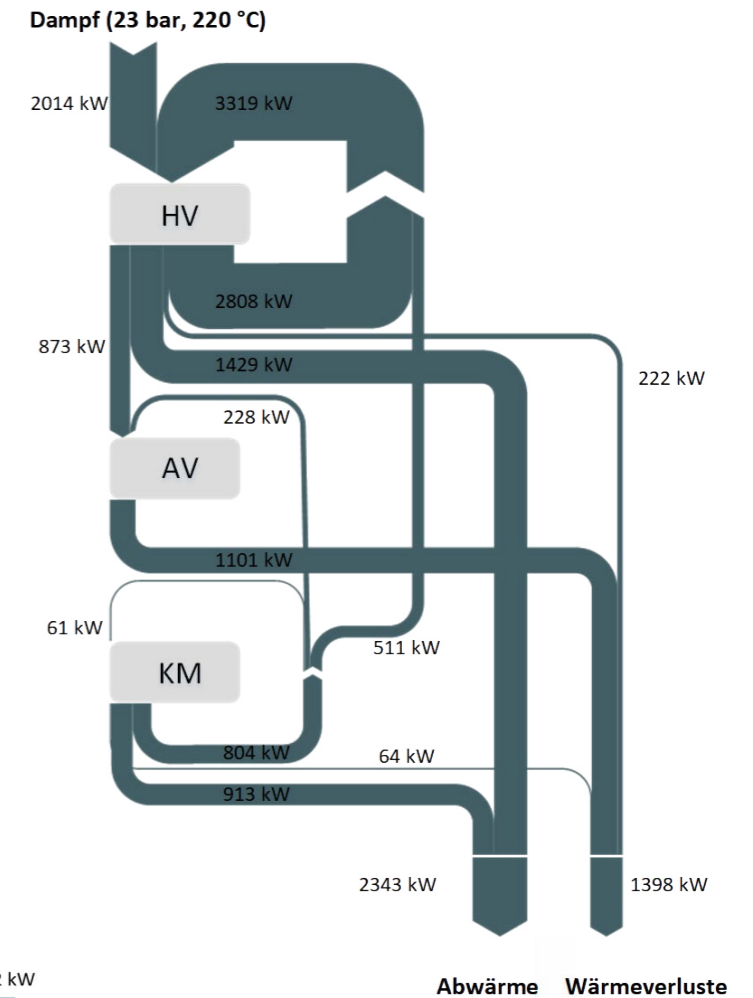


Abbildung 6: Wärmebilanz und elektrischer Energiebedarf des Beispielkonzeptes Agrar (MV: Mechanische Vorbereitung, HV: Hydrothermale Vorbehandlung, AV: Anaerober Vergärung, KM: Katalytische Methanisierung, GA: Gärrestauffbereitung, GV: Gasverflüssigung)



Durch Wärmerückgewinnung kann der Bedarf an Prozessdampf für die hydrothermale Vorbehandlung um 62% reduziert werden. Ein Teil dieser Wärme wird im Prozess selbst zurückgewonnen, weitere Wärme wird aus der exothermen, katalytischen Methanisierung gewonnen. Durch die Kaskadierung kann die zurückgewonnene Wärme, deren Energieniveau nach dem Vorbehandlungsprozess leicht gesunken ist, immer noch ausreichend Energie für den Haupt- und Nachgärer der anaeroben Vergärung liefern. Allerdings gehen trotz der verschiedenen Wärmerückgewinnungsstufen ca. 70% der Abwärme durch Übertragungsverluste und nicht nutzbare Temperaturniveaus verloren.

Für die Abschätzung der stofflichen Biomassennutzungseffizienz BUEM werden die Kohlenhydrate sowie die in den festen und flüssigen Düngemitteln enthaltenen Nährstoffe (P, N, K) berücksichtigt, da diese bei direkter Ausbringung zu einer Verbesserung der Bodenqualität beitragen [Andersen et al., 2018]. Laut Berechnungsmethode beträgt die BUEM für die erzeugten Düngeprodukte (N/P-Feststoffdünger und N/K-Flüssigdünger) 18,3% bezogen auf die TS der Input-Biomasse. Würden jedoch alle anorganischen Bestandteile im Gärrest mit betrachtet werden, so ergäbe sich eine BUEM von 45,4%. Das heißt, dass durch die BUEM Berechnung mehr als die Hälfte der TS in den Düngemitteln als nicht verwertbare Biomasse angesehen wird, obwohl durchaus mehr Verwertbare Bestandteile vorhanden sind. Die energetische Biomassennutzungseffizienz BUEE für das produzierte CH<sub>4</sub> im Biogas beträgt 16,9% bezogen auf die TS der Input-Biomasse. Die Ergebnisse für BUEM liegen im Bereich der höchstmöglichen realistischen Werte für die Biomassennutzung die vom Nova Institut berechnet wurden und BUEE sind in guter Übereinstimmung mit vergleichbaren Fallbeispielen [Andersen et al., 2018; Iffland et al., 2015].

Die Energiekonversionseffizienz ECE für das Primärprodukt CH<sub>4</sub> beträgt

- 34,4 vor bzw. 33,4% nach der Gasverflüssigung und
- 52,8% für das gesamte Beispielkonzept Agrar einschließlich der Bereitstellung von festem und flüssigem Dünger.

Diese Werte liegen in der Größenordnung anderer Fallbeispiele [Wu et al. 2016; Pöschl et al. 2010]. Eine Stei-

gerung der ECE und der BUEM könnte durch, z. B. höhere CH<sub>4</sub>-Ausbeuten während der anaeroben Vergärung und einer weiteren Optimierung der Wärmerückgewinnung erreicht werden.

In folgender Infobox werden wichtige Unterschiede für das urbane Beispielkonzept zusammengefasst. Es handelt sich hier größtenteils um Annahmen welche im Laufe des Projektes noch untersucht werden sollen.



### Unterschiede Urban

#### Massenbilanz

- Der Wasserbedarf ist wesentlich geringer da die Biomasse mit einem deutlich höheren TS im Fermenter verarbeitet wird. (25 % anstelle 10 %).

#### Energiebilanz

- Die mechanische Vorbereitung könnte einen deutlich höheren elektrischen Energiebedarf aufweisen, da Bioabfälle aus dem urbanen Raum und Grünschnitt typischerweise einen höheren Anteil an Störstoffen aufweisen und inhomogener in ihrer Konsistenz sind.
- Die geringeren Mengen an zu erwärmenden Wasserfrachten könnten zu einem wesentlich geringeren thermischen Energiebedarf führen.

#### Biomassennutzungseffizienz (BUEM und BUEE)

- Tendenziell höhere spezifische CH<sub>4</sub> Ausbeuten im Biogas und damit einhergehend höhere BUEE, aufgrund des höheren TS-Gehalts im Pflropfenstromfermenter.
- Signifikante Steigerung der BUEE möglich durch die Bereitstellung eines zweiten energetisch nutzbaren Produktes neben CH<sub>4</sub>: Die hydrothermale Karbonisierung der festen Bestandteile des Gärrestes aus Grün- und Biogut resultieren in einem hochkalorischen, kohleähnlichen Energieträger.

- Deutlich reduzierte Werte für die BUEM zu erwarten, da sich diese nur noch auf die Nutzung der Nährstoffe in der Flüssigfraktion des Gärrestes als Düngeprodukt begrenzt.

#### Energiekonversionseffizienz (ECE)

- Insgesamt höhere Energiekonversionseffizienz möglich, sowohl für das Primärprodukt CH<sub>4</sub> als auch für das gesamte Beispielkonzept Urban, aufgrund der tendenziell höheren spezifischen CH<sub>4</sub>-Ausbeute während der anaeroben Vergärung und der Bereitstellung eines weiteren hochkalorischen Energieträgers, der Hydrokokle.

## ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG

Die nach der beschriebenen Methodik ermittelten THG-Emissionen für das Beispielkonzept Agrar sind in Abbildung 7 dargestellt. Der Strombedarf und die Stromquelle für den Betrieb des Bioraffineriekonzeptes sind die wesentlichen Treiber der gesamten THG-Emissionen. Dies ist hauptsächlich auf die stromintensiven Prozesse hydrothermale Vorbehandlung, katalytische Methanisierung und Gasverflüssigung zurückzuführen. Dabei ist die Herkunft des Stroms ein wichtiger Parameter, da Strom aus dem Netz aufgrund des hohen Anteils fossiler Brennstoffe im angenommenen deutschen Strommix sehr emissionsintensiv ist. Ein höherer Anteil an erneuerbaren Energien würde diese Emissionsintensität senken. Die Bereitstellung von erneuerbarem H<sub>2</sub> (THG-Emissionen werden durch den Einsatz von Strom zur H<sub>2</sub>-Verdichtung verursacht) trägt bei katalytischer Methanisierung zu etwa 22% der THG-Emissionen bei. Etwa 12% der gesamten THG-Emissionen werden durch angenommene CH<sub>4</sub>-Leckagen aus der an-

aeroben Vergärung verursacht. Die THG-Emissionen im Zusammenhang mit der Herstellung und Bereitstellung von Hilfsstoffen wie Harnstoff für die anaerobe Vergärung oder Dampf für die hydrothermale Vorbehandlung machen nur einen kleinen Teil der Gesamtemissionen aus. Dies gilt ebenso für die Bereitstellung von Stroh. Die THG-Emissionen entstehen hier hauptsächlich durch

das Pressen und den Transport der Strohballen. Die Gutschrift für die Nutzung von Gülle als Biogassubstrat aufgrund des verbesserten Güllemanagements beträgt -2,5 g CO<sub>2</sub>-Äq. pro MJ CH<sub>4</sub>. Insgesamt verursacht das Anlagenkonzept 20,8 g CO<sub>2</sub>-Äq. pro MJ und damit bis zu 78% weniger als der fossile Referenzwert der Europäischen Kommission [European Commission, 2018].

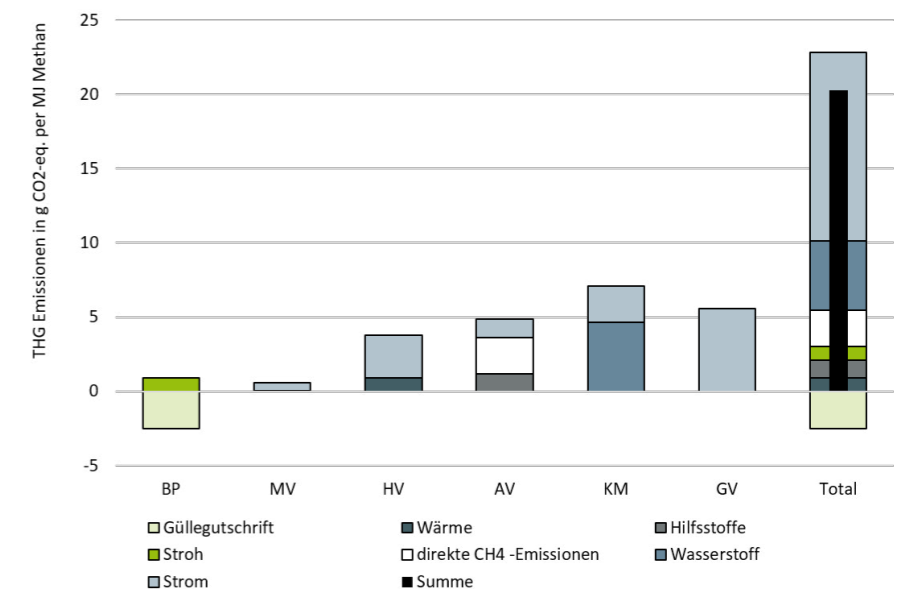


Abbildung 7: Spezifische THG-Emissionen in g CO<sub>2</sub>-Äq./MJ Methan (BP: Biomasseproduktion, MV: Mechanische Vorbereitung, HV: Hydrothermale Vorbehandlung, AV: Anaerobe Vergärung, KM: Katalytische Methanisierung, GV: Gasverflüssigung)

In folgender Infobox werden wichtige Unterschiede für das urbane Beispielkonzept zusammengefasst. Es handelt sich hier größtenteils um Annahmen welche im Laufe des Projektes noch untersucht werden sollen.

### Unterschiede Urban

#### Ressourcenströme/Substrate

- Etwas höhere THG- Gesamtemissionen, da für die Verwertung der urbanen Abfälle im Gegensatz zu Gülle keine Gutschriften für verbessertes Management vergeben werden.

#### Anlagengröße

- Die Anlagengröße ist nur bezüglich der Logistik relevant, da infrastrukturelle Aufwendungen nicht mitbilanziert werden.

#### Energiebedarf

- Höhere Emissionen in Verbindung mit zusätzlichem Bedarf an elektrischer Energie für die mechanische Vorbereitung der urbanen Ressourcenströme aufgrund des höheren Anteils an Störstoffen.

## ÖKONOMISCHE BEWERTUNG

Die Investitionen für das Beispielkonzept Agrar verteilen sich wie in Abbildung 8 dargestellt auf die sechs Prozessschritte. Der größte Kostenanteil entfällt mit 33% auf die katalytische Methanisierung, gefolgt von der anaeroben Vergärung (24%) und der Gasverflüssigung (19%). Die Kosten der Gesamtanlage belaufen sich auf ca. 31,6 Mio. EUR. Zusätzlich der Zinszahlungen (5%) und Wartung und Instandhaltung von 5% der Gesamtinvestition pro Jahr, ergeben sich jährliche kapitalgebundene Kosten von ca. 3 Mio. EUR.

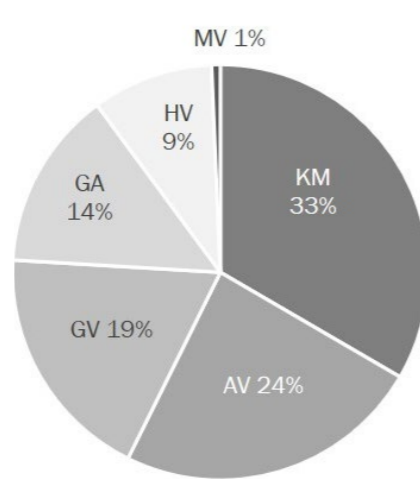


Abbildung 8: Zusammensetzung der Gesamtinvestition

Die verbrauchsgebundenen Kosten belaufen sich auf ca. 14,7 Mio. EUR pro Jahr. Die Verteilung auf die einzelnen Kostenpositionen ist in Abbildung 9 dargestellt. Die H<sub>2</sub>-Bereitstellung stellt mit 51% den größten Kostenblock dar, für den ein Wasserstoffpreis von ca. 3,8EUR/kg angenommen wurde. Die nächsten relevanten Kostenblöcke sind Strom, Stroh und Prozesswärme. Zusammen machen diese vier Kostenblöcke bereits knapp 93% der verbrauchsgebundenen Kosten aus.

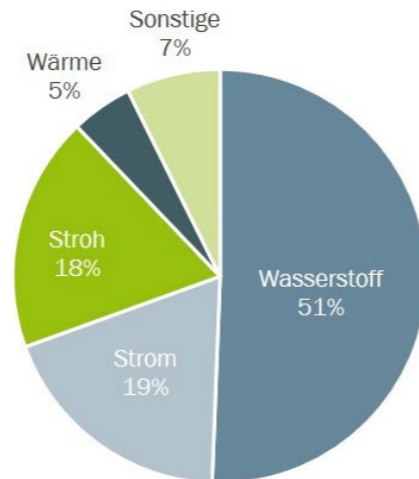


Abbildung 9: Zusammensetzung der verbrauchsgebundenen Kosten

Die Gesteungskosten für verflüssigtes CH<sub>4</sub> sind in Abbildung 10 dargestellt und betragen 2.179EUR/t. Entsprechend der Zuordnung der H<sub>2</sub>-Kosten und der hohen Investitionen ist die katalytische Methanisierung der teuerste Prozessschritt der Bioraffinerie (50%). Durch die Allokation der Substratkosten zur anaeroben Vergärung

entfallen 23% der Kosten auf diesen Prozessschritt. Die Kosten für Gasverflüssigung (10%), Gärrestaureibereitung (10%) und hydrothermale Vorbehandlung (9%) sind deutlich geringer. Bei dieser Kostenbetrachtung wurden die internen Prozesswärmeströme nicht den einzelnen Erzeugern und Verbrauchern mit den entsprechenden Kosten

zugeordnet, sondern nur die externe Energiebereitstellung als Kostenquelle berücksichtigt wurde.

Die Gesteungskosten setzen sich zu 36% aus H<sub>2</sub>-Kosten, zu 15% aus kapitalgebundenen Kosten und zu jeweils 13% aus Strom- und Strohkosten zusammen. Für die relevantesten Kostentreiber wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt (Abbildung 10). Die Bereitstellung von H<sub>2</sub> im großtechnischen Maßstab befindet sich in Deutschland derzeit noch im Aufbau. Daraus ergeben sich hohe Unsicherheiten für die H<sub>2</sub>-Bereitstellungskosten, die im Bereich von -50% bis +100% variiert wurden. Der Preis für erneuerbares CH<sub>4</sub> sinkt (19%) bzw. steigt (37%) in diesem

Fall deutlich. Die Variation der Investitionen führt zu einer Kostenreduktion von 8% bzw. einer Kostenerhöhung von 13%. Die Variation des Strompreises und der Betriebsstunden, die ein Parameter für die Prozessstabilität der Anlage sind, zeigen eine mittlere Sensitivität gegenüber den Produktkosten auf.

Zur Bewertung der Erlöse wird das erneuerbare verflüssigte CH<sub>4</sub> als Bio-LNG an Tankstellen vermarktet. Bio-LNG ist derzeit noch begrenzt verfügbar, wird aber in Zukunft mit fossilem LNG konkurrieren. Fossiles LNG wird derzeit für 1.700 – 1.800EUR/t an Tankstellen verkauft [LIQVIS GmbH, 2023; Rolande Germany GmbH, 2023]. Nach Abzug der Mehrwert- und Energiesteuer, ergibt

sich ein LNG-Preis von ca. 1.300EUR/t. Bio-LNG kann demgegenüber mit einem Preisaufschlag vermarktet werden kann [Rolande Germany GmbH, 2023]. Durch die Vermarktung von Bio-LNG im Transportsektor über die THG-Quote kann eine zweite Einnahmequelle erschlossen werden. (►► Fokusheft: Marktanalyse und Treibhausgasquote für erneuerbares Methan im Verkehr).



Die in Abbildung 7 ermittelten THG-Emissionen führen zu einer Emissionsminderung von 3,7tCO<sub>2</sub>-Äq. pro t erneuerbarem CH<sub>4</sub>. Zur Berechnung der anrechenbaren Emissionseinsparung von CH<sub>4</sub> auf die THG-Quote muss der fossile Referenzwert um die aktuell gültige THG-Quote (8% in 2023) korrigiert werden. Als reale Emissionseinsparung verbleiben 3,3tCO<sub>2</sub>-Äq. pro t erneuerbarem CH<sub>4</sub> in 2023. Mit steigender THG-Quote sinkt dieser Wert kontinuierlich. Die Berechnung ist in Tabelle 1 dargestellt.

Die derzeitigen durchschnittlichen THG-Quotenpreise liegen im ersten Halbjahr 2023 zwischen 308 und 378EUR/tCO<sub>2</sub>-Äq. Für fortschrittliche Biokraftstoffe ist es möglich über die Doppelanrechnung höhere Erlöse von ca. 794EUR/t CO<sub>2</sub>-Äq. zu erzielen. (q-bility GmbH) Daraus ergeben sich entsprechend der Emissionswerte aus Tabelle 1 in 2023 mögliche THG-Quotenerlöse von 987 bis 2631EUR pro t erneuerbarem CH<sub>4</sub>. Wie bereits dargestellt, sinkt die anrechenbare Emissionseinsparung von CH<sub>4</sub>.

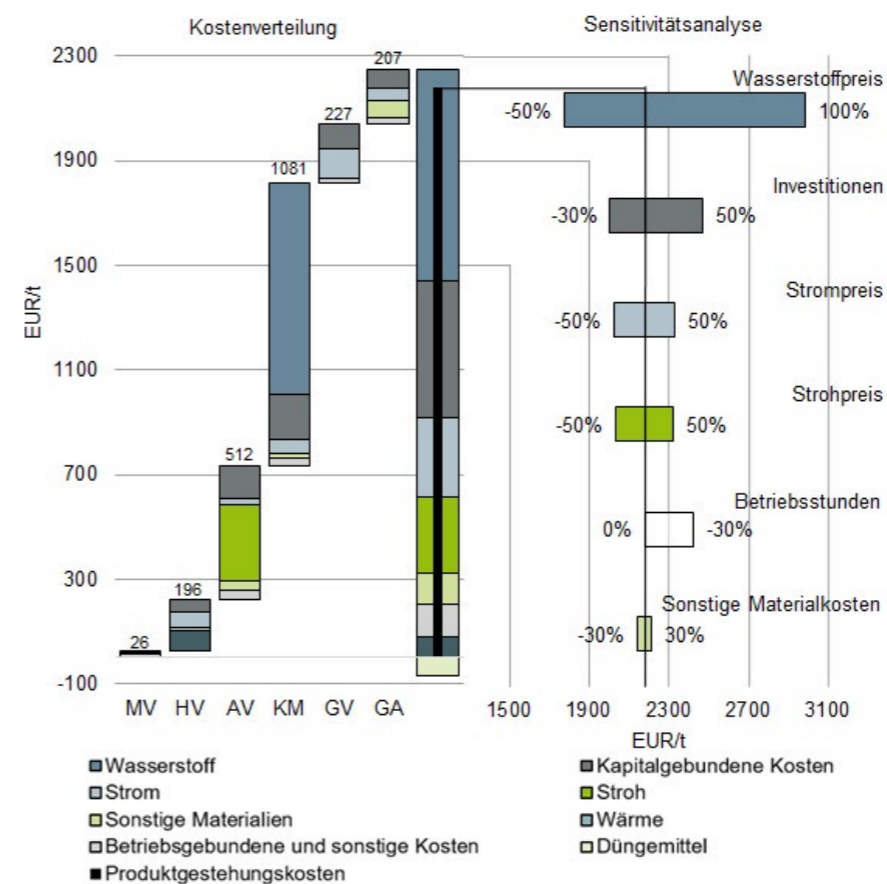


Abbildung 10: Kostenzusammensetzung und Sensitivitätsbetrachtung für das Beispielkonzept Agrar

Tabelle 1: Berechnung der resultierenden Emissionseinsparung zur Anrechnung auf den THG-Quotenhandel

	Einheit	Basiswerte	2023	2026	2028	2030
THG-Quote			8%	12%	17%	25%
Fossile Referenz	kg CO <sub>2</sub> -Äq/GJ	94,1	86,6	82,8	77,7	70,6
Emissionswert Methan	kg CO <sub>2</sub> -Äq/GJ	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8
Einsparung	kg CO <sub>2</sub> -Äq/GJ	73,3	65,8	62,0	56,9	49,8
Heizwert	GJ/t	50	50	50	50	50
Emissionseinsparung	kg CO <sub>2</sub> -Äq/t CH <sub>4</sub>	3.665	3.289	3.100	2.846	2.489

Daraus ergeben sich bis 2030 die in Abbildung 11 dargestellten Quotenerlöse, im diskutierten Bereich von ca. 300 bis 800 EUR/t CO<sub>2</sub>-Äq.. Je nach Marktentwicklung und Vermarktungserfolg

von Bio-LNG sind für ein wirtschaftliches Konzept neben den Erlösen aus dem Kraftstoffverkauf zusätzliche Erlöse aus dem THG-Quotenhandel erforderlich. Den Produktgestehungskosten

von 2.179 EUR/t stehen Marktpreise von ca. 1.300 EUR/t gegenüber. Die Differenz von 900 EUR/t kann jedoch durch die Wertschöpfung aus den Quotenerlösen ausgeglichen werden.

## Unterschiede Urban



### Ressourcen

- Sinkende Kosten für die Ressourcenbeschaffung, da die Sammlung von Grüngut und Bioabfällen aus dem urbanen Raum nur mit geringen Kosten oder sogar mit Verwertungserlösen verbunden ist.
- Erhöhter Investitionsbedarf durch erhöhten Vorbehandlungsaufwand bzw. notwendiger Störstoffbeseitigung möglich.

### Anlagengröße

- Steigende spezifische Investitionskosten, da die Anlage wird aufgrund der Ressourcenverfügbarkeit kleiner und somit weniger von Skalierungseffekten im Anlagenbau profitiert.

### Energiebedarf

- Steigende Energiekosten aufgrund des steigenden Bedarfs an elektrischer Energie für die aufwändigere mechanische Vorbereitung.
- Sinkende Energiekosten aufgrund des geringeren Wärmebedarfs bei höheren TS-Gehalte im Prozess.

Die links befindliche Infobox fasst wichtige Unterschiede für das Beispielkonzept Urban zusammen. Dabei handelt es sich hier größtenteils um Annahmen, die im Rahmen des Projektes noch zu untersuchen sind.

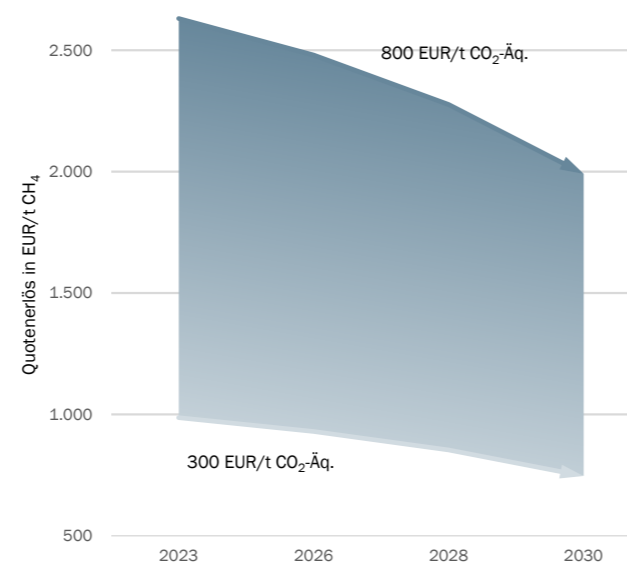


Abbildung 11: Kostenzusammensetzung und Sensitivitätsbetrachtung für das Beispielkonzept Agrar

## FAZIT UND AUSBLICK

Mit der am DBFZ errichteten Pilotanlage zur Verwertung von Reststoffen zu Biomethan können vielfältige Anlagenkonzepte entwickelt und bewertet werden. Als Grundlage für die weiteren Arbeiten werden zunächst zwei Beispielkonzepte konkretisiert: eines für landwirtschaftliche Reststoffe (Agrar) und eines für kommunale Abfälle (Urban). Die Konzeptentwicklung in der zweiten Projektphase baut auf den Ergebnissen der Beispielkonzepte Agrar und Urban auf, wobei letzteres noch weiter zu detaillieren ist.

In der nächsten Phase der **Pilotierung des Anlagenkonzeptes** sollen sowohl die Ausrichtung des Versuchsbetriebes als auch der Fokus der Konzeptentwicklung stärker auf konkrete Optimierungsansätze und deren Bewertung gelegt werden. Daher sind die folgenden Schritte jeweils für Agrar und Urban vorgesehen:

- Definition eines Base-Case,
- Bewertung prozessspezifischer und integrierter Optimierungsansätze,
- Ableitung des Best-Case in Form einer optimierten Prozess- bzw. Bereitstellungskette.

Die drei zentralen Bewertungsaspekte bleiben dabei Technik, Ökologie (v.a. Vermeidung von THG-Emissionen) und Ökonomie (v.a. Kosten-Erlös-Struktur). In den Best-Case Konzepten werden dabei vor allem die Top-Runner aus der Bewertung der Optimierungsansätze berücksichtigt. Bisher noch auf Literaturdaten basierende Aspekte sowie verbleibende Annahmen, Unsicherheiten und Wissenslücken sollen so weit möglich in der Pilotierungsphase durch experimentelle Arbeiten validiert werden. Bereits erzielte Ergebnisse aus dem Labormaßstab sollen möglichst auf den Pilotmaßstab übertragen werden.

Für das **Konzept Agrar** sind u. a. folgende Fragestellungen zentral:

- Technisch | Validierung der simulierten Wasserrückführung, Wärmerückgewinnung und Wärmeverluste an der Pilotanlage
- Ökonomie | Effiziente Einbindung von H<sub>2</sub> in den Prozess, hohe CH<sub>4</sub>-Ausbeuten bei kurzen Verweilzeiten im Fermenter, experimentelle optimierte Produktion hochwertiger Düngeprodukte,

- Ökologie | Quantifizierung des Energiebedarfs einzelner Prozessschritte sowie diffuser Methanemissionen an der Pilotanlage.

Für das **Konzept Urban** sind zudem folgende Fragestellungen von Bedeutung:

- Technisch | Ermittlung CH<sub>4</sub>-Ausbeute und Prozessstabilität im Pflanzstromfermenter sowie Effekt der hydrothermalen Karbonisierung und Vorbehandlung,
- Ökonomie | Quantifizierung Mehrerlöse durch Nutzung biogener Abfälle und Aufwand für Störstoffbeseitigung,
- Ökologie | Quantifizierung reduzierter Energiebedarf.

Die Prozess- und Konzeptbewertung erfolgt dabei weiterhin primär in einem potenziellen kommerziellen Maßstab. Relevante Aspekte der Ressourcenverfügbarkeit sowie Markt- und Infrastrukturaspekte werden dabei weiterhin berücksichtigt und ggf. aktualisiert.

## DAS VORHABEN PILOT-SBG

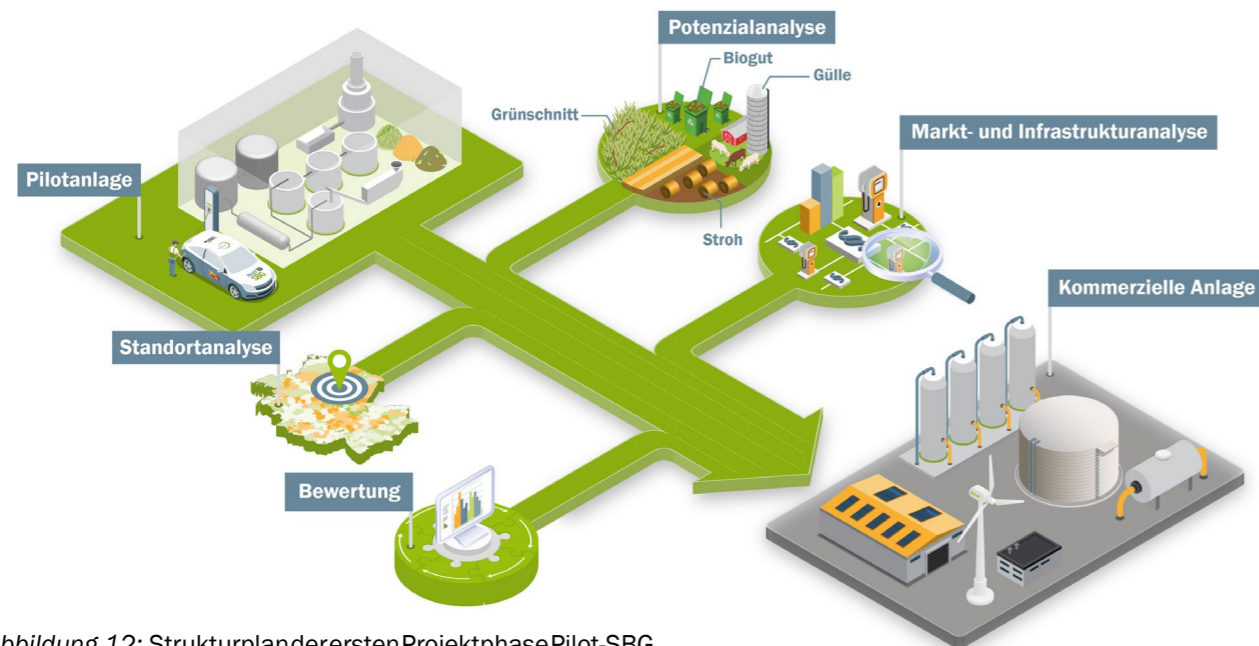


Abbildung 12: Strukturplan der ersten Projektphase Pilot-SBG

Das Vorhaben fokussiert als innovationsunterstützende Dienstleistung auf die Weiterentwicklung von fortschrittlichem erneuerbarem Methan als Kraftstoff in Deutschland. Es baut auf der in der ersten Projektphase geplanten und errichteten Pilotanlage im Technikumsmaßstab und entsprechenden Vorversuchen auf. Der

Während nach der Inbetriebnahme der Anlage im Jahr 2023 der technologische Schwerpunkt im Projekt auf der erfolgreichen Pilotierung und Prozessoptimierung liegt, werden darüber hinaus Rückschlüsse für modulspezifische und konzeptionelle Optimierungsansätze und den Erfolg im kommerziellen Maßstab abgeleitet. Die Optimierungs-

kampagnen mit agrarischen (Stroh und Rindergülle) und urbanen (Bioabfall: Biogut und Grüngut) Ressourcen werden auch modul- und schnittstellenspezifische Versuchsreihen durchgeführt. Basierend auf der Modellierung und Skalierung der Versuchsergebnisse sowie einer Erweiterung der Bilanzgrenzen auf die gesamte Bereitstellungskette werden neben der ökologischen Bewertung auch Kosten- und Erlösstrukturen betrachtet.

### Das Vorhaben Pilot-SBG adressiert die Bereitstellung von erneuerbarem Methan als Energieträger für schwer elektrifizierbare Verkehrssektoren.

innovative Verfahrensansatz der Pilotanlage zielt auf die Erhöhung der Methanausbeute aus dem Biogasprozess, u. a. durch die Verwertung des biogenen CO<sub>2</sub> mit grünem Wasserstoff. Zentrale Aspekte einer begleitenden Machbarkeitsanalyse sind vor allem die Ressourcenverfügbarkeit und -verteilung sowie weitere Standort-, Infrastruktur- und Marktfragen (Abbildung 12).

kriterien der Prozessführung und der Prozesskette sind dabei Ressourceneffizienz und die Schließung von Stoffkreisläufen sowie Treibhausgasvermeidungskosten. In den zwei Teilpaketen werden daher praktische Forschungsversuche einerseits und deren Bewertung auf konzeptioneller Ebene andererseits realisiert. Neben dem reproduzierbaren Routinebetrieb der Gesamtanlage in Versuchs-

Im Anschluss an das Projekt Pilot-SBG soll die Pilotanlage als zentraler Bestandteil einer Technologieplattform für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft dienen. Von besonderem Vorteil ist dabei die hohe Flexibilität der Anlage hinsichtlich einer bspw. veränderten Anordnung oder Erweiterung der modularen Prozesskette.

## ÜBERBLICK FOKUSHEFTE 2023

Biogene Reststoffe und Abfälle gewinnen im Kontext der Energie- und Verkehrswende und einer biobasierten Wirtschaft zunehmend an Bedeutung. Die Bereitstellung von erneuerbarem Methan als Kraftstoff im Verkehr kann dabei einen wesentlichen Beitrag leisten. Im Vorhaben Pilot-SBG wird in einem integrierten Konzept aus biogenen Rest- und Abfallstoffen über die anaerobe Fermentation Biogas produziert und dieses anschließend mit grünem Wasserstoff zu Methan umgesetzt. Um das Konzept optimal zu unterstützen, werden neben den technologischen Fragestellungen innerhalb des Vorhabens auch Themen der Markt- und Standortanalyse adressiert. Ein erster Meilenstein ist die übersichtliche Zusammenfassung des Status quo in einer Veröffentlichungsreihe zu ausgewählten Schwerpunkten.

In jedem Fokusheft wird ein Überblick über die verfügbaren Optionen des jeweiligen Prozessschritts gegeben und diese werden in einem kurzen technischen, ökonomischen und ökologischen Vergleich einander gegenübergestellt. Analog hierzu verfahren auch die beiden Fokushefte zur **Wasserstoffbereitstellung** sowie zur **Methanverflüssigung**. Diese Prozessschritte sind zwar nicht Bestandteil der Pilotanlage, aber für eine Skalierung in den kommerziellen Maßstab unabdingbar (Abbildung 13).

Die Ergebnisse der Machbarkeitsanalyse aus der ersten Projektphase sind neben dem vorliegenden Fokusheft zur **Marktanalyse und Treibhausgasquote** zusammenfassend in denen zur **Standortanalyse und Ressourcen-**

**verteilung** sowie **Infrastrukturanalyse** dargestellt, wobei sie thematisch vielfach ineinandergreifen.

Die Umsetzung von integrierten Bereitstellungskonzepten für erneuerbares, also bio- und strombasiertes Methan ist von zahlreichen Faktoren abhängig und kann in seiner standortspezifischen Ausgestaltung sehr unterschiedlich ausfallen. Ein erstes **Beispielkonzept** für die Umsetzung im kommerziellen Maßstab wird in einem weiteren Fokusheft dargestellt.

►► Weitere Informationen: Report 44 „Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr“

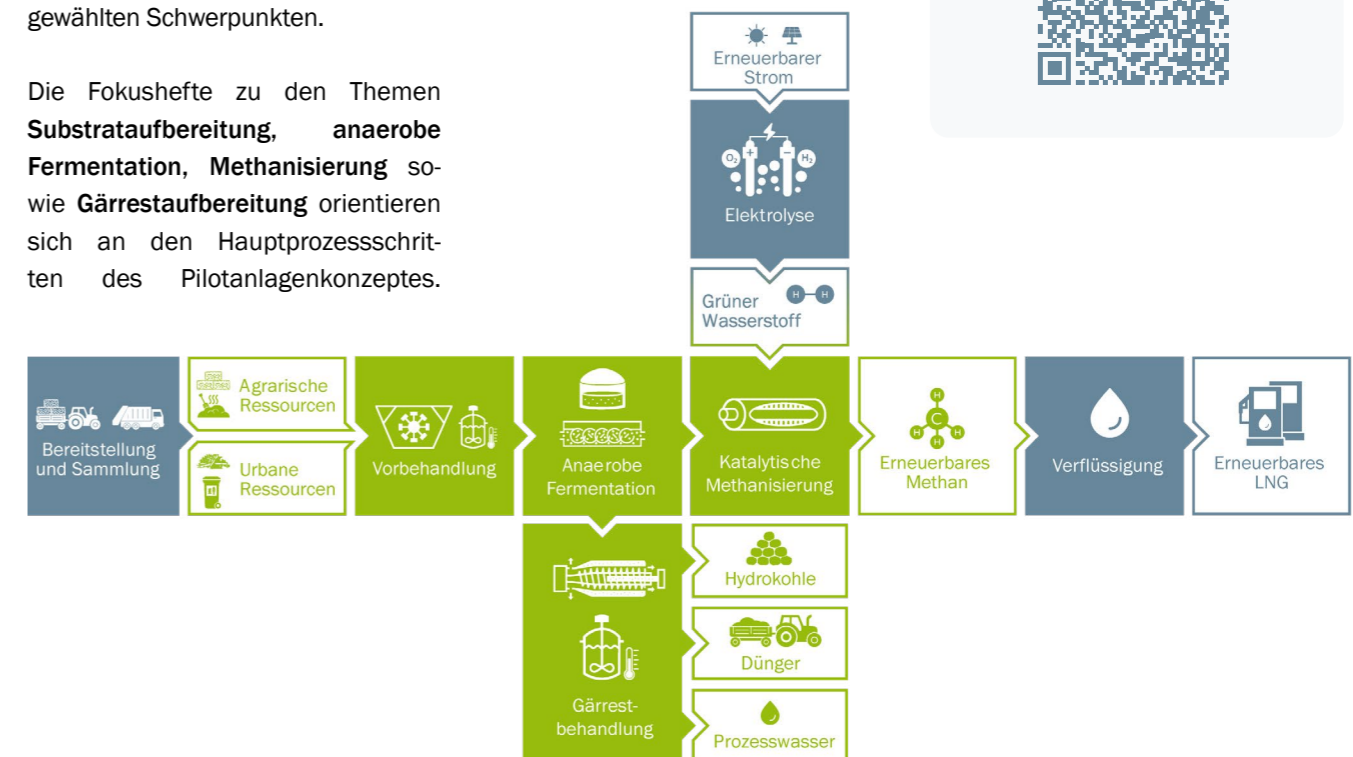


Abbildung 13: Prozessschritte in der Pilotanlage (grün) und Betrachtungsrahmen für den kommerziellen Maßstab (grün + petrol)



Abbildung 14: Pilotanlage zur Herstellung von erneuerbarem Methan auf dem Gelände des Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH in Leipzig

©DBFZ 2023

## ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS

Abkürzung	Beschreibung
AV	anaerobe Vergärung
BUEM	Produktnutzen stofflich
BUEE	Produktnutzen energetisch
C	Kohlenstoff
CH <sub>4</sub>	Methan
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
ECE	Energiekonversionseffizienz
FM	Frischmasse
GA	Gärrestaufbereitung
GV	Gasverflüssigung
HK	hydrothermale Karbonisierung
HV	hydrothermale Vorbehandlung
KM	katalytische Methanisierung
LHV	Unterer Heizwert
ME	mechanische Entwässerung
MV	mechanische Vorbereitung und Mischung
mIB	Masse der Input-Biomasse
mP,i	Masse von Produkten i
mP,i · LHVP,i	Energieoutput von Produkten i
mR,i · LHVR,i	Energieinput von Rohstoffen i
N	Stickstoff
QE	elektrische Energie
QW	Wärmebedarf
TS	Trockensubstanz
UF	Ultrafiltration
UO	Umkehrosmose
ηE	elektrischer Wirkungsgrad
ηW	thermischer Wirkungsgrad

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Techno-Ökonomische und Ökologische Bewertung einer Bioraffinerie zur Erzeugung von erneuerbarem Methan und Düngemitteln aus biobasierten Rest- und Abfallstoffen .....	4
Abbildung 2: Pilotanlage für erneuerbares Methan aus biogenen Reststoffen und grünem Wasserstoff am Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH in Leipzig .....	8
Abbildung 3: Blockfließbild für die Beispielkonzepte zur Herstellung von erneuerbarem CH <sub>4</sub> aus biogenen Rest- und Abfallstoffen und erneuerbarem Wasserstoff.....	9
Abbildung 4: Fließbild der Gärrestaufbereitung.....	12
Abbildung 5: Massenbilanz des Beispielkonzeptes Agrar (MV: Mechanische Vorbereitung, HV: Hydrothermale Vorbehandlung, AV: Anaerober Vergärung, KM: Katalytische Methanisierung, GA: Gärrestaufbereitung).....	16
Abbildung 6: Wärmebilanz und elektrischer Energiebedarf des Beispielkonzeptes Agrar (MV: Mechanische Vorbereitung, HV: Hydrothermale Vorbehandlung, AV: Anaerober Vergärung, KM: Katalytische Methanisierung, GA: Gärrestaufbereitung, GV: Gasverflüssigung).....	17
Abbildung 7: Spezifische THG-Emissionen in g CO <sub>2</sub> -Äq./MJ Methan (BP: Biomasseproduktion, MV: Mechanische Vorbereitung, HV: Hydrothermale Vorbehandlung, AV: Anaerober Vergärung, KM: Katalytische Methanisierung, GV: Gasverflüssigung).....	19
Abbildung 8: Zusammensetzung der Gesamtinvestition .....	20
Abbildung 9: Zusammensetzung der verbrauchsgebundenen Kosten .....	20
Abbildung 10: Kostenzusammensetzung und Sensitivitätsbetrachtung für das Beispielkonzept Agrar .....	21
Abbildung 11: Kostenzusammensetzung und Sensitivitätsbetrachtung für das Beispielkonzept Agrar .....	22
Abbildung 12: Strukturplan der ersten Projektphase Pilot-SBG .....	24
Abbildung 13: Prozessschritte in der Pilotanlage (grün) und Betrachtungsrahmen für den kommerziellen Maßstab (grün + petrol).....	25
Abbildung 14: Pilotanlage zur Herstellung von erneuerbarem Methan auf dem Gelände des Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH in Leipzig .....	26

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Berechnung der resultierenden Emissionseinsparung zur Anrechnung auf den THG-Quotenhandel .....	22
--	----

## LITERATURVERZEICHNIS

Andersen, L., Lamp, A., Dieckmann, C., Baetge, S., Schmidt, L.-M., Kaltschmitt, M., 2018. Biogas plants as key units of biorefinery concepts: Options and their assessment. *Journal of biotechnology* 283, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2018.07.041>.

Dämmgen, U., Webb, J., 2006. The development of the EMEP/CORINAIR Guidebook with respect to the emissions of different nitrogen and carbon species from animal production, 241–248.

DBFZ, 2020. Ressourcendatenbank: Biogene Reststoffe. <https://webapp.dbfz.de/resource-database/?lang=de> (accessed 30 August 2022).

Etzold, H., Röder, L., Oehmichen, K., Nitzsche, R., 2023. Technical Design, Economic and Environmental Assessment of a Biorefinery Concept for the Integration of Biomethane and Hydrogen into the Transport Sector. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4354851>.

European Commission, 2018. DIRECTIVE (EU) 2018/ 2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL - of 11 December 2018 - on the promotion of the use of energy from renewable sources, 128 pp.

Grote, K.-H., Feldhusen, J., 2014. *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*, 24th ed. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.

Haenel, H.-D., Rösemann, C., Dämmgen, U., Poddey, E., Freibauer, A., Wulf, S., Eurich-Menden, B., Döhler, H., 2014. Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2012. *Thünen Report 17*. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.

Iffland, K., Sherwood, J., Carus M., Raschka, A., Farmer, T., Clark, J., 2015. Definition, Calculation and Comparison of the “Biomass Utilization Efficiency (BUE)” of Various Bio-based Chemicals. *Polymers and Fuels* 2015-11.

ISO 14040, 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:2006), Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006, 10/2006.

ISO 14044, 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (ISO 14044:2006), German and English Version EN ISO 14044:2006, 10/2006.

Klavina, A., Selegovskis, R. Influence of wood chip quality on boiler house efficiency. <https://doi.org/10.22616/ER-Dev.2021.20.TF082>.

2016. *Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung*, 7th ed. Druckerei Weidner, Rostock, 244 pp.

Lenz, V., Haufe, H., Oehmichen, K., Szarka, N., Thrän, D., Jordan, M., 2020. FOCUS ON - Systemlösungen im Wärmesektor: 52 Modellkonzepte für eine klimaneutrale Wärme. *Energetische Biomassenutzung*, Leipzig. [https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/6\\_Publikationen/FH\\_BioplanW\\_web.pdf](https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/6_Publikationen/FH_BioplanW_web.pdf) (accessed 31 January 2023).

Lindorfer, J., Lettner, M., Fazeni, K., Rosenfeld, D., Annevelink, B., Mandl, M., 2019. Technical, Economic and Environmental Assessment of Biorefinery Concepts: Developing a practical approach for characterisation Task 42:2019:01. 2023. LNG & CNG+ preise. <https://rolandlng.de/lng-cng-preise/> (accessed 19 December 2023).

Oehmichen, K., Thrän, D., 2017. Fostering renewable energy provision from manure in Germany: Where to implement GHG emission reduction incentives. *Energy Policy*, 471–477. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.08.014>.

Schröder, J., Naumann, K. (Eds.), 2022. *Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr*. DBFZ, Leipzig.

Smolinka, T., Garche, J., 2022. *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications: Hydrogen Production by Water Electrolysis*. Elsevier, Amsterdam, Oxford, Cambridge, MA, xvii, 492 Seiten.

Spoof-Tuomi, K., 2020. *Techno-economic analysis of biomethane liquefaction processes: Biogas Utilization Opportunities in Ostrobothnia Region*. University of Vaasa, School of Technology and Innovations.

2023. Tankanleitung für flüssiges Erdgas. <https://www.liqvis.com/tanken.html> (accessed 19 December 2023).

Vetter, A., Arnold, K., 2010. *Klima- und Umwelteffekte von Biomethan, Anlagentechnik und Substratauswahl*. Wuppertal Paper 182, Wuppertal.

Weinrich, S., 2017. *Praxisnahe Modellierung von Biogasanlagen*. Dissertation (Schriftenreihe Umweltingenieurwesen, Band 76). [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00002016](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002016) (accessed 31 January 2023).

Zerback, T., Schumacher, B., Weinrich, S., Hülsemann, B., Nelles, M., 2022. Hydrothermal Pretreatment of Wheat Straw—Evaluating the Effect of Substrate Disintegration on the Digestibility in Anaerobic Digestion. *Processes* 10, 1048. <https://doi.org/10.3390/pr10061048>.



