

# Arbeitsdokument

## Umweltbezogene Aspekte eines Ausbaus der Biogaserzeugung und –nutzung im Kontext der Klima- und Energiepolitik Luxemburgs

unter spezieller Berücksichtigung der Reduktionsziele der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe, sowie Aspekte der Flächenproduktivität erneuerbarer Energien

Horst Fehrenbach, Regine Vogt, Joachim Reinhardt,  
Prof. Dr. Frank Scholwin Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie, Weimar

Heidelberg, Januar 2021



Erstellt durch das ifeu- Institut für Energie-und Umweltforschung GmbH, Heidelberg, im Auftrag des Ministeriums für Energie und Raumentwicklung, des Ministeriums für Umwelt, Klima und nachhaltige Entwicklung und der Mitwirkung des Ministeriums für Landwirtschaft, Weinbau und ländliche Endwicklung des Großherzogtums Luxemburg

In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Frank Scholwin, Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie, Weimar

#### IMPRESSUM

Autoren: Horst Fehrenbach  
Regine Vogt  
Joachim Reinhardt  
Prof. Dr. Frank Scholwin

Herausgeber: ifeu – Institut für Energie- und  
Umweltforschung Heidelberg GmbH  
Wilckensstraße D-69120 Heidelberg

Erscheinungsjahr: 2021

Bildquellen: Titelblatt: Horst Fehrenbach

56 Seiten

# Inhalt

---

<b>2.1</b>	<b>Potenzialanalysen für Biogas in Luxemburg</b>	<b>7</b>
2.1.1	Ist-Situation	7
2.1.2	Potenziale der Biogasproduktion	8
2.1.3	Vergleich mit anderen Studien	12
<b>2.2</b>	<b>Szenarien zum Ausbau der Biogasnutzung</b>	<b>13</b>
2.2.1	Vorgehensweise	13
2.2.2	Schlussfolgerungen und Empfehlung	16
<b>2.3</b>	<b>Ökologische Aspekte der Nutzung von Biogas</b>	<b>19</b>
2.3.1	Bilanz der Treibhausgasemissionen	19
2.3.2	Aspekt der Ammoniakemissionen	25
2.3.3	Sonstige Emissionen	30
2.3.4	Gewässerschutz	31
2.3.5	Umverteilung von Nährstoffen	33
2.3.6	Potenzial anderer stoffliche Belastungen	34
2.3.7	Zusammenfassung der Umweltwirkungen der Nutzung von Biogas	35
<b>2.4</b>	<b>Empfehlungen für die Rahmensetzung</b>	<b>37</b>
2.4.1	Substratwahl	37
2.4.2	Generelle technische Anforderungen	41
2.4.3	Maßnahmenübersicht und Auswirkungen	41
<b>3.1</b>	<b>Datengrundlagen</b>	<b>45</b>
3.1.1	Flächenbelegung durch Biomethan und Strom aus Mais	45
3.1.2	Flächenbelegung durch Freiland-PV-Anlagen	46
3.1.3	Flächenbelegung durch Rapsmethylester (Biodiesel)	47
3.1.4	Antriebseffizienz Elektro-, Gas- und Diesel-Pkw	47
<b>3.2</b>	<b>Vergleichende Gegenüberstellung</b>	<b>48</b>
3.2.1	Flächenverbrauch für gefahrene 100 km	48
3.2.2	PV-Flächenbedarf für E-Mobilität im Vergleich zu Kraftstoff von 20% Ackerfläche mit Energiepflanzen	49

# Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Zusammenfassung der Potenzialabschätzungen aus bestehender Literatur für die Biogasproduktion in Luxemburg.	11
Abbildung 2: Biogaspotenzial aus vergärbaren biogenen Abfällen und Reststoffen in Deutschland, skaliert über die Einwohnerzahl auf Luxemburg; berechnet auf Basis von Daten aus der BioRest-Studie (Fehrenbach et al. 2019)	12
Abbildung 3: Gesamtschau der Biogasmengen aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen sowie Biogasanlagen für Bioabfall, Grünschnitt und Landschaftspflegematerial	16
Abbildung 4: Gesamtschau der Flächenbedarfe für Energiepflanzen der verschiedenen Szenarien	17
Abbildung 5: Gesamtschau der Biogasmengen aus den Szenarien im Vergleich mit dem Bestand und dem Ziel des NREAP	19
Abbildung 6: THG-Bilanzen für verschiedene Biogaspfade, differenziert nach den Teilschritten	20
Abbildung 7: THG-Bilanz für die aktuelle Situation der Biogasproduktion und –nutzung in Luxemburg	21
Abbildung 8: THG-Bilanz für die drei Szenarien der Biogasproduktion und –nutzung in Luxemburg	22
Abbildung 9: THG-Bilanz für die drei Szenarien der Biogasproduktion in Luxemburg – Bilanzraum nur für Landwirtschaftssektor nach Berechnungsmethode zur Klimarahmenkonvention	23
Abbildung 10: Gestehungskosten für Strom aus verschiedenen Energieträgern	24
Abbildung 11: THG-Vermeidungskosten verschiedener Bioenergiepfade im Vergleich zu anderen EE	24
Abbildung 12: Ammoniakkonzentration in der EU	25
Abbildung 13: Agrarflächen in Luxemburg mit Anteil in Gewässerschutzzonen (insgesamt sowie in der Stauseeregion)	32
Abbildung 14: Stark vereinfachtes Schema zur Verteilung von Nährstoffen in einem System mit Biogasproduktion und Gärrestnutzung; Pfeildicke deutet die Mengenverhältnisse an	34
Abbildung 15: Gegenüberstellung verschiedener Fahrzeugantriebe bezüglich ihres Flächenverbrauchs für gefahrene 100 km	49

# Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1: Definition der drei Szenarien mit jeweiligem Mobilisierungsgrad des theoretischen Potenzial für die Bereiche Gülle und Mist, Bioabfall sowie Grünschnitt und Landschaftspflegematerial	14
Tabelle 2: Die mit dem Einsatz von Energiepflanzen verbundenen Biogasmengen in den landwirtschaftlichen Biogasanlagen und die dafür benötigten Flächen.	15
Tabelle 3: Gesamtschau der Biogasmengen aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen sowie Biogasanlagen für Bioabfall, Grünschnitt und Landschaftspflegematerial.	15
Tabelle 4: NH <sub>3</sub> -Emissionsfaktoren für verschiedene Varianten der Biogasproduktion; Emission aus Anbau sowie aus offenen Gärrestlagern	29
Tabelle 5: Anforderungen an die technische Ausgestaltung zur möglichst optimalen Gestaltung von Umweltverhalten und Effizienz einer künftigen Biogasnutzung in Luxemburg	41
Tabelle 6: Daten zur Ermittlung der Flächenbelegung für die Erzeugung von Strom aus Biogas auf Basis Silomais	46
Tabelle 7: Flächenbelegung und Anteile an Flächenarten für PV-FFA bezogen auf 1 kWh Strom	46
Tabelle 8: Daten zur Ermittlung der Flächenbelegung für die Erzeugung von Rapsmethylester (RME)	47
Tabelle 9: Gegenüberstellung verschiedener Fahrzeugantriebe bezüglich ihrer Flächenbelegung für gefahrene 100 km	48

# 1 Aufgabenstellung

---

Unter der Vielzahl an Bioenergieträgern nimmt Biogas eine gewisse Sonderrolle ein. In manchen Ländern wie z.B. Deutschland besteht ein sehr umfangreicher Ausbau (mit über 8.000 Anlagen und 8,5 % Anteil an der nationalen Stromerzeugung, der über das Erneuerbare-Energien Gesetz (EEG) angereizt wurde). Als „Preis“ für diesen hohen Anteil auch innerhalb der erneuerbaren Energieträger insgesamt werden eine erhebliche Beeinflussung der Landschaft, der Natur und der Biodiversität sowie andere negative Umweltwirkungen ins Feld geführt. Der Begriff der „Vermaisung“ der Landschaft ist in diesem Zusammenhang völlig neu kreiert worden. Diese und andere Nachteile wurden in Deutschland über das EEG versucht zu relativieren, wie z.B. durch den „Maisdeckel“, wonach eine Förderung nur für einen begrenzten Einsatz von Mais und Getreidekorn gewährt wird.<sup>1</sup>

Auf der anderen Seite werden Biogas viele positive Aspekte zugewiesen:

- das Verfahren ist effizient,
- der Brennstoff vergleichsweise sauber und hochwertig und kann sogar zu Erdgasqualität aufgearbeitet werden und steht dann vielfältiger Nutzenanwendung zur Verfügung,
- statt nachwachsenden Rohstoffen können auch viele Arten von Abfällen und Reststoffen vergoren werden, wodurch die Problematik der Belegung von Agrarflächen entfällt, dafür jedoch weitere Vorteile ins Spiel kommen, insbesondere im Falle von Gülle: durch Vergärung vor dem Einsatz als Wirtschaftsdünger können erhebliche Emissionsfrachten an Methan, die bei der Lagerung anfallen würden, vermieden werden. Zudem erhält Gülle eine bessere Fließfähigkeit und kann besser ausgebracht werden.
- Regionale Nährstoff- und Energiekreisläufe können etabliert werden und ersetzen sowohl Nährstoff- als auch Energieimporte

Allerdings sind mit der grundsätzlich sehr positiv zu bewertenden Erzeugung von Biogas aus Wirtschaftsdünger auch weitere Aspekte verbunden, die eine Gesamtbewertung komplex machen. So ist eine Monovergärung von Gülle technisch grundsätzlich möglich aber energetisch ist es effizienter Co-Substrate zusätzlich einzusetzen, soweit möglich z.B. Festmiste oder landwirtschaftliche Reststoffe. Damit kann der Energieaufwand des Verfahrens gering und die Ausbeute möglichst hochgehalten werden, wobei der regionalen Komponente der Co-Substrate besondere Bedeutung zukommen sollte. Co-Substrate können ebenfalls Reststoffe sein, doch stellt sich hier die Frage der Verfügbarkeit.

Gemäß dem Regierungsprogramm des Großherzogtums Luxemburg soll die Rolle von Biogas im Hinblick auf die Ziel-Erreichung im Bereich der erneuerbaren Energien mit Horizont 2030

---

<sup>1</sup> Nach dem deutschen EEG 2017 wird der „Maisdeckel“ von 50% in 2017 auf 47% in 2019 und 2020 und auf 44% in 2021 und 2022 abgesenkt; Der Begriff „Mais“ schließt Ganzpflanzen, Maiskorn-Spindel-Gemisch, Körnermais und Lieschkolbenschrot ein.

einer technisch-wirtschaftlichen Analyse unterzogen werden. Dabei wird v.a. eine Reorganisation der Subventionen anvisiert, um insbesondere die nicht-energetischen Vorteile dieser Technologie adäquat fördern zu können. Biogas aus Gülle steht dabei im Vordergrund. Die Seite der Landwirtschaft verspricht sich davon eine Verbesserung ihrer ökologischen Bilanz insgesamt im Sinne der oben bereits aufgeführten Umweltvorteile. Von Seiten der Luxemburgischen Regierung soll der Bereich Biogas daher einer tiefgreifenden technisch-wirtschaftlichen Analyse unterzogen werden, um seine Rolle im Hinblick auf die Ziel-Erreichung im Bereich der erneuerbaren Energien, der Biodiversität sowie im Bereich der  $\text{NH}_3$ -Emissionen und der Reduktion von Treibhausgasen besser bewerten zu können.

Aktuell werden in Luxemburg nur etwa 26 Biogasanlagen betrieben, wobei es sich durchgehend um kleinere Anlagen im Landwirtschaftsbereich handelt. Eine Professionalisierung in Richtung Ausbau hin zu zahlreichen Substraten und größeren Anlagengrößen zeichnet sich derzeit nicht ab. Gleichwohl wird das Thema Biogas als wesentliche Komponente zum Klimaschutz in der Landwirtschaft in Luxemburg angesehen.

Dieses Positionspapier stellt eine Reihe von Fakten und Hintergründe der Nutzung und des möglichen Ausbaus von Biogas in Luxemburg zusammen.

Ergänzend zum Thema Biogas wird in diesem Papier auch die Frage der Flächeneffizienz von erneuerbaren Energien betrachtet. So ist in Luxemburg auch der Ausbau von Freiflächen-Photovoltaik (PV-FFA) in Diskussion. Es wird ein Solarkataster angelegt, das dazu dienen soll, den Aufbau großer Photovoltaikanlagen, insbesondere auf allen Gebäuden und ggf. Fassaden, Bodenflächen, ehemaligen Industriestandorten bzw. Deponien für inerte Substanzen sowie entlang von Autobahnen und Eisenbahnstrecken zu prüfen und zu vereinfachen.

Eine Planung der Ausschreibungen für besonders große Photovoltaikanlagen wird über mehrere Jahre erstellt. Die Ausschreibungen sollen sich dabei insbesondere auf Anlagen an den Gebäuden, auf den Industriegeländen und wasserdichten Oberflächen beziehen. Die Technologie der PV-FFA ist gleichsam landschaftswirksam und nimmt entsprechend Flächen in Beschlag. In Kapitel 3 wird der spezifische Flächenbedarf von PV-FFA insbesondere im Vergleich mit (beispielsweise Biogas aus Mais sowie) anderen Energieträgern abgeleitet und erörtert.

# 2 Ökologisch-technische Aspekte der Nutzung und eines Ausbaus von Biogas in Luxemburg

---

## 2.1 Potenzialanalysen für Biogas in Luxemburg

Es liegen verschiedene spezifische Arbeiten zur Situation, den Potenzialen und dem Ausblick von erneuerbaren Energien inklusive der Nutzung von Biogas für Luxemburg vor. Für dieses Papier wurden folgende Arbeiten ausgewertet:

- Biogas Vereenegung (2019): Biogas in Luxemburg - Stand und Perspektiven
- Schön, Reitze, Ragwitz (2016): Aktualisierung der Potenzialanalyse für Erneuerbare Energien - Ausblick auf 2030
- Schön, Reitze, Ragwitz (2015): Aktualisierung der Potenzialanalyse für Erneuerbare Energien
- Biermayr et al. (2007): Bestimmung der Potenziale und Ausarbeitung von Strategien zur verstärkten Nutzung von erneuerbaren Energien in Luxemburg

### 2.1.1 Ist-Situation

In 2018 wurden in Luxemburg 26 Biogasanlagen betrieben, davon:

- 23 KWK-Anlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von insgesamt 9,87 MW<sub>el</sub> und einer Erzeugung von:
  - 67,1 GWh<sub>el</sub> Strom, was 9,8 % der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien (688 GWh/a) bzw. 1 % des in Luxemburg konsumierten Stroms (6.526 GWh) bzw. 7,2 % des in Luxemburg selbst erzeugten Stroms (933 GWh) entspricht (ILR, Statec).
  - und 90,7 GWh<sub>th</sub> Wärme (Gesamtproduktion) (Statec)
  - Kommerzialiserte Abwärme 27,4 GWh (ILR)<sup>1</sup>, das sind 30 % der Wärmegesamtproduktion.
  - Anlagen mit Wärmebonus: 14 (ILR).

---

<sup>1</sup> Es handelt sich um die Wärmemenge, für welche die Auszahlung des Wärmebonus erfolgte. Verschiedene Biogasanlagen haben eine externe Wärmenutzung, erreichen jedoch nicht den erforderlichen Wärmenutzungsgrad für den Wärmebonus. Diese Wärmemengen werden nicht erfasst. Die tatsächliche externe Wärmenutzung liegt daher über 27,4 GWh/a.

- Anlagen mit Güllebonus: 14 (SER)<sup>1</sup>
- Einer Größenverteilung von:
  - 11 Anlagen ≤150kW<sub>el</sub>
  - 4 Anlagen >150 bis ≤300kW<sub>el</sub>
  - 3 Anlagen >300 bis ≤500kW<sub>el</sub>
  - 5 Anlagen >500 kW<sub>el</sub>; davon 3 Anlagen > 1 MW<sub>el</sub>
- 3 Biomethananlagen mit einer Produktion von 64,2 GWh Biomethan, das entspricht 0,8 % des insgesamt verteilten Erdgases in Luxemburg (ILR).

Das aktuell genutzte Biogaspotenzial wird über Kennwerte abgeschätzt. Unter Berücksichtigung der Produktionsdaten liegt das aktuell genutzte Biogaspotenzial bei **258 GWh Biogas pro Jahr**.

Der Substratmix in den Bestandsanlagen setzt sich massenbezogen aus **58 % Gülle und Mist**, 21 % Energiepflanzen und 21 % nicht-landwirtschaftlicher Abfälle (v.a. Bioabfall) zusammen.<sup>2</sup> Umgerechnet in energetische Potenziale reduziert sich der Anteil von Gülle und Mist an der Biogasbildung auf etwa **23 %**, während der der Energiepflanzen auf etwa **44 % ansteigt**.<sup>3</sup> Die Anbaufläche für Energiepflanzen lag 2019 bei 1.310 ha, davon 1.252 ha für die Biogaserzeugung<sup>4</sup> (SER).

## 2.1.2 Potenziale der Biogasproduktion

Im Folgenden werden die oben genannten Studien im Hinblick auf die darin ermittelten Potenziale zusammengefasst.

### Bereich Gülle und Mist

In Luxemburg fallen – unter Annahme einer ganzjährigen Stallhaltung – jährlich etwa 2,67 Mio. Tonnen Gülle und Mist an (SER, 2014). Der in den bestehenden Biogasanlagen genutzte Anteil liegt bei ca. 9 %. Unter Berücksichtigung von Weidegängen wird das Gesamtpotenzial an Wirtschaftsdünger auf rund 2 Mio. Tonnen pro Jahr geschätzt (1,8 - 2,2 Mio. Tonnen pro Jahr).<sup>5</sup>

Nach der Agrarstatistik hat im Zeitraum von 2015 bis 2019 der Bestand an:<sup>6</sup>

- Rindern um 3,7 % abgenommen (bei heute rund 194.000 Tieren); die Milchkühe nehmen etwa ein Viertel davon ein, mit einem anteiligen Anstieg von 15% wegen der Abschaffung der Milchquote.
- Schweinen um ca. 12 % abgenommen (bei heute rund 84.000 Tieren).
- Hühnern um 16 % zugenommen (bei heute rund 132.000 Tieren).

<sup>1</sup> Der Güllebonus von 20 €/MWh wird gewährt bei Einsatz von ≥ 70 Gew.% Tierische Ausscheidungen im Substrat.

<sup>2</sup> <https://download.data.public.lu/resources/biodechets/20191203-164404/bericht-anonymisiert-koferm-2018.docx>

<sup>3</sup> Die Umrechnung erfolgte anhand der Verhältnisse zwischen Masse und Biogasertrag nach Daniel-Gromke et al. (2017)

<sup>4</sup> 58 ha Miscanthus

<sup>5</sup> In 2020 werden neue Daten zur Weidehaltung und Stallsysteme erhoben.

<sup>6</sup> <https://agriculture.public.lu/de/agrarstatistik/production-animale/animaux/tiere-jahr.html>

Biermayr et al. (2007) haben theoretische, technische und realisierbare Potenziale für die verschiedenen Substrate ermittelt. Für die Abschätzung des Wirtschaftsdüngeraufkommens diente als **Basis der Viehbestand aus dem Jahr 2003**. Das Gesamtjahresaufkommen wurde auf 1,2 Mio. Tonnen geschätzt. In Schön et al. (2016) wurde dieses Potenzial übernommen. Es wird von einem realisierbaren Potenzial bis 2020 von **117 GWh** Biogas pro Jahr ausgegangen. Damit würde vom theoretischen Potenzial (verlustfreie Fermentation sämtlicher Gülle und Mist) etwa zwei Drittel erfasst. Das realisierbare Potenzial bezieht ein umsetzbares Ausbauszenario für neue Biogasanlagen ein. Sowohl Biermayr et al. (2007) und Schön et al. (2016) haben die Potenziale auf der Grundlage z.T. sehr geringen Gaserträgen ermittelt, die z.T. deutlich unter den Faktoren der KTBL (Weinreich et al. 2020) liegen. Die Potenziale sind damit als unterschätzt anzusehen.

Die Biogas Vereenigung (2019) errechnet das theoretische Restpotenzial unter Berücksichtigung der aktuellen Wirtschaftsdüngerverwertung in den Bestandsanlagen von 9 %. Dies erfolgt auf Basis der Zahlen SER (2014), der aktuellen Gülle/Mist-Vergärung (2017), einem geschätzten Mengenverhältnis Rindermist/-gülle von 30%/70% und den Gasertragsfaktoren nach KTBL. Die aktuelle Gesamt-Biogasproduktion würde sich danach um den Faktor 2,5 **auf 624 GWh Biogas** erhöhen. Dieser theoretische Wert liegt um ein Vielfaches über dem Biermayr et al. (2007) errechneten theoretischen Potenzial von 168 GWh Biogas aus Gülle und Mist. Zu beachten ist allerdings, dass diesem Wert die vollständige Fermentation allen Wirtschaftsdüngers nach SER (2014) in Höhe von 2,67 Mio. Tonnen pro Jahr zu Grunde liegt. SER hat das jährliche Wirtschaftsdünger aufkommen auf 2 Mio. Tonnen revidiert.

### **Bereich Grünland**

In Biermayr et al. (2007) wird davon ausgegangen, dass die landwirtschaftlichen Grünlandflächen ausschließlich für die Futterproduktion und die Beweidung genutzt werden.

Die Biogas Vereenigung (2019) geht von der Nutzung qualitativ minderwertiger Teilernten von Grünlandaufwüchsen von etwa 20 % der Grünlandfläche für die Biogasproduktion aus und kommt auf ein Biogaspotenzial von **56 GWh** im Jahr. Dieser Ansatz bedeutet eine kombinierte Haltung von Milchvieh und Biogasproduktion, wobei in den vergangenen Jahren aufgrund der Witterung für eine Biogasproduktion in den meisten Betrieben keine überschüssigen Mengen zur Verfügung standen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass auch in Zukunft bei geringen Niederschlägen keine überschüssigen Mengen zur Verfügung stehen werden. Die Nutzung der landwirtschaftlichen Grünlandflächen zur Biogasproduktion wird nicht im Rahmen dieser Studie berücksichtigt.

### **Bereich Grünschnitt und Landschaftspflege**

Biermayr et al. (2007) gehen für die Nutzung von Grünschnitt und Landschaftspflegematerial von einem längerfristig realisierbaren Potenzial von **81 GWh** Biogas pro Jahr aus. Schön et al. (2015) bestätigen dieses Potenzial. Es ist jedoch anzumerken, dass Biermayr et al. (2007) und Schön et al. (2016) aufgrund der zu Grunde gelegten hohen Gaserträgen im Vergleich zu Literaturwerten (Biomasse-Verordnung, 2012) zu einer Überschätzung dieses Potenzials neigen.

Laut der Abfallwirtschaftsdatenbank wurden insgesamt 42.000 t Grünschnitt erfasst.<sup>1</sup> Dieses Aufkommen beinhaltet jedoch auch holzartiges Material, das für die anaerobe Vergärung in Biogasanlagen nicht geeignet ist. Das Potenzial an halmgutartigem Grünschnitt wird auf 21.000 t pro Jahr geschätzt. Das Gesamtpotenzial liegt bei 9 GWh/a.<sup>2</sup> In den bestehenden Biogasanlagen werden aktuell 13.600 t Grünschnitt pro Jahr verwertet (AEV).

### Bereich Bioabfall und andere organische Abfälle

Biermayr et al. (2007) ermittelten ein erschließbares Gesamt-Bioabfallaufkommen von 44.830 t/a (100 kg EW/Jahr) durch konsequent getrennt erfassten Bioabfall und leiteten daraus als realisierbares Potenzial von **36 GWh** Biogas ab. Schön et al. (2015) bestätigen diesen Wert. Die Biogas Vereinigung (2019) ermittelt ein Restpotenzial von 30 GWh Biogas pro Jahr.

In der Studie von Schaefer et al. (2019) über das Aufkommen, Behandlung und Vermeidung von Lebensmittelabfällen im Großherzogtum Luxemburg wird das Gesamtaufkommen an Lebensmittelabfällen, welche in den Privathaushalten, Restaurants, Hotels, Großküchen und dem Handel anfallen **auf 70.762 Tonnen pro Jahr** geschätzt. Das spezifische Aufkommen liegt bei 118 kg EW/a. Im nationalen Abfallwirtschaftsplan (Plan national de gestion des déchets et des ressources) ist es vorgesehen die Lebensmittelabfälle um 50% zu reduzieren. In Berücksichtigung der nationalen Zielsetzungen und der zukünftigen demographischen Entwicklungen<sup>3</sup> kann man **bis 2030 von einem Aufkommen von 44.250 Tonnen ausgehen**. Das Biogaspotenzial im Bereich Bioabfall aus dem Restmüll liegt bei **33 GWh<sup>4</sup>** pro Jahr

Ein Verwertungspotenzial besteht im Prinzip auch für die Lebensmittelverluste, die bei der Primärproduktion anfallen. Hierzu werden jedoch keine quantitativen Angaben erfasst. Nach Aussagen der Landwirtschaftskammer werden nicht vermarktete Lebensmittel zum Teil in Landwirtschaft und Gartenbau untergepflügt, zum Teil auch in landwirtschaftlichen Kofermentationsanlagen vergärt oder in geringerem Maße als Futtermittel genutzt (Schaefer et al. 2019).

In den 24 Kofermentationsanlagen wurden in 2018 insgesamt 85.800 t nicht landwirtschaftliche Abfälle behandelt.<sup>5</sup> Darin enthalten sind 48.000 t Küchen- und Kantinenabfälle, Garten- und Parkabfälle sowie Marktabfälle. Außerdem werden 23.500 t der in diesen Anlagen verwerteten Abfälle aus dem Ausland importiert.

### Bereich Energiepflanzen

Die Frage, welches Potenzial für diesen Bereich besteht, hängt maßgeblich von der Frage ab, welchen Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche man der Biogasproduktion (bzw. der Bioenergie überhaupt) zubilligt. Die nationalen Zielsetzungen bis 2020 (RES-NREAP) basieren auf einer Nutzung von 20 % der Ackerfläche für den Anbau von Energiepflanzen. Es werden jeweils gleiche Flächenressourcen für feste, flüssige und gasförmige biogene Energieträger vorgesehen. **Das heißt, dass gemäß des NREAP 6,7% der Ackerfläche Luxemburgs für die Produktion von Biogas bereitgestellt werden kann.**

<sup>1</sup> <https://download.data.public.lu/resources/dechets-municipaux/20190612-111752/daten-2017.pdf>

<sup>2</sup> Gasertrag Biomasse-Verordnung 2012

<sup>3</sup> STATEC, 2030 735.000-785.000 Einwohner, Mittleres Szenario 750.000 Einwohner

<sup>4</sup> KTBL Richtwert, Bioabfall

<sup>5</sup> <https://download.data.public.lu/resources/biodechets/20191203-164404/bericht-anonymisiert-koferm-2018.docx>

Biermayr et al. (2007) kommen allein unter Einbeziehung von technischen Grenzen und realisierbaren Ausbauszenarien für neue Anlagen auf ein realisierbares Potenzial von **95 GWh** Biogas im Jahr 2020. Dafür würden 1,6 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche Luxemburgs belegt. Schön et al. (2016) bestätigen in etwa diesen Wert als bis zum Jahr 2030 realisierbares Potenzial durch die Biogaserzeugung aus Energiepflanzen.

Die Biogas Vereenigung (2019) geht davon aus, dass durch „nachhaltigen Ausbau des Energiepflanzenanbaus mit optimierten Anbausystemen, Mischkulturen und Zwischenfrüchte weitere Potenziale erschlossen“ werden. Sie erstrecken sich bei einer vollständigen Ausdehnung des Energiepflanzenanbaus für Biogas in einem theoretischen Maximalszenario auf **20 % der landwirtschaftlichen Fläche (RES-NREAP) auf ein Potenzial von bis zu 458 GWh.**<sup>1</sup> Korrigiert man diesen Wert auf ein Drittel (da je ein weiteres Drittel der 20 % flüssigen und festen Bioenergieträgern zugesprochen werden soll), liegt das Maximum bei ca. **150 GWh** Biogas im Jahr.

**Gesamtbild**

Die Abschätzungen zum realisierbaren Biogaspotenzial für Luxemburg liegen nach Schön et al. (2016) mit starkem Bezug auf die Arbeiten von Biermayr et al. (2007) bei ca. 324 GWh pro Jahr. Abbildung 1 zeigt die Zusammensetzung des Potenzials und stellt es den Angaben der Biogas Vereenigung (2019) gegenüber, die bei Gülle/Mist und Energiepflanzen zu erheblich höheren Zahlen kommen und etwa 1.200 GWh pro Jahr ausweisen. Ein direkter Vergleich ist aufgrund der unterschiedlichen Ermittlungsgrundlagen jedoch nicht möglich. Wie in Kapitel 2.1.1 abgeschätzt, werden aktuell bereits 260 GWh Biogas pro Jahr in Luxemburg erzeugt. Darin enthalten sind wie erwähnt auch importierte Substrate. Von dem nach Biermayr et al. (2007) ausgeführten „realisierbaren Potenzial“ besteht dennoch kein besonders großer Abstand mehr.

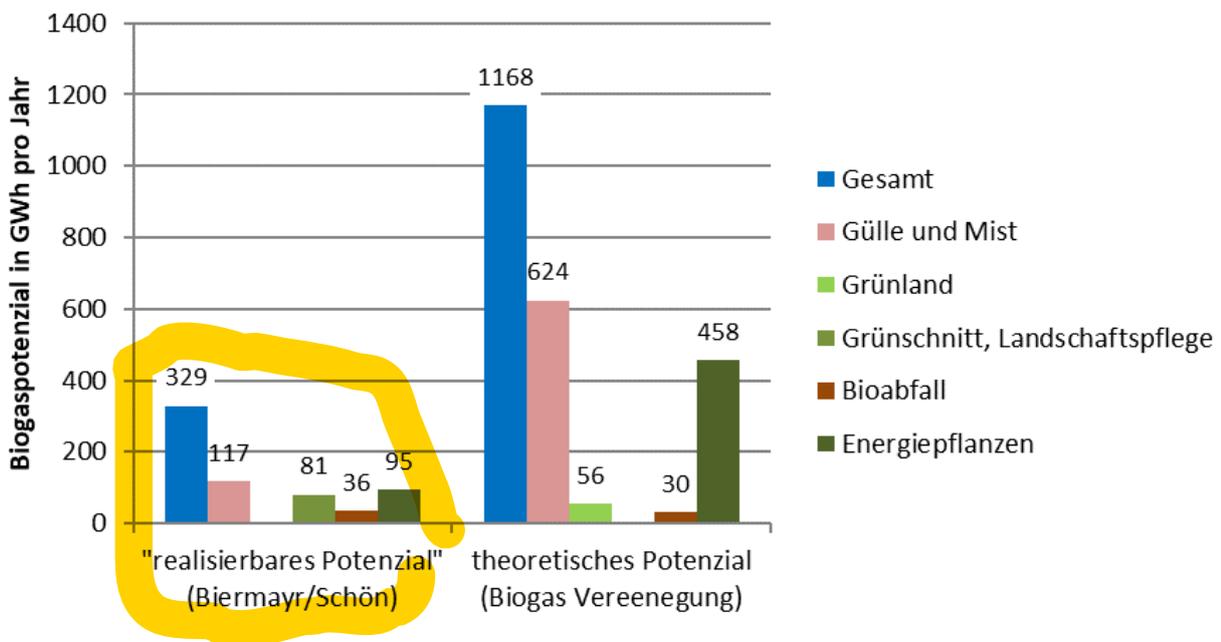


Abbildung 1: Zusammenfassung der Potenzialabschätzungen aus bestehender Literatur für die Biogasproduktion in Luxemburg.

<sup>1</sup> Mit der Begründung, dass der Anbau von flüssigen und festen Bioenergieträgern aktuell eine sehr marginale Rolle spielt, wurden die 20 % den gasförmigen Bioenergieträgern zugerechnet.

### 2.1.3 Vergleich mit anderen Studien

Die Anzahl an Studien, die sich mit Biomassepotenzial für die energetische Nutzung in Europa oder einzelnen Mitgliedstaaten – insbesondere Deutschland – befassen, ist sehr zahlreich. Es liegen zwischenzeitlich auch verschiedene Metastudien vor, die den Fundus an Arbeiten analysieren, auswerten und zusammenfassen. Als sehr umfassend sind die Studien von Brosowski et al. (2015) und Thrän et al. (2019). Eine aktuelle Metastudie stellt auch die BioRest-Studie (Fehrenbach et al. 2019) im Auftrag des deutschen Umweltbundesamts dar. Darin wurden über 50 Studien betrachtet. Überträgt man die Daten aus der auf Deutschland bezogenen BioRest-Studie auf Luxemburg, lassen sich Biogaspotenziale ableiten, die im Bereich der in Abbildung 2 dargestellten Werte liegen. Dabei wurde in sehr vereinfachter Weise über die Bevölkerungszahl umskaliert.<sup>1</sup>

Es geht hierbei nicht um genaue Zahlen, sondern um eine orientierende Gegenüberstellung. Gar nicht übertragbar sind die Daten für Stroh, für welches die BioRest-Studie neben den von den in Kapitel 2.1.2 analysierten Studien auch Stroh und Ernterückstände als verfügbares Substrat für Biogas in Deutschland ausweist<sup>2</sup>. In Luxemburg dagegen ist die Nachfrage für Stroh als Einstreumaterial grösser als das Angebot, warum luxemburgische Landwirte Stroh aus den benachbarten Grenzregionen importieren.

Vergleicht man die Darstellungen in Abbildung 2 mit Abbildung 1, zeigt sich eine Ähnlichkeit mit Biermayr et al. (2007) und Schön et al. (2016), die ähnlich wie BioRest ein realisierbares Potenzial im Fokus haben anstelle des von der Biogas Vereenegung (2019) ermittelten theoretischen Potenzials.

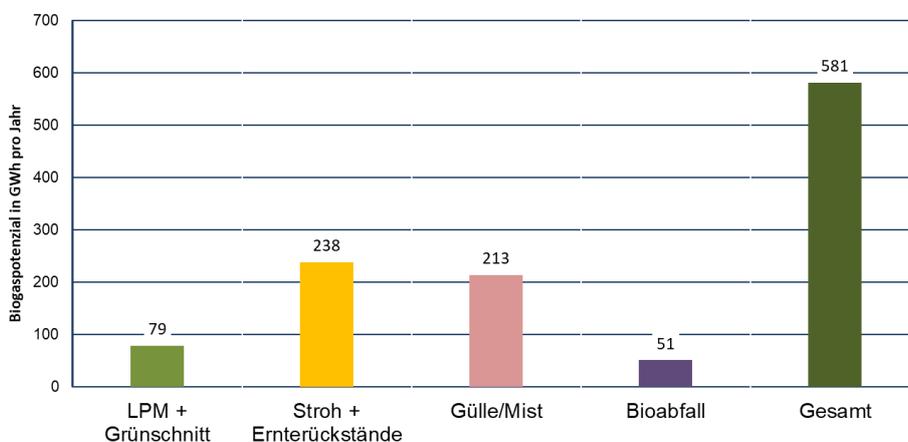


Abbildung 2: Biogaspotenzial aus vergärbaren biogenen Abfällen und Reststoffen in Deutschland, skaliert über die Einwohnerzahl auf Luxemburg; berechnet auf Basis von Daten aus der BioRest-Studie (Fehrenbach et al. 2019)

<sup>1</sup> Die Skalierung könnte auch anhand der Landwirtschaftlichen Nutzfläche erfolgen, was zu einem ähnlichen Ergebnis führen würde, die Relation zwischen Luxemburg und Deutschland besteht in beiden Punkten bei etwa 1 : 130.

<sup>2</sup> Für die Fermentation von Stroh sind spezielle enzymbasierte Fermentationstechniken erforderlich

## 2.2 Szenarien zum Ausbau der Biogasnutzung

### 2.2.1 Vorgehensweise

Das Ziel eines Ausbaus der Biogasnutzung in Luxemburg ist primär ein möglichst hoher Anteil an Fermentation von Mist und Gülle. Für die weiteren Betrachtungen werden daher drei Szenarien entwickelt, mit

- A.) einer eher geringen Erfassung des theoretischen Potenzials an Gülle und Mist von 25 % zur Vergärung einsetzen („konservative Nutzung“),
- B.) einer „ambitionierten Nutzung“ mit 50 % Erfassung und
- C.) einer „sehr ambitionierten Nutzung“ mit einer Erfassung von 100 % der Betriebe zur Biogasproduktion.

Zur Bestimmung der Bezugsgröße für das theoretische Maximum an Biogas aus Gülle und Mist wird dem Ansatz der Biogas Vereenigung (2019) gefolgt, der Wert von 624 GWh Biogas pro Jahr jedoch angepasst auf die von SER angepassten Menge Gülle und Mist, die in der Stallhaltung anfallen (siehe Kapitel 2.1.2). Als Bezugsgröße resultieren danach ein Gesamtpotenzial von **467 GWh** Biogas pro Jahr.

Der Ansatz der „sehr ambitionierten Nutzung“ mit einer Erfassung von 100 % dieser Menge an Gülle und Mist ist aus Gründen der teilweise kleinen und verteilten Produktionseinheiten aus aktueller Sicht schwer zu realisieren. Um diese Mengen zu mobilisieren ist vermutlich eine nationale Fortentwicklung des Güllemanagements notwendig. Es handelt sich um ein theoretisches Modell. Außerdem ist zu beachten, dass durch die Vergärung der vollständigen Menge an Gülle und Mist die Freisetzung reaktiven Stickstoffs (v.a. Ammonium und Ammoniak) erhöht wird (siehe auch Kapitel 2.3.2 und 2.3.5). Bereits heute stellt die Gülleverwertung eine Herausforderung dar. Daher müsste ein solches Szenario bei der Umsetzung mit einer Gesamtbilanzierung des Stickstoffkreislaufs erfolgen, v.a. auch um der Nitratproblematik vorzubeugen.

Komplettiert werden die Biogaspotenziale in den Szenarien durch die konservativ, ambitioniert und sehr ambitionierten Mengen aus Bioabfall und Grünschnitt sowie Landschaftspflegematerial. Bei Bioabfall wird auf die oben erwähnten **33 GWh** als theoretisches Maximum bei vollständiger Trennung der organischen Abfälle aus dem Hausmüll Bezug genommen. Laut Schaefer et al. (2019) leben 75% der Gesamtbevölkerung in Gemeinden wo die separate Erfassung des Bioabfalls angeboten wird. Der Anschlussquote in diesen Gemeinden liegt bei 44 %. Bezogen auf die Gesamtbevölkerung liegt der Anschlussgrad bei 33 %. Die Zielsetzung ist es soweit wie möglich den Bioabfall aus dem Restmüll separat zu erfassen und zu verwerten.

Für Grünschnitt und Landschaftspflegematerial werden die aus Biermayr et al. (2007) ermittelten Mengen als Bezug genommen. Durch die Anpassung des Gasertrages liegt das Gesamtpotenzial bei **9 GWh** Biogas pro Jahr.

In Tabelle 1 sind die ermittelten Potenziale der Stoffströme Gülle und Mist, Bioabfall sowie Grünschnitt für die drei Szenarien zusammengestellt.

Tabelle 1: Definition der drei Szenarien mit jeweiligem Mobilisierungsgrad des theoretischen Potenzial für die Bereiche Gülle und Mist, Bioabfall sowie Grünschnitt und Landschaftspflegematerial

Szenario	Gülle und Mist			Bioabfall			Grünschnitt		
	%	Mio t/a	GWh/a	%	Mio. t/a <sup>a)</sup>	GWh/a	%	Mio. t/a	GWh/a
<b>A. Konservativ</b>	25%	0,5	117	50%	0,02	16	50%	0,01	5,8
<b>B. Ambitioniert</b>	50%	1,0	234	75%	0,03	24	75%	0,02	7,6
<b>C. Sehr ambitioniert</b>	100%	2,0	467	100%	0,04	33	100%	0,02	9,0

Die Potenziale für Gülle und Mist sowie Bioabfall, Landschaftspflegematerial und Grünschnitt dienen als Grundlage für Ermittlung des Energiepflanzenbedarfs in den Biogasanlagen.

Für die Ermittlung des Energiepflanzenbedarfs werden in dieser Studie für die jeweiligen drei Szenarien, zwei Varianten des Wirtschaftsdüngereinsatzes in den Biogasanlagen dargestellt.

1. In der ersten Variante wird von einem Wirtschaftsdüngereinsatz von 70 % (auf die Masse bezogen) am Gesamtinput ausgegangen. Die Nutzung von mindestens 70 % Wirtschaftsdünger wird unter den aktuellen Rahmenbedingungen mit einem Güllebonus gefördert.
2. In der zweiten Variante wird von einem Einsatz von 90 % Gülle und Mist (auf die Masse bezogen) ausgegangen.

In den beiden Varianten wird der Restanteil in der Substratzusammensetzung vorrangig über Grünschnitt, Landschaftspflegematerial und Bioabfall gedeckt und anschließend durch den Einsatz von Energiepflanzen ergänzt.

Die erforderlichen Mengen an Energiepflanzen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Zur Ermittlung der damit verbundenen Anbauflächen wird auf die Daten aus Kapitel 3.1.1, *Flächenbelegung durch Biomethan und Strom aus Mais*, zurückgegriffen (Tabelle 6). Es wird ein spezifischer Flächenbedarf von **237 m<sup>2</sup> pro MWh Biogas** und Jahr unterstellt. Für andere Energiepflanzen ist der Flächenertrag in der Regel geringer. Auf der anderen Seite kann die Gesamtflächenbelegung durch Einbeziehung von bspw. Zwischenfrüchte auch optimiert werden. Der Flächenbelegungsfaktor für Biogas aus Silomais wird für die Betrachtung hier daher als aussagekräftig angenommen.

In Tabelle 3 sind alle Biogasmengen der Szenarien zusammengestellt und in Abbildung 3 veranschaulicht.

Tabelle 2: Die mit dem Einsatz von Energiepflanzen verbundenen Biogasmengen in den landwirtschaftlichen Biogasanlagen und die dafür benötigten Flächen.

Szenario	Gülle und Mist		Grünschnitt		Bioabfall		Energiepflanzen		
	Mio. t/a	GWh/a	Mio. t/a	GWh/a	Mio. t/a	GWh/a	Mio. t/a <sup>a)</sup>	GWh/a <sup>b)</sup>	ha <sup>c)</sup>
<b>70% Gülle/Mist</b>									
<b>A. Konservativ</b>	0,5	117	0,014	5,8	0,022	16	0,18	201	4.500
<b>B. Ambitioniert</b>	1,0	234	0,018	7,6	0,033	24	0,38	400	9.400
<b>C. Sehr ambitioniert</b>	2,0	467	0,021	9,0	0,044	33	0,79	892	19.800
<b>90% Gülle/Mist</b>									
<b>A. Konservativ</b>	0,5	117	0,014	5,8	0,022	16	0,02	22	500
<b>B. Ambitioniert</b>	1,0	234	0,018	7,6	0,033	24	0,06	64	1.500
<b>C. Sehr ambitioniert</b>	2,0	467	0,021	9,0	0,044	33	0,16	177	3.900

- a) Als 30 % Masse (bzw. 10 %) gegenüber den 70 % Masse (bzw. 90 %) Gülle/Mist in Tabelle 1 errechnet
- b) Nach KTBL mit 340 m<sup>3</sup> Biomethan pro t Maissilage (oTM) bei einem oTM-Gehalt von 29 % und einem Heizwert von 9,96 kWh/m<sup>3</sup> Methan
- c) Berechnungsgrundlage siehe Text.

Tabelle 3: Gesamtschau der Biogasmengen aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen sowie Biogasanlagen für Bioabfall, Grünschnitt und Landschaftspflegematerial.

Szenario	Gülle und Mist	Grünschnitt	Bioabfall	Energiepflanzen	Total
	in GWh/a	in GWh/a	in GWh/a	in GWh/a	in GWh/a
<b>70% Gülle/Mist</b>					
<b>A. Konservativ</b>	117	6	16	201	340
<b>B. Ambitioniert</b>	234	8	24	400	666
<b>C. Sehr ambitioniert</b>	467	9	33	892	1.400
<b>90% Gülle/Mist</b>					
<b>A. Konservativ</b>	117	6	16	22	161
<b>B. Ambitioniert</b>	234	8	24	64	330
<b>C. Sehr ambitioniert</b>	467	9	33	177	685

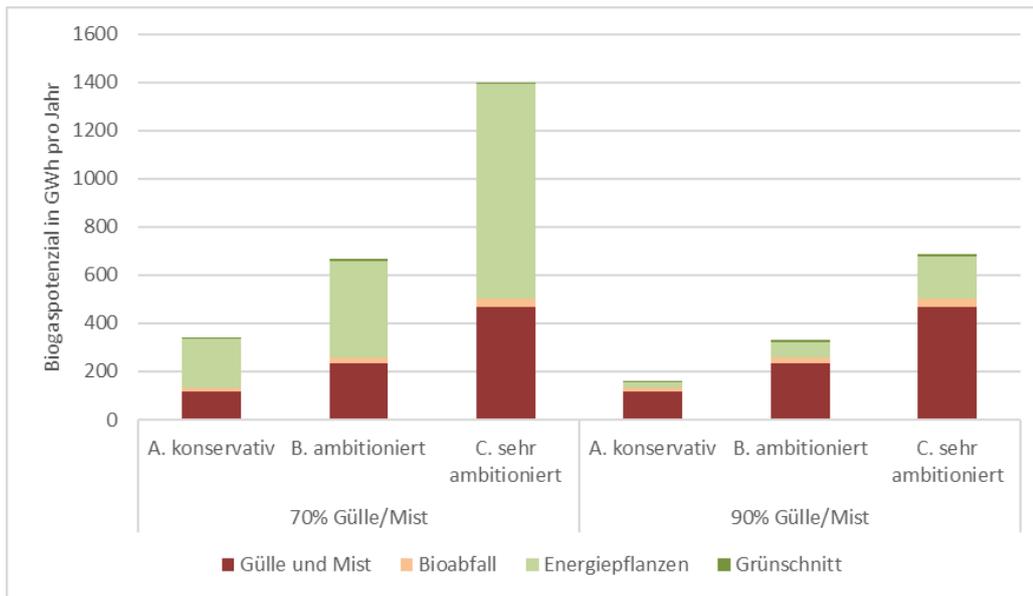


Abbildung 3: Gesamtschau der Biogasmengen aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen sowie Biogasanlagen für Bioabfall, Grünschnitt und Landschaftspflegematerial

### 2.2.2 Schlussfolgerungen und Empfehlung

Auf der Basis der erwähnten Studien und Statistiken sowie der daraus entwickelten Szenarien werden die möglichen Potenziale für Biogas in Luxemburg wie folgt eingeschätzt:

- Insgesamt:** Mit einem konservativen Ansatz werden insgesamt 340 GWh Biogas pro Jahr erzielt; setzt man den Mindestanteil an Wirtschaftsdünger von 70 % auf 90 %, so reduziert sich das Potenzial auf 161 GWh pro Jahr. Der „ambitionierte“ Ansatz erreicht ein Gesamtpotenzial von 666 GWh Biogas pro Jahr. Durch die Erhöhung des Anteils an Gülle und Mist am Gesamtinput, reduziert sich das Potenzial auf 330 GWh pro Jahr. Der „sehr ambitionierte“ Ansatz ist mit 1.400 GWh Biogas verbunden (90% Szenario 685 GWh).

- Nachwachsende Rohstoffe (Energiepflanzen):**

Mit dem beschriebenen Szenarienansatz werden von 201 GWh (konservativ) bis 892 GWh (sehr ambitioniert) Biogas aus Energiepflanzen benötigt, um die Substratergänzung in der Variante mit einem Massenanteil von 70% Gülle/Mist zu erfüllen. Betreibt man die landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit 90 % Mist/Gülle, reduziert sich der Bedarf auf 22 bis 177 GWh pro Jahr.

Die Bandbreite an Flächenbedarf für den Anbau der Energiepflanzen erstreckt sich – wie in Abbildung 4 zu sehen – von 500 ha (konservativ mit 90 % Gülle/Mist) bis knapp 20.000 ha (sehr ambitioniert mit 70 % Gülle/Mist). Bezogen auf die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche Luxemburgs<sup>1</sup> sind dies etwa 0,4 bis 15 %. Bezogen nur auf die Ackerfläche sind es 0,8 % bis 31 %.

Im ambitionierten Fall mit 70 % Gülle/Mist liegt der Flächenbedarf bei 9.400 ha, das

<sup>1</sup> Nach Daten aus: <https://agriculture.public.lu/de/publications/statistiks/landwirtschaft-in-zahlen-2016.html>

sind 7,2 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche und 15 % der Ackerfläche. Durch die Erhöhung des Gülle- und Mistanteils auf 90% reduziert sich die Anbaufläche auf 1.500 ha, was 1,1% der landwirtschaftlichen Nutzfläche und 2,4% der Ackerfläche entspricht.

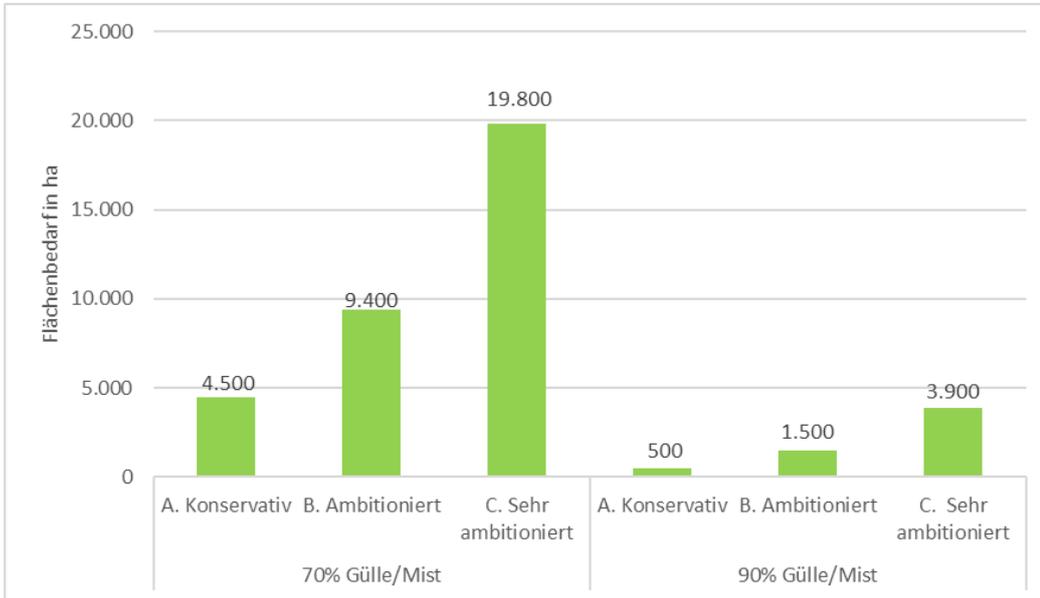


Abbildung 4: Gesamtschau der Flächenbedarfe für Energiepflanzen der verschiedenen Szenarien

Bei Energiepflanzen geht es weniger um die technische Frage nach der potenziell verfügbaren Fläche, als vielmehr um die Werteinschätzung, inwieweit Anbaufläche für Biomasseproduktion zu Energiezwecken eingesetzt werden soll. Die nationalen Zielsetzungen bis 2020 (RES-NREAP) setzen die Priorität ganz klar auf die Nutzung von Reststoffen und die Einschränkung von Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen. Die Zielgröße von 20 % der Ackerfläche für den Anbau von Energiepflanzen verteilt sich gleichmäßig auf fest, flüssige und gasförmige Bioenergieträger. Hohe Anteile des Energiepflanzenanbaus bedeuten eine massive Verschiebung weg vom Nahrungs- und Futtermittelanbau. Aus solchen Anteilen verschärft sich das Risiko indirekter Landnutzungsänderung (iLUC). Diese Risiken haben die Ausgestaltung der Erneuerbaren Energie Richtlinie (RED) maßgeblich geprägt und mit der RED II eine Deckelung von Nahrungs- und Futtermittelpflanzen für flüssige Biokraftstoffe nach sich gezogen.

Der sehr ambitionierte Ansatz mit 70 % Gülle/Mist-Anteil, würde den Flächenbedarf von über 30 % Ackerfläche ausschöpfen, sodass für flüssige und feste Bioenergie nach dem Ziel des RES-NREAP kaum mehr Flächen übrig wären.

Eine zurückhaltende Strategie, was den Ausbau von Energiepflanzen für Biogas betrifft, ist daher sehr zu begrüßen. Dies schließt jedoch nicht aus, dass die von der Biogas Vereinigung (2019) erwähnte Optimierung von Anbausystemen mit Mischkulturen und Zwischenfrüchten, aus denen (Co-)Substrate für Biogas gewonnen werden können, gefördert werden sollte.

- **Gülle und Mist:**

Die dargestellten Potenziale aus den Studien für Luxemburg bewegen sich zwischen 117 und 620 GWh Biogas pro Jahr, wobei das Maximum (reduziert um den Viehanteil an Weidehaltung) das theoretische Potenzial von 467 GWh Biogas pro Jahr beschreibt.

Das ambitionierte Szenario liegt bei der Hälfte des theoretischen Potenzials mit 234 GWh, das konservative Szenario mit 117 GWh liegt bei der Einschätzung von Schön et al. (2016) für das realisierbare Potenzial (dieses geht jedoch von sehr geringen Biogasbildungsraten aus).

Um das ambitionierte Szenario zu erfüllen, wird es daher sehr große Anstrengungen benötigen.

- **Substrate aus der Grünlandnutzung:**

Die Nutzung von Material von Grünland hängt von der Betriebsstruktur und von den Niederschlägen ab und stellt ein nicht planbares Potenzial dar. Wird es in landwirtschaftliche Biogasanlagen eingesetzt, konkurriert es um die neben dem Wirtschaftsdünger verbleibenden 10 bis 30 %.

- **Grünschnitt:**

Grünschnitt bietet in landwirtschaftlichen Biogasanlagen ein Gesamtpotential von 9 GWh Biogas pro Jahr.

- **Bioabfall:**

Die 33 GWh im „sehr ambitionierten“ Szenario würden sehr große Anstrengungen im Abfallbereich erfordern. Es ist jedoch zu empfehlen, diese Maßnahmen so weit wie möglich umzusetzen.

Nach den Zielsetzungen NECP soll die Stromproduktion aus Biogas bis 2030 auf 93 GWh pro Jahr ausgebaut und rund 82 GWh Biomethan pro Jahr in das Erdgasnetz eingespeist werden. Diese Zielsetzungen entsprechen einer Rohbiogasproduktion von schätzungsweise 330 GWh pro Jahr. Eine Umsetzung der ambitionierten und sehr ambitionierten Szenarien würde es erlauben diese Zielsetzung zu erreichen, wie auch Abbildung 5 zeigt.

Die Szenarien mit einer Nutzung von 70 % Mist und Gülle würden jedoch zu einem nicht unerheblichen Flächenbedarf für den Anbau von Energiepflanzen führen. Es wäre daher zu empfehlen, für diesen Anteil verstärkt ökologisch optimierte Systeme (Zwischenfrüchte) oder weitere organische Reststoffe (ggf. auch Grüngut, Ernterückstände etc.) einzusetzen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die alternativen Energiepflanzen und Zwischenfrüchte z.T. deutlich geringere Flächenerträge und damit auch Biogaserträge aufweisen als z.B. Silomais. Die Ausweitung solcher Anbauten muss also im Rahmen eines integrierten Gesamtkonzepts zur einer Ökologisierung der landwirtschaftlichen Produktion gesehen werden. Insbesondere soll auch hier auch noch darauf verwiesen werden, dass durch den Import von Energiepflanzen für die Biogasgewinn es lediglich zu, einer Verlagerung der Umweltimpakte kommt.

Bei den Szenarien mit einem Einsatz von 90 % Gülle und Mist am Gesamtinput würde sich der Flächenbedarf gegenüber der aktuellen Situation (1.252 ha in 2019) um rund 250 ha im ambitionierten Szenario und 2050 ha im sehr ambitionierten Szenario erhöhen.

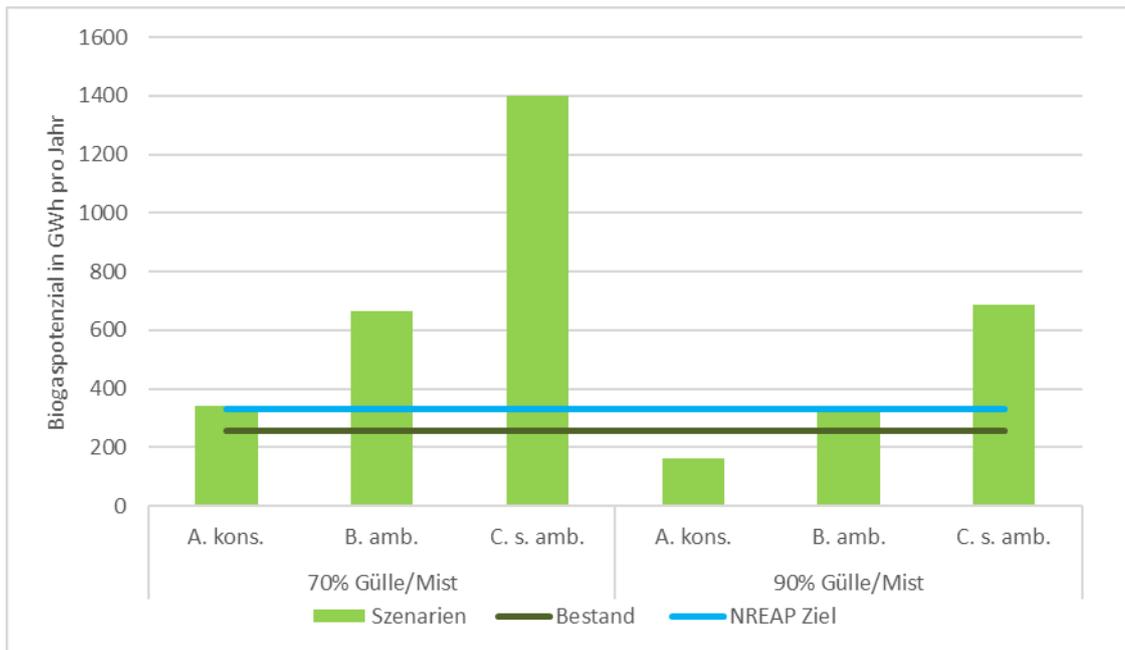


Abbildung 5: Gesamtschau der Biogasmengen aus den Szenarien im Vergleich mit dem Bestand und dem Ziel des NREAP

## 2.3 Ökologische Aspekte der Nutzung von Biogas

### 2.3.1 Bilanz der Treibhausgasemissionen

Ein zentrales politisches Motiv für die Nutzung und den Ausbau von Biogas als erneuerbarem Energieträger ist die damit erwartete Einsparung von Treibhausgasemissionen im Vergleich zu fossilen Energieträgern, die die obere Bandbreite der möglichen Einsparung darstellen. Die Produktion und Nutzung von Biogas selbst ist jedoch nicht ohne Emission von Treibhausgasen. Auf der anderen Seite dient die anaerobe Vergärung von Gülle und Mist der Reduktion von Methanemissionen, die bei der konventionellen Lagerung entstehen.

Die Nettoeinsparung – Emissionen aus Produktion und Nutzung von Biogas, Reduktion von Methanemissionen und Ersatz von fossilen Energieträgern – steht daher im Vordergrund. Im Folgenden werden für die in Luxemburg relevanten Substrate sowie die vorangehend entwickelten Szenarien Treibhausgasbilanzen vorlegt.

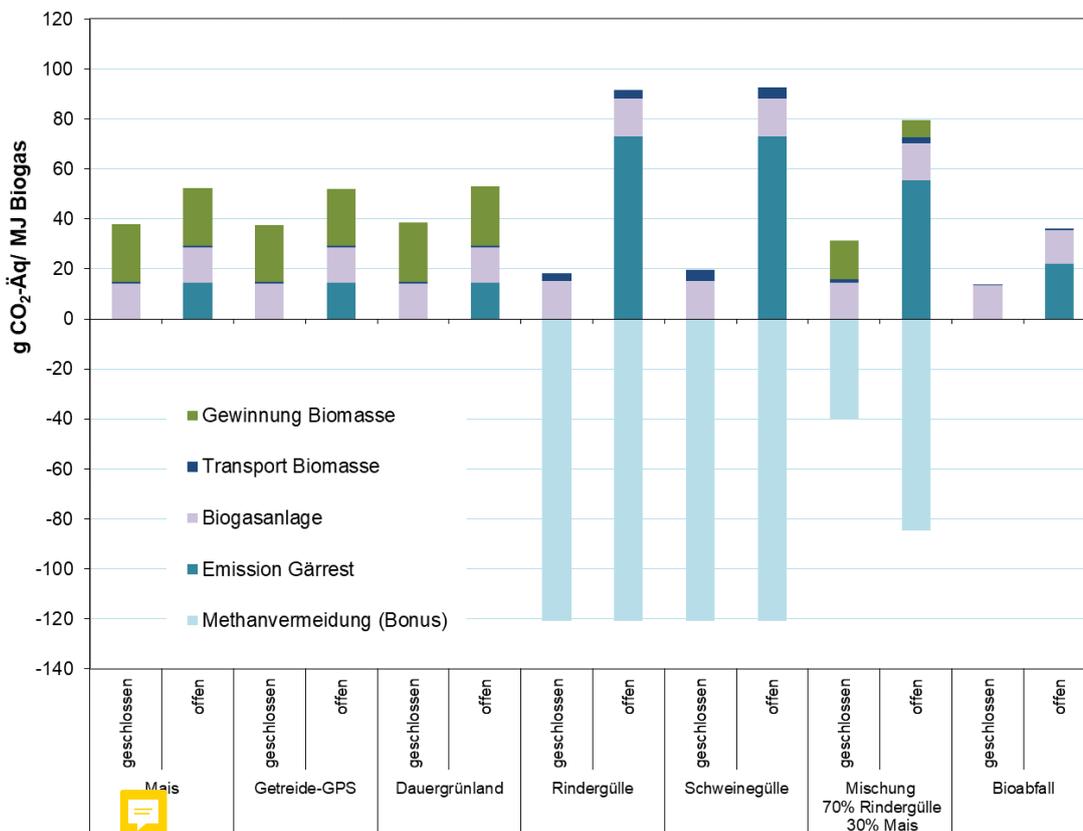
Als Grundlage für solche Bilanzen stehen zahlreiche Quellen und Methoden zur Verfügung. Umfassende Bilanzen wurden z.B. bereits von Vogt et al. (2008) oder Fehrenbach et al. (2010) erstellt. Mit dem von der EU Kommission finanzierten Projekt BioGrace liegt mit dem Rechen-Tool BioGrace II<sup>1</sup> auch eine Excel-basierte Grundlage vor zur Berechnung von THG-Emissionen z.B. auch für Biogas und Biomethan aus einer ausgewählte Anzahl an Substraten vor.

<sup>1</sup>

[https://www.biograce.net/app/webroot/biograce2/content/ghgcalculationtool\\_electricityheatingcooling/overview](https://www.biograce.net/app/webroot/biograce2/content/ghgcalculationtool_electricityheatingcooling/overview)

In Abbildung 6 sind THG-Bilanzen für eine Reihe von Biogaspfaden zusammengestellt. Darin zeigt sich, dass folgende Beiträge besonders relevant sind für die Ergebnisse:

- Den Anbau der Biomasse (v.a. die Produktion der Düngemittel und die Lachgasemissionen durch Düngung),
- Die Emissionen aus der Biogasanlage selbst (hier besteht Optimierung bei Versorgung mit Eigenstrom, es bleiben aber Restemissionen durch diffuse Anlagenverluste)
- Die Frage, ob das Gärrestlager gasdicht geschlossen ist (dies ist v.a. bei der Güllelagerung von besonders gravierender Bedeutung, wie Abbildung 6 zeigt)<sup>1</sup>
- Die Gutschrift durch die Vermeidung von Methanemissionen für das Vergären von Gülle anstelle derer Ausbringung in unvergorener Form (dies führt sogar bei offenem Gärrestlager zu negativen Nettoemissionen, d.h. es werden mehr THG-Emissionen vermieden als verursacht, bereits ohne Berücksichtigung der Vermeidung von fossilen Energieträgern durch die Biogasnutzung).

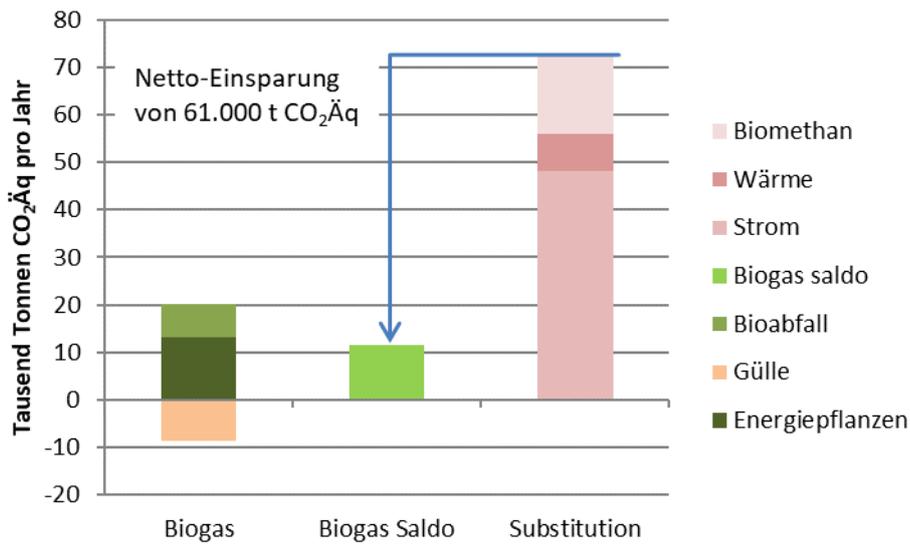


Quelle: Zusammenstellung aus Daten von Fehrenbach et al. (2010), Fehrenbach et al. (2015), BioGrace II „geschlossen“ bedeutet gasdichtes Gärrestlager, „offen“ bedeutet offenes Gärrestlager.

Abbildung 6: THG-Bilanzen für verschiedene Biogaspfade, differenziert nach den Teilschritten

<sup>1</sup> Für den auf die Vermeidung von Methanemissionen bezogenen pauschale Faktor aus der RED von -111,9 g CO<sub>2</sub>eq/MJ Biogas (Richtlinie EU 2018/2001, Anhang VI, Teil C) könnte alternativ auch ein für Luxemburg spezifischer Wert ermittelt werden unter Berücksichtigung der tatsächlichen Gestaltung der Viehställe (z.B. für Spaltenböden); Grundlagen böten dazu Gargano et al. (2010) oder die Berechnungen Luxemburgs für den nationalen Inventarbericht. Eine solche detaillierte Berechnung kann im Rahmen dieser Kurzstudie nicht geleistet werden.

Gerade die Anrechnung des Bonus für die Güllevergärung ermöglicht große THG-Einsparpotenziale durch Biogas. Wendet man die Daten aus Abbildung 6 auf die aktuelle Nutzung in Luxemburg (siehe 2.1.1) an, so errechnet sich daraus pro Jahr eine netto eingesparte Emission von 61.000 t CO<sub>2</sub>-Äq (siehe Abbildung 7). Dabei wurde nach Angaben von AEV angenommen, dass 36 % der Anlagen mit abgedecktem Gärrestlager ausgestattet sind. Von der erzeugten nutzbaren Wärme werden derzeit 30 % genutzt.<sup>1</sup>



Quelle: eigene Berechnung; Emissionsfaktoren ifeu; Daten zur Biogasnutzung von ILR und Schön et al. (2015); In dem Balken für Bioabfall ist auch der Wert für Grünschnitt enthalten  
 Abbildung 7: THG-Bilanz für die aktuelle Situation der Biogasproduktion und –nutzung in Luxemburg

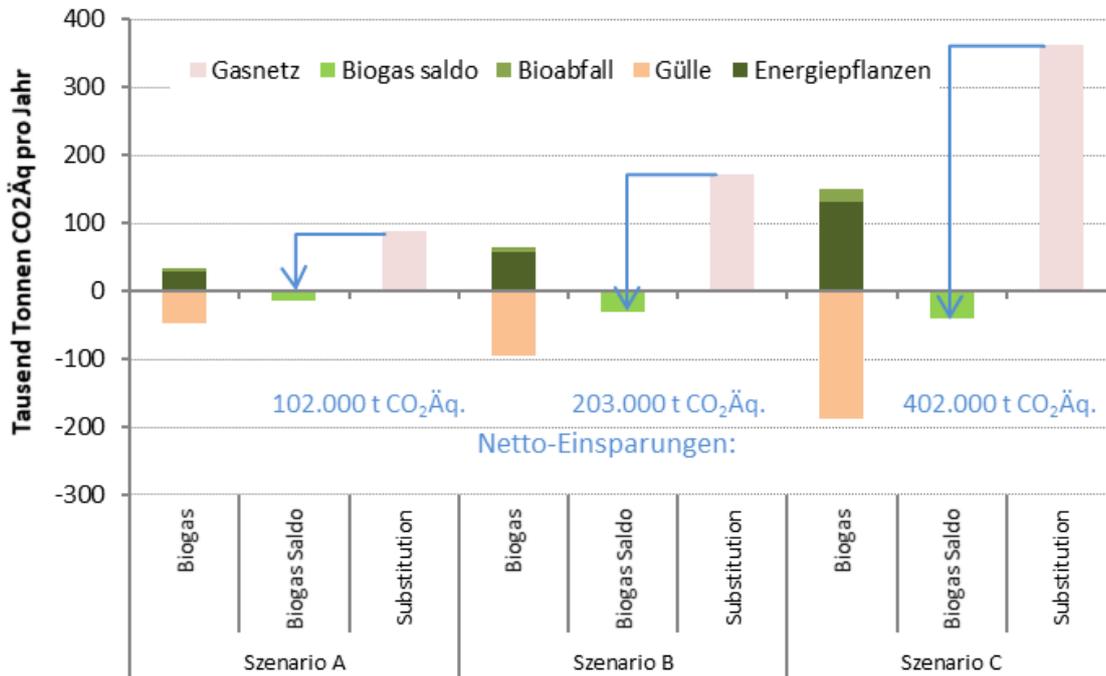
Für die drei Szenarien werden in gleicher Weise die THG-Emissionen errechnet. Hierfür wurde unterstellt, dass 80 % der Anlagen künftig mit gasdichtem Gärrestlager ausgestattet sind und die Nutzung gemäß den Zielsetzungen des NECP prioritär über Einspeisung in das Gasnetz erfolgt. Das Ergebnis ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Nettoeinsparungen belaufen sich danach auf:

- Szenario A (konservativ): 102.000 t CO<sub>2</sub>-Äq.
- Szenario B (ambitioniert): 203.000 t CO<sub>2</sub>-Äq.
- Szenario C (sehr ambitioniert): 402.000 t CO<sub>2</sub>-Äq.

Nimmt man 100 % Ausstattung mit gasdichten Gärrestlagern an, erhöhen sich die Nettoeinsparungen um 10.000 t CO<sub>2</sub>-Äq. (A), 21.000 t CO<sub>2</sub>-Äq. (B) bzw. 43.000 t CO<sub>2</sub>-Äq. (C).

Bei einer Gesamtemission des Großherzogtums Luxemburg von 10,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. in 2017 entspräche dies einem Beitrag zur Minderung von ca. 1,0 bis maximal 3,9 %. Im ambitionierten Szenario B entspricht die Einsparung 2,0 %

<sup>1</sup> Nach ILR und persönlicher Mitteilung O. Turnus Statec



Quelle: eigene Berechnung; Emissionsfaktoren ifeu; Szenarien siehe Kapitel 0;

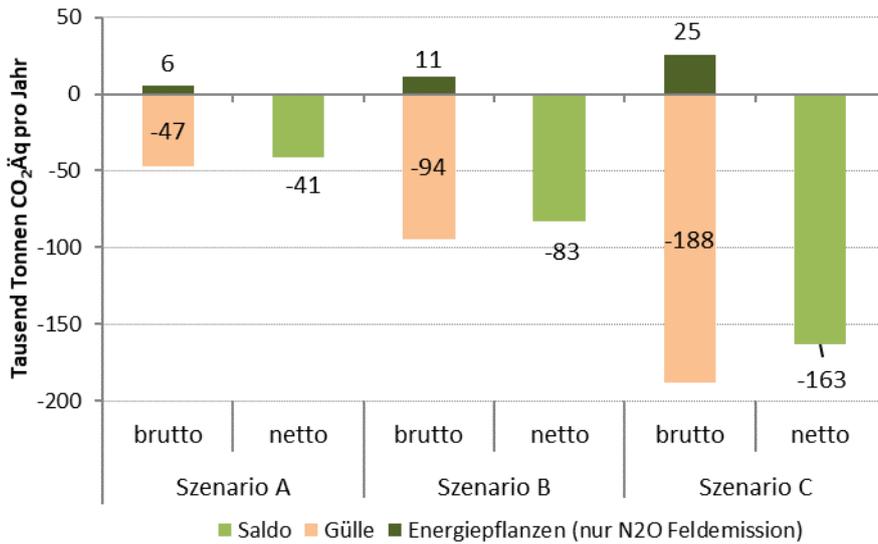
In dem Balken für Bioabfall ist auch der Wert für Grünschnitt enthalten

Abbildung 8: THG-Bilanz für die drei Szenarien der Biogasproduktion und –nutzung in Luxemburg

Beschränkt man den Bilanzraum auf die Emissionsquellen des luxemburgischen Landwirtschaftssektors nach der Berechnungsmethode zur Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen, gehen nur die Emissionen der Düngung (und hier v.a. das Lachgas, N<sub>2</sub>O) sowie die Emissionen aus dem geänderten Gülle-Management ein. Damit wäre nur ein Teil der in Abbildung 8 dargestellten Balkenteile für „Energiepflanzen“ und der vollständigen Balkenteile für „Gülle“ zu betrachten. Für die Szenarien errechnen sich dann folgende Emissionswerte (siehe auch Abbildung 9):

- Szenario A (konservativ): 41.000 t CO<sub>2</sub>-Äq.
- Szenario B (ambitioniert): 83.000 t CO<sub>2</sub>-Äq.
- Szenario C (sehr ambitioniert): 163.000 t CO<sub>2</sub>-Äq.

Bezogen auf die 750.000 t CO<sub>2</sub>-Äq. im Landwirtschaftssektor Luxemburg würde diese Einsparung im Bereich zwischen 5,5 % bis maximal 22 % liegen. Im ambitionierten Szenario B entspricht die Einsparung 11 %.



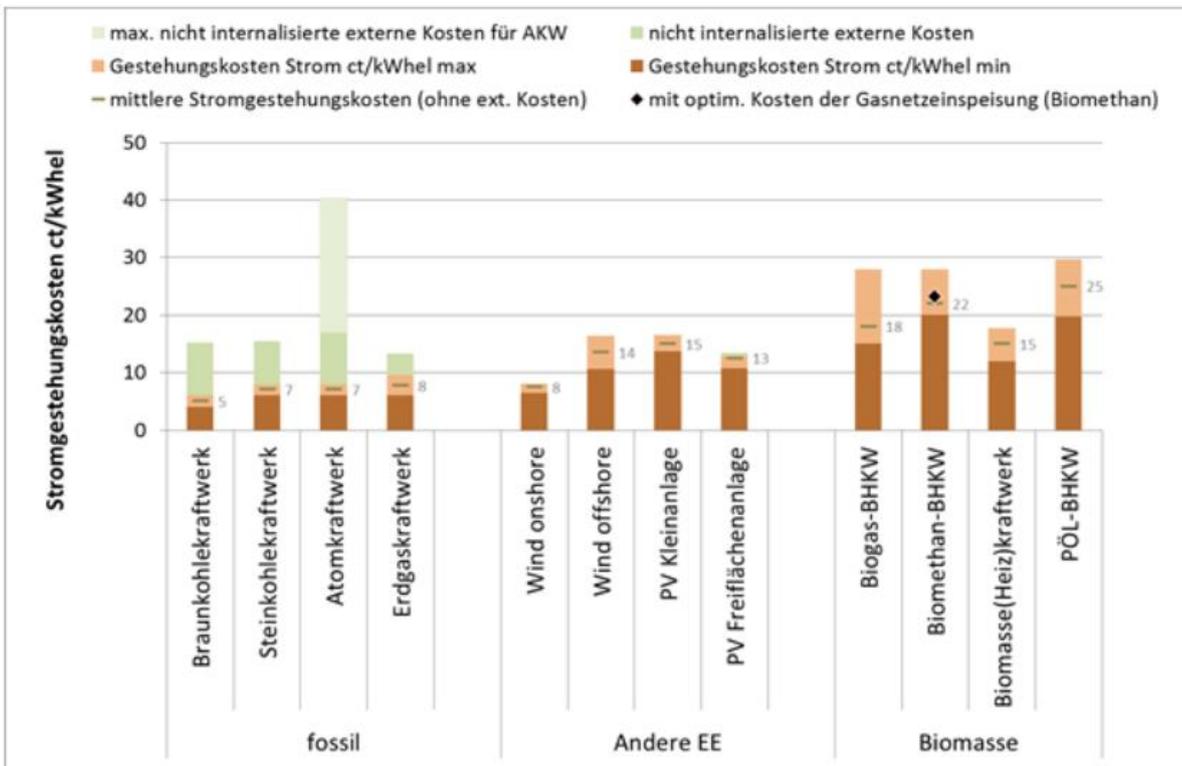
Quelle: eigene Berechnung; Emissionsfaktoren ifeu; Szenarien siehe Kapitel 0

Abbildung 9: THG-Bilanz für die drei Szenarien der Biogasproduktion in Luxemburg – Bilanzraum nur für Landwirtschaftssektor nach Berechnungsmethode zur Klimarahmenkonvention

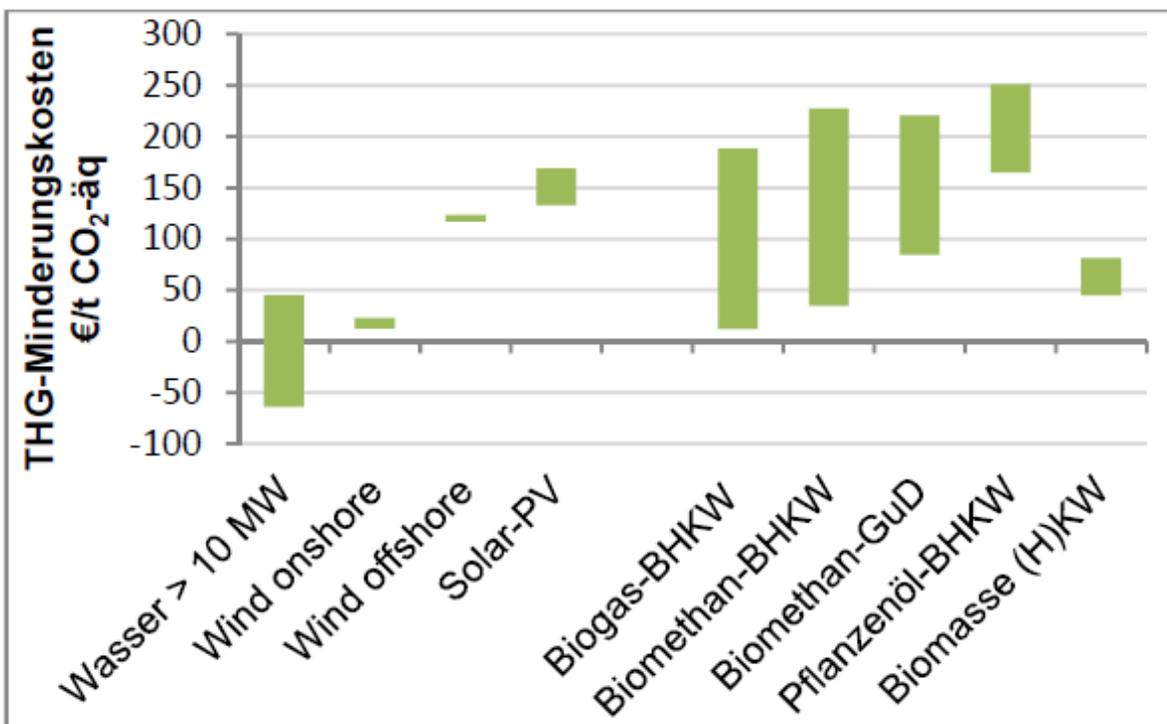
### Monetäre Aspekte

Auf Basis von Daten aus Deutschland liegen die Gestehungskosten von Energie aus Biogas in Abhängigkeit von Substratkosten und Volllaststunden sowie diverser weiterer Randbedingungen zwischen 13 und 28 Cent/kWh (Scholwin et al. 2014). Für Strom aus vor-Ort-Erzeugung bewegen sie sich im Mittel um die 18 Cent pro erzeugter kWh<sub>el</sub> Strom (Abbildung 10). Damit liegen die Gestehungskosten für Strom aus Biogas insgesamt höher als für Strom aus Windkraft (v.a. on-Shore) und Photovoltaik (PV).

Bezüglich der THG-Vermeidungskosten zeigen sich für die verschiedenen Möglichkeiten der Biogasnutzung große Bandbreiten (siehe Abbildung 11, rechtes Diagramm). Zwischen 10 und 220 €/t CO<sub>2</sub> weisen die Analysen von Scholwin et al. (2014) aus. Damit kann Biogas und Biomethan fallweise kosteneffizienter THG-Emissionen einsparen als off-shore-Windkraft sowie PV.



Quelle: Scholwin et al. (2014); darin Quelle für Bioenergie: Müller-Langer et al. (2008)  
 Abbildung 10: Gestehungskosten für Strom aus verschiedenen Energieträgern



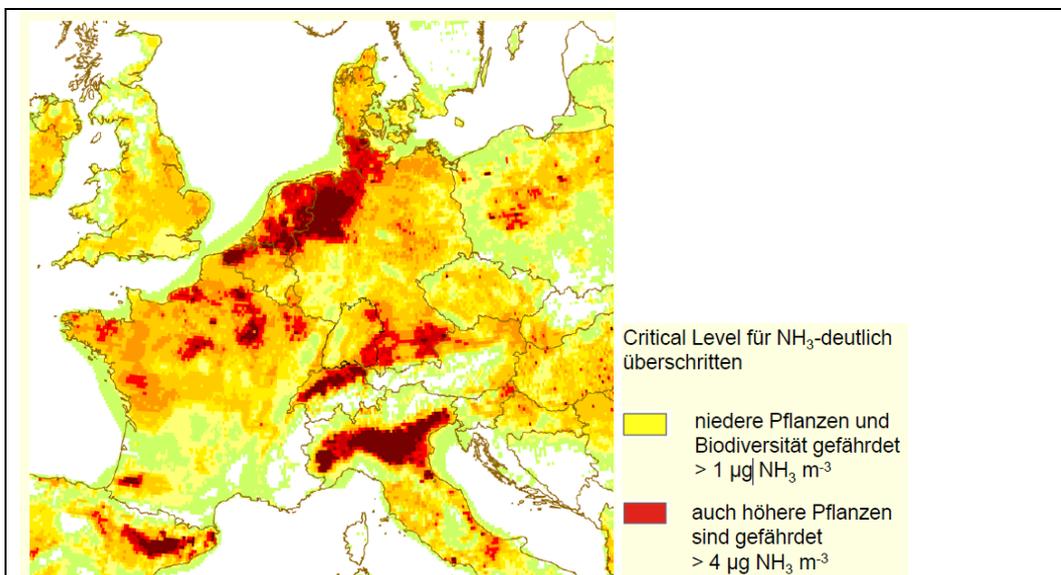
Quelle: Scholwin et al. (2014); darin Quelle für Bioenergie: Müller-Langer et al. (2008)  
 Abbildung 11: THG-Vermeidungskosten verschiedener Bioenergiepfade im Vergleich zu anderen EE

Die Analyse der Gestehungskosten wurde hierbei anhand der Annuitätenmethode (dynamisches Partialmodell) auf der Basis der VDI 2067 bzw. VDI 6025 durchgeführt. Dabei wird ermittelt, ob die Investitionen die Wiedergewinnung der Anschaffungszahlungen und eine ausreichende Verzinsung des eingesetzten Kapitals erbringen. Es wird davon ausgegangen, dass keine Rückflüsse für das Hauptprodukt (Wärme, Strom, Kraftstoff) entstehen. Die Gegenüberstellung der Bioenergiekonversionsketten erfolgt daher ausschließlich als Vergleich der aufzuwendenden Kosten, um den jeweiligen Endenergieträger bereitzustellen. (Müller-Langer 2008).

### 2.3.2 Aspekt der Ammoniakemissionen

#### Die Problematik der Ammoniakemissionen

Die erhöhten Emissionen reaktiver Stickstoffverbindungen, insbesondere von Ammoniak, zählen zu einem der drängendsten Umweltprobleme unserer Zeit. Der übermäßige Eintrag an reaktivem Stickstoff schädigt unter anderem erheblich die Biodiversität und ist auch eine bedeutende Vorläufersubstanz für Feinstaub. Nach den Messdaten der EMEP<sup>1</sup> sind in vielen Regionen Europas die Kritischen Niveaus (Critical Level) für Ammoniak überschritten. Ein besonders ausgeprägter Hotspot sind der Nordwesten Deutschlands und die Niederlande. Der Zusammenhang mit hoher Tierzahldichte ist hierbei deutlich erkennbar. Die NH<sub>3</sub>-Belastung in Luxemburg liegt zwar außerhalb dieser extrem belasteten Regionen, ist im Vergleich jedoch dennoch kritisch zu werten, wie die Auswertung in Abbildung 12 verdeutlicht.



Quelle: Prueß (2018)

Abbildung 12: Ammoniakkonzentration in der EU

Die Ammoniakemissionen in Luxemburg liegen im Jahr 2017 nach nationalem Inventarbericht IIR bei 5.440 t (AEV 2019).<sup>2</sup> Davon stammen 2.600 t (48 %) aus Wirtschaftsdüngermanagement und 2,8 t (51 %) aus dem Anbau und landwirtschaftlichen

<sup>1</sup> European Monitoring and Evaluation Programme; <https://www.emep.int/>

<sup>2</sup> <https://environnement.public.lu/fr/loft/air/inventaires-emissions/inventaire-polluants-atmospheriques.html>

Böden. Unter allen erfassten Schadstoffen ist Ammoniak der einzige, der über die vergangenen 20 Jahre kaum reduziert werden konnte. So führte laut SER<sup>1</sup> der in Kapitel 2.1.1 bereits erwähnte Anstieg der Milchviehhaltung in Luxemburg zur Überkompensation der bisherigen Minderungsmaßnahmen. Mit dem Wegfall des Quotensystems, hat sich diese Umstrukturierung noch wesentlich verstärkt. In den neusten Inventarberichten IIR und NIR wurden solche Maßnahmen zum Teil berücksichtigt, insbesondere verbesserte Berechnungen für Güllelagerung (früher nur Default value) und bodennahe Gülleausbringung (wo gegeben mit Einarbeitung). Insgesamt ist die Höhe der NH<sub>3</sub>-Emissionen hauptsächlich auf die Anzahl der in der Landwirtschaft gehaltenen Tiere zurückzuführen.

Eine Quellenanalyse der Ammoniakemissionen in Deutschland (Rösemann et al. 2019) zeigt, dass dort die NH<sub>3</sub>-Emissionen aus der Gärrestanwendung seit 2004 stetig bis 2017 auf ca. 70.000 t angestiegen ist und inzwischen etwa 10 % der NH<sub>3</sub>-Emissionen in Deutschland ausmacht. Hauptquellen bleiben die Stalltierhaltung vor der Gülleausbringung (unvergoren) und der Anwendung von Mineraldüngern (Rösemann et al. 2019, Wulf et al. 2017).

Eine Reduktion von NH<sub>3</sub>-Emissionen erfordert daher Maßnahmen für das gesamte Güllemanagement. Möglichkeiten bestehen in

- baulichen Maßnahmen in den Stallsystemen (Bodengestaltung und Reinigungssysteme, Lüftungssysteme mit Abluftreinigung, Güllekühlung),
- Güllebehandlung (Einsatz von Ureaseinhibitoren, Gülleensäuerung),
- Güllelagerung (Abdeckung),
- Gülleausbringung (sofortige Einarbeitung, kein Breitwurf).

Wulf et al. (2017) errechnen anhand solcher Maßnahmen ein Reduktionspotenzial im Bereich zwischen 25 % und 38 % der NH<sub>3</sub>-Emissionen für die Landwirtschaft in Deutschland. Es sei auch erwähnt, dass manche Maßnahmen zur Verbesserung des Tierwohls, wie Laufställe, auch zu Erhöhung des Emissionspotenzials führen.

Möglichkeiten der Reduktion von NH<sub>3</sub>-Emissionen bestehen auch beim Anbau, z.B. durch Mischanbau oder Stickstofffixierung mittels Leguminosen (Haenel et al. 2020).

### Ammoniakemissionen der Biogasproduktion

Bei der Biogasproduktion spielt Ammoniak an folgenden Punkten eine Rolle:

- 3. Anbau von Energiepflanzen:** mit der Ausbringung von Stickstoffdünger wird neben Lachgas (siehe THG-Bilanzen) auch Ammoniak diffus in die Luft emittiert. Insbesondere bei der Düngung der Energiepflanzen mit Gülle (ob als Gärrest oder unvergoren, siehe Punkt 4.) können in Abhängigkeit der Ausbringungstechnik erhebliche Anteile des Stickstoffs auf diese Weise freigesetzt werden, gehen als Dünger verloren führen jedoch zur Eutrophierung und Schädigung von Ökosystemen außerhalb der Landwirtschaftsflächen.
- 4. Emissionen der Biogasanlage selbst:** Ammoniak wird bei der anaeroben Vergärung durch den Abbau von organischen Stickstoffverbindungen gebildet. Da es stark wasserlöslich ist, verbleibt es im Gärsubstrat bzw. Gärrest. Im Biogas selbst ist es nur in sehr geringen Konzentrationen enthalten (bei Vergärung von Gülle und Bioabfall bis zu 10 mg/m<sup>3</sup>,

<sup>1</sup> Die Ammoniakberechnungen für den Sektor „Landwirtschaft“ erfolgt durch den SER.

(Adler et al. 2014)). Zu Ammoniakemissionen kann es jedoch bei der Gärrestlagerung kommen. Bei offener Lagerung liegen auch hier Verlustwerte für vergorene und unvergorene Gülle ähnlich hoch, bei gasdichten Gärrestlagern ergibt sich ein Vorteil (es wird weniger  $\text{NH}_3$  gebildet).

Technische Maßnahmen zur verminderten  $\text{NH}_3$ -Freisetzung zeigen die Versuche von ATB (2017) durch Zugabe von verschiedenen Stoffen zu Gärresten. So kann z.B. durch den handelsüblichen Phosphordünger TSP die Emission um bis zu 88 % reduziert werden. Auch weitere Mineraldünger zeigten positive Effekte (z.B. Kieserit und Bor). Mit diesen Zugaben werden im Übrigen nicht nur  $\text{NH}_3$ -Emissionen, sondern auch Methanemission bei der Lagerung reduziert.

**5. Emissionen des BHKWs:** Die Verbrennungsabgase des Gasmotors stellen eher keine relevante Quelle für Ammoniak dar, da Stickstoffverbindungen im Biogas bei der Verbrennung weitgehend zu Stickstoffoxiden ( $\text{NO}$  und  $\text{NO}_2$ ) oxidiert werden (siehe auch Kapitel 2.3.3). Diese wirken zwar ebenfalls eutrophierend und versauernd, aber die Hauptquelle für  $\text{NO}_x$ -Emissionen ist hierbei Luft-Stickstoff in der Verbrennungsluft (thermische  $\text{NO}$ -Bildung).

**6. Ausbringung der Gärreste:** der größte Teil (70 – 80 %) des Stickstoffs aus den Substraten verbleibt im Gärrest (Strippel 2019).

Der unter Punkt 1 beschriebene Aspekt gilt gleichermaßen für die Ausbringung vergorener Gülle, die Größenordnung der Verluste ist gegenüber unvergorener Gülle ähnlich, so dass hier, anders als beim Treibhauseffekt weder ein Vorteil noch ein Nachteil durch die Vergärung gegeben ist.

Da die Ammoniakfreisetzung bei höheren Temperaturen und Windgeschwindigkeiten verstärkt wird, empfiehlt ATB (2017) auf die Ausbringung von organischen Düngern bei Tageshöchsttemperaturen von über  $25^\circ\text{C}$  oder bei starkem Wind zu verzichten. Die unverzügliche Einarbeitung von flüssigen organischen Düngemitteln ist nach ATB (2017) die effektivste Möglichkeit die Ammoniakemissionen zu reduzieren.

Ob Biogasnutzung zur Veränderung der Ammoniakemissionen führt, ist somit von technischen Möglichkeiten beeinflussbar, auf der anderen Seite aber auch eine Frage des Betrachtungsraums. Unter dem Gesichtspunkt der Territorialität ist auch bei einer Erhöhung des Anbaus an Energiepflanzen nicht davon auszugehen, dass in Luxemburg neue Ackerflächen in Anspruch genommen werden (z.B. durch Umwandlung von Grünland oder anderen Flächen), das Potential einer Vermaischung der aktuellen Ackerfläche wird also, je nach gewählten Szenario zum Teil deutlich erhöht. Ein zusätzlicher Energiepflanzenanbau verdrängt andere Kulturen, erhöht damit aber nicht die Emissionen im Land. Solche Emissionen können aber dort zusätzlich entstehen, wo die verdrängten Kulturen produziert werden.<sup>1</sup>

Auch in der Praxis zeichnen sich durch die Veränderung in Richtung Energiepflanzen keine wesentlichen Einflüsse auf die Ammoniakemissionen ab. Mit der Rückführung des Gärrests wird ein Teil des Düngeraufwands zwar eingespart (in Bezug auf die Zufuhr von Mineraldünger in das Agrarsystem), die  $\text{NH}_3$ -Emissionen durch die Düngieranwendung bleiben gleich, bzw. variieren nur insofern als die organischen Gärreste ähnlich wie Gülle/Mist höhere spezifische  $\text{NH}_3$ -Faktoren aufweisen als Mineraldünger. Ein System mit Energiepflanzen für Biogas führt somit zu einer kontinuierlichen zusätzlichen  $\text{NH}_3$ -Emission. Dies trifft jedoch nicht auf die rein territoriale Betrachtung zu: Innerhalb der begrenzten Fläche von Luxemburg bleibt die Agrarproduktion und damit die  $\text{NH}_3$ -Emission gleich, da nur

---

<sup>1</sup> Im Kontext der Treibhausgasbilanzen wird dieses Phänomen mit dem Begriff *indirekte Landnutzungsänderung* (iLUC) beschrieben (siehe auch Kapitel 2.2.2).

die Nutzung der Anbauprodukte geändert wird. Die zusätzliche Produktion und damit die zusätzlichen Emissionen finden eben woanders statt.

Die Sachlage ist anders beim Einsatz von Gülle und Mist. Diese fallen unabhängig von der Existenz von Biogasanlagen an und werden ebenso unabhängig davon als Dünger auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht. Zu beachten ist dabei, dass während der Vergärung organische Substanz abgebaut wird (speziell Eiweißverbindungen), was zur Mineralisierung von organisch gebundenem Stickstoff, d. h. zu einem relativen Anstieg des Ammoniumgehalts im Substrat führt und damit auch zu einer potenziell höheren Ammoniakausgasung, gleichzeitig erfolgt aber auch ein absoluter Verlust gegenüber dem Ausgangs-N in der Gülle von ca. 10 %, wie Reinhold, Zorn (2015) zeigen. Aus deren Versuchen geht auch hervor, dass der Stickstoff in vergorener Gülle höhere Düngewirkung zeigt als unvergorene Gülle. In Summe heben sich die Effekte in etwa auf. Es ist davon auszugehen, dass die Kenntnis hierüber künftig bei der Entwicklung und Umsetzung emissionsmindernder Maßnahmen einfließen wird.

Entscheidend für die Minderung an  $\text{NH}_3$ -Emissionen bei der Lagerung ist dabei, dass diese stets abgedeckt sind: ggf. ein Vorlager vor Fermenter, gasdichtes Lager bzw. Schwimmdecke bei vergorener Gülle.

Die Verwendung von Bioabfall als Substrat und die Nutzung des Gärrests führt wie beim Gärrest aus Energiepflanzen zu einem zusätzlichen Dünger. Die  $\text{NH}_3$ -Emissionen, die mit seinem Einsatz als organischer Dünger verbunden sind, liegen wie bei Gülle höher als bei dem durch ihn verdrängten Mineraldünger. Sie stellen jedoch durch die Substitution von Mineraldünger keine wesentliche Veränderung von N-Eintrag und Austrag dar, unter der Voraussetzung, dass ein effektives Stickstoffmanagement umgesetzt wird. Ein solches wird in der Tat bei vermehrtem Einsatz von Gärresten unabdingbar, gerade angesichts bereits beobachtbaren Überdüngungseffekten mit Nitratbelastungen im Grundwasser (siehe hierzu Kapitel 2.3.4). In diesem Zusammenhang sei auch erwähnt, dass der Einsatz von mineralischen Düngemitteln mit 105 kg N pro ha landwirtschaftliche Nutzfläche<sup>1</sup> in Luxemburg, ähnlich wie in Deutschland ist, jedoch über dem europäischen Durchschnitt liegt. Spielraum für eine Substitution durch organische Dünger besteht somit.

### Regelungslage in Luxemburg

In Luxemburg wird per Regelung durch das Umweltamt AEV seit 2019 eine Betriebsgenehmigung für Biogasanlagen an die Abdeckung des Gärrestlagers gebunden. Diese soll anlehnend an VDI 3475 Blatt 4 erfolgen.<sup>2</sup> Die Abdeckpflicht gilt nicht für **Bestandsanlagen** unter folgenden Bedingungen:

- Die durchschnittliche hydraulische Verweilzeit im Fermenter und im Nachgärer beträgt mindestens 110 Tage
- Beträgt die durchschnittliche hydraulische Verweilzeit im Fermenter und im Nachgärer weniger als 110 Tage, ist eine Gesamtverweilzeit von min. 150 Tagen im gasdichten und an die Gasverwertung an geschlossenem System vorzusehen.

<sup>1</sup> STATEC, 2019

<sup>2</sup> Emissionsminderung - Biogasanlagen in der Landwirtschaft - Vergärung von Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger; <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3475-blatt-4-emissionsminderung-biogasanlagen-in-der-landwirtschaft-vergaerung-von-energiepflanzen-und-wirtschaftsduenger>

- Wird ein Nachweis eines Restgaspotenzials von unter 1,5 % erbracht, kann auf die Einhaltung der genannten hydraulischen Verweilzeiten kann verzichtet werden

Bei **Neuanlagen** sind Endlager immer gasdicht abzudecken und eine Verweilzeit von 150 Tagen im gesamten gasdichten System ist einzuhalten (Fermenter+Nachgärer+Endlager).<sup>1</sup> Zusätzlich muss, bei jedem offenen Endlager, der Gärrest von einer Schwimmdecke überdeckt sein, auch nach einer Verweilzeit von 150 Tagen im gasdichten System.

Seitens der Autoren sollten die nach VDI 3475 Blatt 4 vorgegebenen 150 Tage im gasdichten Zustand grundsätzlich nicht unterschritten werden. Die Umsetzung ist, was die flüssige Phase betrifft, unproblematisch. Für die feste Phase wären Abweichungen davon eventuell denkbar, wenn die Restgaspotenzialuntersuchungen geringe Werte zeigen. Dazu müssten der gesamte Gärrest und die separierten Phasen beprobt werden.

**Ansätze zur Quantifizierung**

Eine Quantifizierung der Ammoniakemissionen aus dem Gesamtkomplex Biogasnutzung unter Betrachtung verschiedener substratbezogener und technischer Optionen sehr schwierig. Es liegen nur wenige systematische Messuntersuchungen vor, wie z.B. ATB (2017). Faustwerte wurden für die Berechnungsgrundlage BioEm entwickelt (Fehrenbach et al. 2016) und sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Sie weisen für die Erzeugung von Biogas aus Gülle/Mistvergärung bei offenem Gärrestlager mit 76 g NH<sub>3</sub> pro MJ Biogas sehr hohe spezifische Werte auf. Bei geschlossenen Systemen tendieren die Werte gegen Null. Zu Emissionsfaktoren der Ausbringung der Gärreste liegen noch weniger Datengrundlagen vor. Ausgehend von N-Gehalten im Bereich von 4 % bezogen auf die Trockenmasse (ATB 2017) und einem pauschalen NH<sub>3</sub>-Emissionsfaktor von 22 % bei organischen Düngern ergeben sich ca. 9 g NH<sub>3</sub> /kg Gärrest (Trockenmasse), wobei etwa 0,2 kg Gärrest pro MJ Biogas anfallen. Daraus würde ein Emissionsfaktor von etwa 1,8 g NH<sub>3</sub>/MJ durch die Ausbringung resultieren, der in Abhängigkeit der Einarbeitungsgeschwindigkeit entsprechend geringerer ausfallen würde.

Nach Flessa et a. (2014) lassen sich Ammoniakemissionen bei der Ausbringung von Gülle durch verschiedene Techniken z.T. deutlich reduzieren. So werden bei sofortiger Einarbeitung innerhalb einer Stunde auf unbewachsener Fläche mit dem Pflug über 90 % Reduktion gegenüber einer gegenüber oberflächlichen Breitverteilung von Gülle (Prallteller) ohne Einarbeitung erzielt. Ähnlich hohe Minderung erreicht man mit Injektion (closed slot injection).

Tabelle 4: NH<sub>3</sub>-Emissionsfaktoren für verschiedene Varianten der Biogasproduktion; Emission aus Anbau sowie aus offenen Gärrestlagern

Emission aus	g NH <sub>3</sub> / MJ Biogas
Anbau Mais	0,05
GPS-Gärrestlager (Mais)	0,25
Gülle-Gärrestlager	76
Bioabfall-Gärrestlager	1,0

Quelle: BioEm-Tool erstellt von Fehrenbach et al. (2016)

<sup>1</sup> Ab dem Jahr 2027 wird es in Luxemburg eine Abdeckpflicht geben für alle, neue sowie alte Gärrestlager.

Eine Anwendung auf die drei Szenarien macht nur in begrenztem Umfang Sinn, da die Emissionsfaktoren zu ungenau sind. Entscheidend ist letztlich dabei, dass die Umsetzung der vorgeschriebenen Geschlossenheit der Gärrestlager erfolgt. Dies wäre der entscheidende Einflussfaktor auf die Höhe der Emissionen. Dadurch sollte auch die Realisierung des „ambitionierten“ Szenarios mit einer geringen Erhöhung der  $\text{NH}_3$ -Emissionen möglich sein. Sicherheit hierüber wird jedoch nur ein genaues Monitoring geben.

Eine weitere Problematik kann für Luxemburg der Import von Tierexkrementen durch Biogasanlagenbetreiber darstellen. Derzeit erfolgt bereits ein Import von u.a. Hühnertrockenkot und Hähnchenmist. Laut SER belaufen sich diese Mengen auf etwa jährlich 13.000 t Wirtschaftsdünger insgesamt, davon ca. 9.500 t Hühnertrockenkot und Hähnchenmist. Diese Substrate werden zur Substitution von Energiepflanzen in den Anlagen und zur wirtschaftlichen Optimierung eingesetzt. Die Problematik besteht in dem zusätzlichen Import von Stickstoff und der damit verbundenen Erhöhung von  $\text{NH}_3$ -Emissionen in Luxemburg. Anreize für solche Importe sollten daher keinesfalls zusätzlich durch Anrechnungen auf den Güllebonus erfolgen. Dies wäre jedoch rechtlich zu klären.

### 2.3.3 Sonstige Emissionen

Die Biogas-Produktionskette enthält grundsätzlich und je nach Ausgestaltung auch weitere Quellen an Luftschadstoffen. So wären mit einem Ausbau an Energiepflanzen die üblichen landwirtschaftlichen Emissionen (v.a. Staub, Dieselabgase) verbunden. Diese fallen nicht notwendigerweise zusätzlich (in Luxemburg) an, da bei einer weitgehend konstanten Agrarfläche eine Verlagerung zwischen Lebens- oder Futtermittel auf die Energiepflanzen erfolgen würden. Spezifisch höhere Emissionen durch Energiepflanzen anstelle von Lebens- oder Futtermittel (z.B. Silagemais für Biogas anstelle von Silagemais für Tierfütterung, aber anstelle von Getreide oder Raps) sind nicht zu erwarten. Aufgrund des internationalen Handels von Agrargütern kann analog zum oben erwähnten Prinzip der indirekten Landnutzungsänderung durch den nationalen Biogasausbau zusätzliche Emissionen in anderen Ländern induziert werden.

Durch die verstärkte Vergärung von Gülle sind neben den bereits erörterten Treibhausgasen und Ammoniak ebenfalls keine wesentlichen weiteren Emissionen zu erwarten. Wobei zu beachten ist, dass – wie eingangs Kapitel 2.3.2 erwähnt – Ammoniak eine bedeutende Vorläufersubstanz für Feinstaub ist. Dies sollte mit Blick auf die Feinstaubobergrenze gemäß NEC Richtlinie für 2030 nicht außer Acht gelassen werden.

Effektiv zusätzliche Emissionen werden durch die bereits oben erwähnten Gasmotoren zur energetischen Umwandlung von Biogas in Strom und Wärme verursacht. Die stellen für die unmittelbare Umgebung durchaus eine Emissionsquelle dar. Neben den „klassischen“ Verbrennungsabgasen, wie Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ), Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) oder Feinstaub, treten auf für Biogasmotoren typische Schadstoffe auf wie Formaldehyd oder Siloxane. Für den Betrieb solcher Anlagen gelten jedoch Grenzwerte, die überwacht werden, weswegen erhebliche Belastungen ausgeschlossen werden können.<sup>1</sup>

Zu bedenken wäre gegebenenfalls eine Zunahme von Transportprozessen, sofern der Ausbau an (größeren) Biogasanlagen in eher zentraler Weise erfolgen sollte. Dann wären Transporte zu den Anlagen und für die Gärreste weg von den Anlagen erforderlich. Für Gülle

<sup>1</sup> -Règlement grand-ducal modifié du 27 février 2010 concernant les installations à gaz.

Règlement grand-ducal du 24 avril 2018 relatif à la limitation des émissions de certains polluants dans l'atmosphère en provenance des installations de combustion moyennes

dürften sich die Entfernungen aus wirtschaftlichen Gründen im Rahmen halten. Insofern nicht Logistikkonzepte für größere Entfernungen sprechen (z.B. ansonsten Leerfahrten) oder gute Preise für die von extern angenommener Gülle zur Vergärung und die Gärrestlagerung erlöst werden können, dürften sich die Transportentfernungen auf rd. 15 km beschränken.

In ähnlicher Weise gilt dies auch für den Bereich Bioabfall. Größere, stadtnah gelegene Anlagen würden hier jedoch nur überschaubare zusätzliche Transportvorgänge hervorrufen, die im Zuge einer ressourceneffizienten Abfallwirtschaft unumgänglich wären.

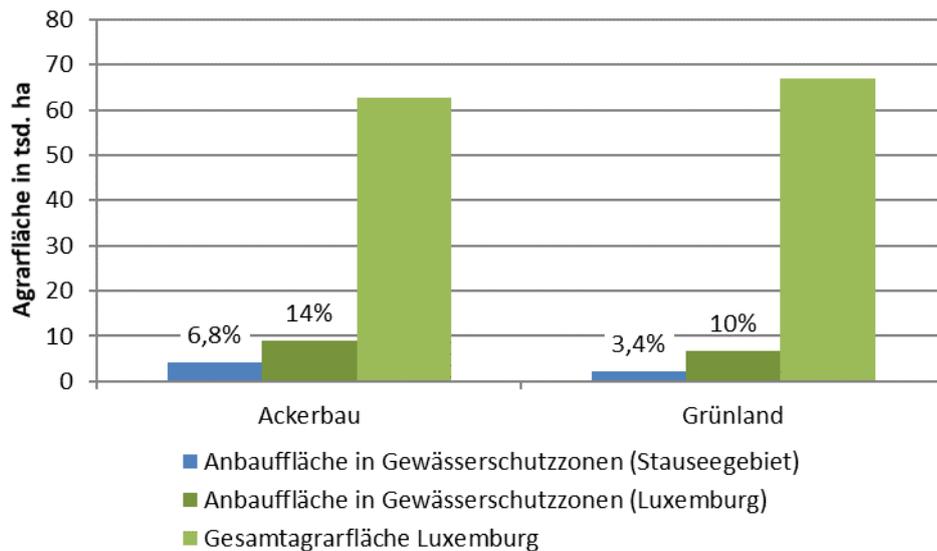
#### 2.3.4 Gewässerschutz

Bei einem Ausbau des Biogasbereichs in Luxemburg können potenziell auch Risiken für den Gewässerschutz auftreten. Dies betrifft neben den Trinkwasserschutzgebieten auch den allgemeinen Schutz von Grund- und Oberflächengewässern. Ein Übermaß des Eintrags durch jegliche Art von N-Düngemitteln (Gülle, Gärreste wie auch Mineraldünger) gilt als Hauptursache von übermäßigen Belastungen mit Nitrat im Grundwasser, sowie in Oberflächengewässern (AGE 2020). Das räumliche Auftreten der Nitratbelastungen ebenso wie die NH<sub>3</sub>-Immissionsbelastungen korrelieren weitgehend mit den Düngemiteleinträgen. Gärreste tragen hierzu auch ihren Beitrag bei, auch wenn dieser Beitrag im Vergleich eher klein ausfällt.

#### **Welche Faktoren spielen eine Rolle, um negative Auswirkungen durch den Ausbau der Biogasproduktion in Luxemburg auf das Schutzgut Wasser zu vermeiden?**

Letztlich ist es eine Frage des Umgangs mit und der **Begrenzung von Düngemiteleininsatz**, sowie eine Sicherstellung des Schutzes von wichtigen Trinkwassergewinnungsgebieten. In Luxemburg liegen 9.000 ha Ackerfläche und 6.850 ha Grünlandfläche in Trinkwasserschutzgebieten. Das sind 12 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche.

Ein Teil davon liegt in der Stauseeregion sowie rund 80 Gebiete um Grundwasserfassungen. Wie in Abbildung 13 gezeigt wird, liegen knapp 7 % der Ackerfläche und 2,4 % der Grünfläche Luxemburgs in Schutzzonen der Stauseeregion. Dort gelten neben den generellen gesetzlichen Begrenzungen des Düngemiteleinsetzes weitergehende Beschränkungen, wie z.B. der Grenzwert von maximal 130 kg organischen Stickstoff pro Hektar und Jahr. Neben der Stauseeregion ist das Ausbringen von Dünger in allen weiteren Grundwasserschutzgebiete ebenfalls stark eingeschränkt. Die Grundwasserschutzzonen liegen aktuell auf 22 % der Ackerflächen (rund 45 km<sup>2</sup>) und 21% der Grünflächen (rund 43 km<sup>2</sup>). Es sind weitere Ausweisungen zu erwarten, sodass die Flächen auf denen strenge Düngeausbringungsbeschränkungen bestehen, weiter zunehmen werden.



Darstellung ifeu, Daten: MAVDR (2019)

Abbildung 13: Agrarflächen in Luxemburg mit Anteil in Gewässerschutzzonen (insgesamt sowie in der Stauseeregion)

Was konkret das Aufbringen von Gärresten betrifft, muss nach Luxemburgischem Recht schon seit 2000 der Stickstoffeintrag durch die Co-Substrate **in der Düngplanung berücksichtigt** werden.<sup>1</sup> Während z.B. in Deutschland bis zur Novellierung der Düngeverordnung der Stickstoffeintrag durch Gärreste (ohne den Anteil aus Gülle und Mist) zusätzlich zur Obergrenze von 170 kg N<sub>org</sub>/ha erlaubt war, gilt diese Grenze in Luxemburg über alle Düngeeinträge hinweg.

Für den **Neubau von Biogasanlagen** in der Schutzzone III gilt die Auflage, dass nur „matières premières d’origine agricole“ (Rohstoffe landwirtschaftlichen Ursprungs) genutzt werden darf.<sup>2</sup> Der Einsatz von Abfällen wäre in diesen Anlagen somit verboten. Gülle und Mist gelten dann als Abfall, wenn sie nicht aus den Betrieben vor Ort stammen.

Was den Einsatz von Gärresten betrifft, muss somit Sorge getragen werden, dass in diesen Regionen keine zusätzliche Düngung durch den Ausbau von Biogasnutzung erfolgt. Angesichts der Verhältnisse zwischen Aufkommen und den insgesamt verfügbaren Agrarflächen außerhalb von Gewässerschutzgebieten sollte ein grundwasserverträglicher Einsatz von Gärresten im Rahmen der in Kapitel 2.1 beschriebenen Potenziale bzw. der Szenarien zum Ausbau der Biogasnutzung möglich sein. Sind auf der einen Seite rechtliche Grenzen für den übermäßigen Einsatz von Stickstoff gerade für Gärreste aus Biogasanlagen gesetzt, so ist auf der anderen Seite zu betonen, dass die Ausbringung von Gärresten aufgrund der **verbesserten Düngewirkung** (NH<sub>4</sub>) zu einer Reduzierung der N-Auswaschung führt (Tsachidou et al. 2019). Dadurch reduzieren sich die Risiken für potenzielle Grundwasserbelastungen (Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 2.3.2).

Für Oberflächengewässer, insbesondere Seen, sind oft stärker die **Phosphoreinträge** kritischer als die Stickstoffeinträge—Statistisch lag der betrieblich bilanzierte

<sup>1</sup> Règlement grand-ducal du 24 novembre 2000 concernant l'utilisation de fertilisants azotés dans l'agriculture

<sup>2</sup> Règlement grand-ducal du 9 juillet 2013 relatif aux mesures administratives dans l'ensemble des zones de protection pour les masses d'eau souterraines ou parties de masses d'eau souterraines servant de ressource à la production destinée à la consommation humaine

Phosphorüberschuss in Luxemburg im Jahr 2015 bei 5 kg P/ha. Auch wenn die P-Frachten im Oberflächengewässer zum Teil aus Einleitungen von Abwasserkanälen stammen, sind sie auch ein Indikator für eine nicht immer standortgerechte Düngung und eine Einwaschung durch Erosion. Hier steht wiederum der für große Teile der Trinkwasserversorgung wichtige Obersauerstausee im Fokus. Untersuchungen zeigen zwar, dass die Belastungen gering und eher rückläufig sind.<sup>1</sup> Der Einsatz von Gülle zur Düngung (vorrangig wegen Stickstoff) führt jedoch immer auch zu Einträgen von Phosphor, die nicht unbedingt dem Bedarf der Kulturpflanzen entsprechen. Durch Erosion gelangen so übermäßig ausgebrachtes Phosphate in Oberflächengewässer. Die im Stauseegebiet aktive Landwirtschaftliche Kooperation LAKU plant ein Projekt, um Gülle in einer Biogasanlage zu vergären und die Gärreste anschließend so aufzubereiten, dass Phosphor in einer festen Phase separiert wird und als Dünger in andere Regionen exportiert werden kann.<sup>2</sup>

### 2.3.5 Umverteilung von Nährstoffen

In wieweit führt die Biogasproduktion zu einer Umverteilung von Stickstoff oder Phosphor? Die Sachverhalte hinter der Verteilung von Nährstoffen sind insgesamt sehr komplex. In Abbildung 14 wird dies in sehr stark vereinfachter Form skizziert. Unterstellt wird hier eine Biogasproduktion in etwa auf der Basis der Mengenverhältnisse der Potenziale in Luxemburg gemäß Kapitel 2.2.2. Die im Gärrest konzentrierten Nährstoffe werden dem Pflanzenbau wieder zur Verfügung gestellt und gelangen über pflanzliche Nahrungsmittel direkt, über die Tierproduktion und tierische Nahrungsmittel indirekt zum Konsumenten. Über Gülle/Mist aus der Tierproduktion wird ein Teil der Nährstoffe wieder in den Kreislauf mit der Biogasproduktion gelenkt. Eine zentrale Senke für Nährstoffe (v.a. für Phosphor) stellt der Abwasserpfad dar und dort schließlich der Klärschlamm, der entweder dem Kreislauf entzogen wird (Verbrennung ohne P-Rückgewinnung) oder ebenso rückgeführt wird (landwirtschaftliche Nutzung).

Ohne Biogasnutzung würden die Kreisläufe bezüglich Gülle und Mist in gleicher Weise verlaufen, nur ohne Vergärung und bei Stickstoff mit den entsprechenden Verlusten (durch Abbau im Fermenter). Wie schon in Kapitel 2.3.2. angeführt, können bei landwirtschaftlichen BGA die Nährstoffe des eigenen Energiepflanzenanbaus im Kreislauf gefahren werden. Bei Bioabfällen hingegen kommt es zu einem Nährstoff-Import. Während die Vergärung von Energiepflanzen sozusagen eine „Abkürzung“ des Nährstoffpfads über die Nahrungsmittel- und Tierproduktion bedeutet, erweitert die Güllevergärung den Kreislauf.

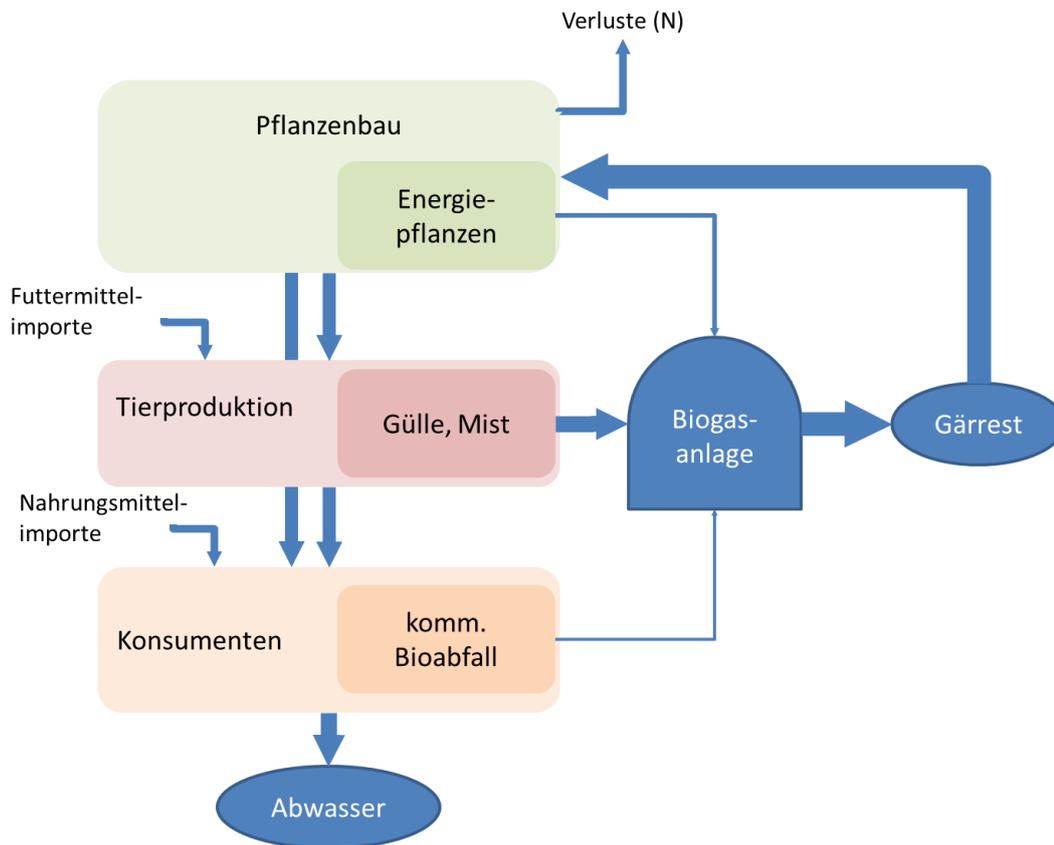
Wie bereits auch im Kapitel 2.3.2 zu Ammoniakemissionen und dem Verbleib von Stickstoff über die Gärreste erörtert wurde, ist zur Frage der Düngerqualität von Gärresten hier anzuführen, dass die Nährstoffe in der Regel besser pflanzenverfügbar sind und gezielte Anwendung als Ersatz für Mineraldünger finden können. Auch ist der Gärrest im Vergleich zu Gülle weniger geruchsintensiv und weniger aggressiv.<sup>3</sup> Hierauf muss im Zweifel beim Düngemanagement geachtet werden, denn effektiv benötigt man weniger N aus Gärresten als aus dem mit höheren Verlusten behafteten N aus der unvergorenen Gülle. Ob die Unterschiede so deutlich ins Gewicht fallen, müsste noch genauer untersucht werden.

<sup>1</sup> <http://www.naturpark-sure.lu/de/publication/10-1-der-naehrstoff-phosphor-im-boden-entwicklungen-und-handlungsempfehlungen/>

<sup>2</sup> <http://www.naturpark-sure.lu/wp-content/uploads/2019/09/9.5-Separationstechnik-kann-G%C3%BClle-%C3%9Cberschussproblem-l%C3%B6sen.pdf>

<sup>3</sup> <https://biogas.fnr.de/gewinnung/gaerprodukte/>

Durch den Ausbau der Biogasproduktion für Gülle und Mist kommt auch die Möglichkeit der Gärrestseparierung ins Spiel. Diese ermöglicht durch Separierung von N und P in eine effizientere Düngung. Mit der einer P-reichen Feststofffraktion und einer N-reichen Flüssigfraktion lassen sich Nährstoffbedarf der Kulturpflanzen jeweils gezielt decken. Dadurch lassen sich insbesondere P-Überschüsse in Böden vermeiden.



Eigene Darstellung ifeu

Abbildung 14: Stark vereinfachtes Schema zur Verteilung von Nährstoffen in einem System mit Biogasproduktion und Gärrestnutzung; Pfeildicke deutet die Mengenverhältnisse an

### 2.3.6 Potenzial anderer stoffliche Belastungen

Neben den Nährstoffen können Gärreste in dem Maße, wie die eingesetzten Substrate Belastungen an problematischen Stoffen mit sich führen, ebenso Belastungen enthalten. Dies können sein:

- Pestizide bei Energiepflanzen (z.T. auch im Straßenbegleitgrün)
- Tierarzneimittel und Krankheitserreger in Gülle und Mist
- Unkrautsamen bei z.B. Landschaftspflegematerial
- Schwermetalle und persistente organische Schadstoffe (z.B. PAK<sup>1</sup>)

<sup>1</sup> Polyaromatische Kohlenwasserstoffe

- in Abfällen verschiedener Art (beispielsweise industrielle Substrate oder Landschaftspflegematerial aus speziellen Bereichen wie Straßenbegleitgrün)
- z.T. auch Schwermetalle (v.a. Kupfer im Futtermittel für Schweine)

Der Gärprozess bewirkt diesbezüglich zweierlei:

1. Durch den Organikabbau werden manche der enthaltenen stofflichen Belastungen aufkonzentriert,
2. Manche Belastungen durch Krankheitserreger und Unkrautsamen werden abgetötet und damit reduziert.

BiWas die Hygienisierung betrifft, ist anzumerken, dass ein Abtöten aller Krankheitserreger entweder ausreichend hohe Temperaturen (thermophil, 50 - 57°C) erfordert oder bei mittleren Temperaturen (mesophil, 37 - 42°C) lange Fermentationszeit.

Unsicherheiten bestehen bei der Einschätzung von Risiken durch den Eintrag von Antibiotika und andere Veterinärpharmaka und dabei auch beim Vermischen von Rinder-, Schweinegülle oder Geflügelkot in Fermentern, was die Möglichkeit der Förderung von Kreuzresistenzen betrifft (UBA 2016). Es ist beachten, dass durch den Organikabbau eine Anreicherung der Inhaltsstoffe erfolgen kann. Die eingetragenen Frachten erhöhen sich jedoch nicht.

### 2.3.7 Zusammenfassung der Umweltwirkungen der Nutzung von Biogas

Bei der umweltseitigen Bewertung der Nutzung von Biogas muss zwischen den Substratgruppen Energiepflanzen (NawaRo), Wirtschaftsdünger (Gülle, Mist) und andere biogene Abfälle/Reststoffe differenziert werden.

Die Nutzung der Biogaspotenziale an **Wirtschaftsdünger** kann anhand verschiedener ökologischer Kriterien bewertet werden. Sie können gegenüber den anderen Substratgruppen in höherem Maße zum Einsparpotenzial an **Treibhausgasemissionen** beitragen. Dieses wird bei einem konservativen Ansatz (d.h. 25 % der in Luxemburg produzierten Wirtschaftsdüngers wird vergoren) die gegenwärtige Einsparung durch den Anlagenbestand verdoppeln. Eine ambitionierte Umsetzung (d.h. 50 % des Wirtschaftsdüngers) ermöglicht eine weitere Verdopplung der Einsparung auf etwa 200.000 t CO<sub>2</sub>-Äq., was einer 2,0 % Minderung der Gesamtemission des Großherzogtums Luxemburg entspricht. Der Hauptbeitrag beruht dabei auf der Vermeidung von Methanemissionen (CH<sub>4</sub>) durch die Biogaserzeugung und -nutzung sowie des Weiteren der Vermeidung von CH<sub>4</sub>- und Lachgas (N<sub>2</sub>O) Emissionen aus dem Güllemanagement durch die gasdichte Lagerung von Gülle und Festmist.

Betrachtet man nur die Emissionen, die nach der Methodik der nationalen Berichterstattung zur Klimaschutzkonvention (NIR) dem Landwirtschaftssektor zuzurechnen sind, so führt der konservativ Ansatz zu 5,5 % Minderung der Emissionen dieses Sektors. Mit dem ambitionierten Ansatz würde die Minderung 11 % erreichen.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass für den ambitionierten Ansatz bei einem Massenverhältnis 70 % Wirtschaftsdünger eine Anbaufläche von 9.400 ha für die Energiepflanzen benötigt würden. Dies liegt über dem durch das NREAP gesetzten Grenze

von max. 6,7% der Ackerfläche Luxemburgs für die Produktion von Biogas.<sup>1</sup> Bei einem Massenanteil von 90 % Wirtschaftsdünger reduziert sich der Flächenbedarf auf 1.500 ha, was nur leicht über den aktuell genutzten Flächen für im Biogasbereich erzeugten Energiepflanzen in Luxemburg liegt.

Durch die Vergärung von Gülle lassen sich auch **Ammoniakemissionen** v.a. bei gasdichter Lagerung reduzieren. Was Emissionen der Ausbringung des Gärrests betrifft, gleichen sich tendenziell höhere spezifische Emissionen durch verbesserte Viskosität und verbesserte Düngewirkung in etwa aus. Emissionsreduktionen sind hier v.a. durch Einarbeitungsmaßnahmen zu erzielen.

Die Einsparpotenziale durch Vergärung von **Bioabfällen** und Grünschnitt sind zwar deutlich geringer, doch stehen deren Nutzung zur Biogaserzeugung keine ökologisch sinnvoller Alternativen entgegen. Eine Kompostierung erfordert Energieverbrauch ohne Energiegewinn. **Grünlandaufwuchs** wäre in ähnlicher Weise zu bewerten, vorausgesetzt, das Material findet definitiv keine Verwendung als Tierfutter und das Grünland würde mangels Nutzbarkeit des Schnitts als ökologisch wertvoller Lebensraum verloren gehen.

Biogas aus **Energiepflanzen** hat gegenüber den reststoffbasierten Biomassen einen grundsätzlich geringeren Einspareffekt, weil der Aufwand des Anbaus einzubeziehen ist. Durch die Nutzungskonkurrenz um die Anbaufläche (mit dem Risiko indirekter Landnutzungsänderung) stellt sich eine positive Klimabilanz für Bioenergie aus Anbaubiomasse grundsätzlich in Frage. Das theoretisch große Potenzial zur Ausweitung (derzeit werden um die 1 % der Luxemburgische Agrarfläche für Energiepflanzen zur Biogasnutzung belegt) ist unter Nachhaltigkeitskriterien daher sehr eingeschränkt. Der großflächige Anbau mit Monokulturcharakter, wie er sich in manchen Regionen in Deutschland im Zuge der Ausweitung der Biogasproduktion entwickelt hat, ist unbedingt zu vermeiden. Stattdessen sind angepasste Konzepte mit Mischkulturen und Zwischenfrüchten, aus denen Substrate für Biogas gewonnen werden können, als positiv zu werten. Anwendung findet die Substratvergärung beispielsweise auch im ökologischen Landbau mit dem Hauptziel organische N-Düngemittel zu generieren, die Energieerzeugung ist ein Nebennutzen.

---

<sup>1</sup> 6,7 % entsprechen einem Drittel der 20 %, die nach NREAP für den Anbau von Energiepflanzen insgesamt verwendet werden dürfen, inkl. Je einem Drittel für feste und flüssige biogene Energieträger

## 2.4 Empfehlungen für die Rahmensetzung

Aus der vorangehenden Analyse und zusätzlichen technisch-wirtschaftlichen Erwägungen ergeben sich Eckpunkte, wonach Anforderungen an die technische Ausgestaltung einer künftigen Erzeugung und Nutzung von Biogas zu formulieren wären. Vorschläge für diese Eckpunkte werden in den nachfolgenden Kapiteln qualitativ erläutert.

### 2.4.1 Substratwahl

Grundsätzlich ist für die Nutzung von Gülle und Mist, Bioabfall sowie Reststoffen aus Landwirtschaft und Landschaftspflege die Biogastechnologie mit anschließender Nutzung der Gärreste die beste Nutzungsoption zur gleichzeitigen Nährstoffkreislaufführung und Bereitstellung erneuerbarer Energie. Die Potenziale an organischen Abfällen, Gülle und Mist sind noch nicht ausgeschöpft, so dass sowohl bestehende Barrieren für die Nutzung abgebaut als auch Anreize für die Nutzung gesetzt werden sollten.

Die Entwicklung des Biogasanlagenbestandes sollte so ausgerichtet werden, dass ein sehr hoher Anteil von Gülle und Festmist sowie sämtliche kommunalen und gewerblichen Bioabfälle – vorwiegend in den bestehenden und nicht ausgelasteten Bioabfallvergärungsanlagen – separat erfasst und verarbeitet werden. Die Nutzung nachwachsender Rohstoffe sollte nur soweit ausgebaut werden, wie es die Erschließung der verfügbaren Gülle- und Festmistpotenziale erfordert, um wirtschaftlich sinnvolle und ganzjährig zu betreibende Anlagen zu ermöglichen. Der Anteil von nachwachsenden Rohstoffen sollte daher in der Regel deutlich unter 50 Masse-% des Substratmixes betragen, ohne dass es von wesentlicher Bedeutung ist, ob es sich um Maissilage, Getreide, Grassilage oder andere Kulturen handelt. Ausgehend von den möglichen Flächenpotenzialen in Kapitel 2.1.2 ist bei Erschließung der Gülle- und Festmistpotenziale ein durchschnittlicher Massenanteil nachwachsender Rohstoffe von 20 % am Substratmix nicht zu überschreiten.

#### Getrennt erfasste Bioabfälle aus den Haushalten

- Sicherstellung einer flächendeckenden Getrenntsammlung zur Erhöhung des Anschlussgrades an die Bioabfallsammlung
- Öffentlichkeitsarbeit zur Erhöhung der getrennt erfassten Bioabfallmengen als auch der Qualität der getrennt erfassten Bioabfälle (zur Reduktion von Fremdstoffen)
- Prüfung wie die Biogasanlagen, die bereits genehmigungsrechtlich und technisch in der Lage sind, dass sie Bioabfälle verarbeiten können nicht besser ausgelastet werden können.
- Wissensmanagement (z.B. Workshops für kommunale Entscheidungsträger, Gärrestverwerter und Genehmigungsbehörden) zum Abbau von Vorurteilen und zur Steigerung der Akzeptanz sowohl der Getrenntsammlung als auch der Verwertung der hochwertigen Gärreste
- Aufgrund der stark wechselnden Mengen und Qualitäten von Bioabfällen ist eine Ergänzung mit anderen Substraten für die Biogaserzeugung grundsätzlich sinnvoll, um eine hohe Auslastung der Anlage zu erreichen und einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen. Zu berücksichtigen ist dabei, dass vor der Nutzung der Gärreste als Kompost bzw. organischem Dünger die Hygienisierung der Abfälle bzw. der Gärreste sichergestellt wird. Energiepflanzen können hier zur Verbesserung der Strukturvielfalt im Substratgemisch einbezogen werden, Anlagen mit Auslegung auf überwiegenden Einsatz von Energiepflanzen sollten aber nicht gefördert werden.

- Sofern lokal kleine Bioabfallmengen anfallen kann auch der Einsatz in lokalen Biogasanlagen, die überwiegend andere Substrate einsetzen, sehr sinnvoll sein. Dies zieht besondere Anforderungen an die Technik (Störstoffabtrennung, Minimierung Kunststoffanteil, Hygienisierung) nach sich, aus ökologischer Sicht sollte dies aber auf keinen Fall durch zu enge Regelungen verhindert werden.
- Feste Gärreste (z.B. nach Abpressung) sollten aerobisiert werden, um Methanemissionen aus der Lagerung zu verhindern. Sie können zur Erzeugung von Qualitätskomposten einer Nachrotte unterzogen werden.
- Flüssige Gärreste (z.B. aus der Nassfermentation oder die Flüssigphase nach der Abpressung) sollten so lange gasdicht gelagert werden bis die Biogasproduktion soweit abgeklungen ist, dass Methanemissionen weitgehend ausgeschlossen werden können. Dies kann auf zwei Wegen erfolgen:
  - Die Methanemissionen aus den Gärreste liegen unter 1 % des Methanbildungspotenzials der Einsatzstoffe<sup>1</sup>. Dies kann durch Messung im Labor oder durch Emissionsmessungen auf der Biogasanlage nachgewiesen werden.
  - Die Biogasanlage weist eine gasdichte Verweilzeit von 150 Tagen auf<sup>2</sup>.
- Aufgrund der Tatsache, dass die Biogasausbeute in sogenannten Garagenfermentationsverfahren bzw. Batch-Feststoffvergärungsverfahren unter der Biogasausbeute in kontinuierlichen Feststoffvergärungsverfahren (z.B. Pfropfenstromfermenter) und Nassvergärungsverfahren liegt sollten letztere Batch-Feststoffvergärungsverfahren vorgezogen werden. Da das Emissionsrisiko bei Batch-Feststoffvergärungsverfahren deutlich höher ist, sollte der Aerobisierung und Methanoxidation vor Öffnung der Fermentationsboxen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

### Gewerbliche und industrielle Bioabfälle

- Da gewerbliche und industrielle Bioabfälle sowohl in Luxemburg als auch außerhalb sehr begehrt für die Biogasproduktion sind scheint hier kein Handlungsbedarf gegeben zu sein. Die Mengen sind laut Schaefer et. al (2019) weitgehend in Nutzung. Tendenziell kann sogar durch Maßnahmen der Vermeidung von Lebensmittelabfällen ein Rückgang der verfügbaren Mengen nicht ausgeschlossen werden (Schaefer et. al. 2019).

### Nachwachsende Rohstoffe

- Der Einsatz nachwachsender Rohstoffe für die Biogasproduktion kann für die Erreichung einer wirtschaftlich sinnvollen Anlagengröße sowie einer ganzjährigen Anlagenauslastung im Kontext der Erschließung von lokalen Gülle-, Festmist- und Reststoffmengen sehr sinnvoll sein.
- Nachwachsende Rohstoffe sollten nur angebaut werden, wenn kein negativer Beitrag hinsichtlich der Nachhaltigkeit der Landnutzung offensichtlich ist. Ein negativer Beitrag kann beispielsweise darin bestehen, dass die Fruchtfolge aufgrund hoher Anbaudichte von z.B. Mais oder Getreide nicht eingehalten werden kann, der Anbau zu einer lokal verstärkten Wasserzehrung führt, zu Erosion oder Humuszehrung. Positive Wirkungen können durch Anbau und Nutzung von Zwischenkulturen oder Dauerkulturen (z.B. Durchwachsene Silphie) erreicht werden. Da die Wirkung aber immer lokal im Kontext der anderweitigen

<sup>1</sup> Entsprechend Novelle der TA Luft in Deutschland.

<sup>2</sup> Forderung im EEG 2017

Landnutzung zu bewerten ist können keine allgemeingültigen Vorgaben gemacht werden. Um eine übermäßige Nutzung nachwachsender Rohstoffe zu vermeiden und gezielt klimapolitisch wertvollere Substratpotenziale zu erschließen sollte auf einen Einsatz von mehr als 50 Masse-% nachwachsender Rohstoffe verzichtet werden. Ausgehend von den möglichen Flächenpotenzialen in Kapitel 2.1.2 ist bei Erschließung der Gülle- und Festmistpotenziale ein durchschnittlicher Massenanteil nachwachsender Rohstoffe von 20 % am Substratmix nicht zu überschreiten. Dabei sollten Verarbeitungsreststoffe von Kulturpflanzen und Biomasse aus der Landschaftspflege nicht als nachwachsender Rohstoff gezählt werden.

- Auch aufgrund der Begrenztheit der Flächenpotenziale zum Anbau nachwachsender Rohstoffe (vgl. Abschnitt 2.1.2) sollten nachwachsende Rohstoffe vorwiegend mit dem Ziel der Erschließung von lokal verfügbarer Gülle-, Festmist- und Reststoffmengen nur anteilmäßig in Biogasanlagen eingesetzt werden.

### Gülle und Mist

- Für Gülle und Mist gibt es aus Sicht der Treibhausgasminderung keine bessere technische Lösung als die Nutzung in einer Biogasanlage.
- Es sollten keine Hürden aufgebaut werden, die zu einer Reduzierung der Güllemengen in Biogasanlagen führen. In Deutschland passiert dies gerade, hauptsächlich verursacht durch die nachträgliche Forderung einer Umwallung bestehender Biogasanlagen, eine Schlechterstellung von Gärresten im Vergleich zu unvergorener Gülle im Düngerecht sowie der Forderung von 150 Tagen Verweilzeit im gasdichten System im EEG 2017. Dies gilt aber vorwiegend für Biogasanlagen, in denen Gülle und Festmist mit einem Anteil von deutlich über 90 Masse-Prozent vergoren werden. In diesen Fällen ist die Umweltwirkung der Nutzung in einer Biogasanlage hinsichtlich der Reduzierung von Klimagasemissionen bei Lagerung und Ausbringung von tierischen Exkrementen Substraten in Mischung einer reinen Lagerung und Ausbringung unvergorener Exkremente vorzuziehen. Aufgrund des geringen spezifischen Anteils organischer Substanz in flüssiger Gülle erfordert eine lange Verweilzeit besonders hohe Investitionskosten. Sofern eine Forderung nach einer langen Verweilzeit auch für Gülleanlagen bestehen sollte müssten die Mehrkosten durch angepasste Investitionszulagen kompensiert werden.
- Da große, zentral anfallende Mengen in der Regel bereits in einer Biogasanlage verwendet werden, müssen Anreize vor allem auf kleinere, dezentral anfallende Mengen abzielen. Dies erfordert einen besonderen Anreiz für die aus Gülle und Mist resultierende Biogasmenge.
- Um wesentliche Güllepotenziale durch standortangepasste und möglichst kostengünstige (Economy of Scale) Anlagenkonzepte zu erschließen, ist eine Sondervergütung für den Anteil von Gülle und Mist bis zu einem max. Energieäquivalent von 100 kWh im Jahresdurchschnitt sinnvoll. Eine Ausweitung auf Bestandsanlagen ist ggf. sinnvoll.
- Im Hinblick auf die Verweilzeit im gasdichten System sollte für alle Anlagen (explizit auch Gülleanlagen mit zusätzlicher Biomasse) eine Alternative zur 150-Tageregelung möglich sein, um unnötige Kosten bei der Güllevergärung zu minimieren. Dies könnten i) der Nachweis eines maximalen Restgasemissionspotenzials (z.B. 1 %) über Messungen oder ii) eine Änderung auf 50 Tage bei 0 % sonstigen Einsatzstoffen zzgl. 1 bis 2 Tage je 1 % sonstiger Einsatzstoffe im Substratmix sein (Scholwin et al. 2019).
- Eine derartige Regelung vermeidet künstliche absolute Grenzen bei der eingesetzten Güllemenge (wie z.B. die 30%-Grenze im Güllebonus des deutschen EEG) und erfordert keine reine Gülle-Anlage. Reine Gülleanlagen weisen aufgrund

der typischerweise großen Fermenter (aufgrund des hohen Wassergehaltes von Gülle) hohe spezifische Kosten auf. Unter deutschen Bedingungen liegt eine erforderliche Strom-Vergütung für eine reine Gülleanlage mit einer Leistung von 75 kW<sub>el</sub> bei mindestens 23 ct/kWh, bei einer Leistung von 250 kW<sub>el</sub> bei mindestens 20 ct/kWh. Sofern die Leistung in einer Mischung mit nachwachsenden Rohstoffen erbracht wird, steigen die Strombereitstellungskosten sogar mit abnehmendem Gülleanteil (siehe nachfolgende Abbildungen). Bei noch größeren Anlagen sinken die Kosten für die reine Gülleanlage auf bis zu 15 ct/kWh ab, allerdings scheint es äußerst unwahrscheinlich, dass in Luxemburg eine Güllemenge von mehr als 1.500 Großvieheinheiten für eine (neue) Biogasanlage zur Verfügung gestellt werden kann.

- Eine Alternative zur Finanzierung der Anreize der Gülle- und Mistvergärung können nach dem Verursacherprinzip Maßnahmen zur Verringerung von THG-Emissionen aus der Güllelagerung und -ausbringung sein. Denkbar ist zum einen eine Verpflichtung zur Abdeckung von Güllelagern oder bei Stallneubauten sich am neusten Stand bezüglich Klima- und Luftschadstoffen zu orientieren, womit dann auch die Möglichkeit einer Errichtung einer Biogasanlage bereits bei der Planung mitberücksichtigt werden sollte. Die absoluten Zahlen müssen an die Größenklassen tierhaltender Betriebe in Luxemburg angepasst werden. Zum anderen oder in Ergänzung hierzu sind unterstützende Maßnahmen, wie z.B. Investitionszuschüsse denkbar, mit denen die Güllelagerung außerhalb des Stalles stärker gefördert wird (u.a. Stallbauförderung, Investitionszuschüsse für gemeinschaftliche Biogasanlagen) (Scholwin et al. 2019).
- Ein Fördermechanismus, welcher die THG-Einsparungen bei der Biogaserzeugung aus Gülle stärker berücksichtigt, beispielsweise über eine THG-Quote (wie bereits nach RED I im Verkehrssektor angewendet) auch bei der Strom- und Wärmebereitstellung oder einer THG-abhängigen Vergütung, könnte die Reduzierung der THG-Emissionen aus der Güllelagerung im Falle der Biogaserzeugung aus Gülle stärker und auch monetär berücksichtigen und sollte daher geprüft werden. Geeignete Standardwerte für die THG-Emissionen können der Renewable-Energy-Directive vom Herbst 2018 (RED II) entnommen werden.
- Eine Herausforderung zur Erfüllung aller Eckpunkte insgesamt stellt der Gegensatz dar zwischen
  - einerseits einer Ausweitung durch viele dezentrale Anlagen zur Erfassung möglichst vieler tierhaltender Betriebe und
  - andererseits einer notwendigen Konzentration durch größere, effizientere und infrastrukturell besser angeschlossener Anlagen.

Dies erfordert ein regionales Verständnis dafür, ab welcher Betriebsgröße und Entfernungslage sich dezentrale Kleinanlagen rechtfertigen und wo umgekehrt eine Zentralisierung – wie sie zumindest für die Erfüllung der Eckpunkte 3 und 4 geboten ist – notwendig wird. Durch Letzteres werden in einem gewissen Maß Transporte von Substraten (auch Gülle) und ebenso Transporte von Gärresten zur weiteren Verteilung der Nährstoffe anstelle eines räumlichen akkumulierten Einsatzes notwendig sein. Im idealen Fall sollten die Gärreste dort zum Einsatz kommen, wo ihr Ursprung an agrarischer Produktion liegt. In jedem Fall ist zu vermeiden, dass die agrarischen Stickstoffkreisläufe weiter aus dem Gleichgewicht geraten. Im gleichen Zuge ist auch die Vermeidung einer Akkumulation von Phosphaten geboten.

### 2.4.2 Generelle technische Anforderungen

- Emissionsarme und emissionsvermindernde Techniken sind anzuwenden: Methan-, Lachgas- und Ammoniakemissionen müssen auf das Minimum reduziert werden.
- In den Anlagen müssen hohe Energienutzungsgrade erreicht werden, was bei vor-Ort-Verstromung zwingend eine Wärmenutzung erfordert. Dies scheint durch die gültigen Anforderungen und den Wärmebonus ausreichend gezielt gefördert zu werden.
- Biomethan: Aufbereitung auf Einspeisequalität sollte wo immer infrastrukturell umsetzbar bevorzugt werden, da hierdurch eine hohe Flexibilität der Verwendung ermöglicht wird (z.B. auch als Kraftstoff). Sofern keine lokale Wärmenutzung von mehr als 50% der zur Verfügung stehenden Abwärme aus der Stromerzeugung möglich ist, die nachweislich die Nutzung fossiler Energieträger verdrängt, sollte verpflichtend eine Prüfung der Möglichkeit der Biogasaufbereitung auf Erdgasqualität durchgeführt werden. Heute sind Biogasaufbereitungstechnologien ab ca. 50 m<sup>3</sup>/h Rohbiogas (äquivalent zu etwa 100 kW elektrischer Leistung) am Markt verfügbar. Die spezifischen Kosten für solch kleine Anlagen liegen über denen größerer Anlagenleistungen, die größte finanzielle Hürde stellen hier aber die kaum leistungsabhängigen Kosten für die Realisierung des Netzzuganges dar. Dieser könnte vereinfacht realisiert werden, da das Risiko einer Fehleinspeisung bei einer kleinen Biogasmenge sehr gering ist.

### 2.4.3 Maßnahmenübersicht und Auswirkungen

In Tabelle 5 sind die im Rahmen dieses Papiers formulierten Anforderungen an die technische Ausgestaltung nochmals in Form eines Entscheidungs- und Maßnahmenkatalogs zusammengestellt.

Tabelle 5: Anforderungen an die technische Ausgestaltung zur möglichst optimalen Gestaltung von Umweltverhalten und Effizienz einer künftigen Biogasnutzung in Luxemburg

Eckpunkt	Technische Machbarkeit	Umweltwirkung	Finanzielle Wirkung
<b>flächendeckenden Getrenntsammlung Bioabfall</b>	Machbar über Rechtsrahmen  Perspektivische Abnahme von Lebensmittelabfällen ist zu berücksichtigen	Die als nachhaltig identifizierten Potenziale werden ausgeschöpft, mehr Fahrtkilometer in entlegenen Gebieten bei der Sammlung	Dies hängt von den kommunalen Tarifen ab.  Bei Andienung zusätzlicher Mengen an die bestehenden Abfallvergärungsanlagen können diese wirtschaftlicher betrieben werden
<b>Steigerung Akzeptanz Bioabfallerfassung und Gärrestverwertung</b>	Machbar mit Wissensmanagement	Die als nachhaltig identifizierten Potenziale werden ausgeschöpft	Studien, Workshops und Informationsmaterial
<b>Steigerung Bioabfallmenge und -qualität</b>	Machbar mit Öffentlichkeitsarbeit	die als nachhaltig identifizierten Potenziale werden ausgeschöpft	Regelmäßiger Aufwand an Öffentlichkeitsarbeit und Qualitätsprüfung Bioabfall; Beispiele zeigen aber höhere

			Mengen und spezifisch geringere Sammel- und Sortierkosten
<b>Festlegung Vorzüglichkeit Vergärung gegenüber Kompostierung bei Bioabfällen</b>	Problemlos machbar über Rechtsrahmen, dabei ist aber zu berücksichtigen, dass vergärbare Lebensmittelabfälle holzigen Abfällen für die Vergärung vorzuziehen sind, letztere sind eher für die Kompostierung geeignet	Ökologisch vorteilhafter Nutzungsweg wird bevorzugt	Höhere Behandlungskosten – höhere Abfallgebühren
<b>Innovative Projekte</b>	Machbar durch gezielte Projektförderung	Erschließung innovativer emissionsärmerer Nutzungswege	Einzelprojektförderung Investition und Studien, z.B. im Rahmen eines Wettbewerbes um die Förderung von Projekten mit möglichst großem nachweisbaren THG-Minderungseffekt oder eine Förderung in Abhängigkeit des erreichten THG- Minderungseffektes basierend auf RED II Berechnungsmethoden.
<b>Klare Emissions- anforderungen</b>	Machbar über Rechtsrahmen (Zulassung Alternativen 1 % Restgasemissionsnachweis oder 150 Tage gasdichte Verweilzeit)	Emissionsminderung bei neuen und ggf. auch bestehenden Anlagen	Geringe Erhöhung Bereitstellungskosten, werden meist über Mehr-Biogasertrag kompensiert
<b>Vermeidung von Hürden für Gülle- und Mistvergärung</b>	Verzicht auf Umwallung bestehender Biogasanlagen, keine Schlechterstellung von Gärresten im Vergleich zu unvergorener Gülle, keine Alternativlose Forderung von 150 Tagen Verweilzeit im gasdichten System bei Neuanlagen	Keine Reduzierung der Gülmengen in Biogasanlagen, keine zusätzlichen Emissionen	Keine Kostenerhöhungen
<b>Stallbau "Biogas ready"</b>	Empfohlen wird, dass Stallneubauten sich am neuesten Stand bezüglich Klima- und Luftschadstoffen orientieren, womit die Möglichkeit einer Errichtung einer Biogasanlage bereits bei der Planung von Ställen	Vereinfachte bauliche Einbindung einer Biogasanlage auf den Betrieb für tierische Exkrememente.  Steigerung der Biogaserträge durch Nutzung von möglichst frischen Exkrementen.	Reduzierung der Investitionskosten (Pumptechnik und Endlager) der Biogasanlage und höhere Gaserträge durch die Nutzung frischer tierischen Exkrememente.

mitberücksichtigt werden sollte.

Anpassung des Entmistungskonzeptes an eine etwaige Biogasnutzung

<b>Sondervergütung für Gülle</b>	Machbar durch Setzung Rechtsrahmen	Klarer Anreiz für Erschließung vorhandene Gülle- und Mistpotenziale	Mehrkosten für die Umlage für die Förderung
<b>Pflichtmaßnahmen zur THG-Minderung</b>	Machbar durch Setzung Rechtsrahmen	Klare Muss-Regelung für Erschließung vorhandene Gülle- und Mistpotenziale	Höhere Förderkosten in der Landwirtschaftsförderung oder steigende Preise für tierische Agrarprodukte mit der Gefahr der Verminderung der Wettbewerbsfähigkeit in Europa
<b>Emissionsarme Techniken</b>	Prüfung durch Genehmigungsbehörden -	Die Erwartung möglichst hoher Beiträge zum Klimaschutz erfordert bestmögliche Emissionsvermeidung von Methan und Lachgas.  Im gleichen Zuge müssen auch die Emissionen von Ammoniak so weit wie möglich reduziert werden.	Mehrkosten Anlageninvestition und -betrieb, besonders kritisch für Bestandsanlagen
<b>Effizienz und Auslastung</b>	Standortabhängig, für Bestandsanlagen schwer umsetzbar  Alle kleineren und mittleren Anlagen mit in der Umgebung verfügbaren Wärmeabnehmer müssen ihre Wärmenutzung optimieren.  auch bei abgelegenen kleineren Anlagen soll nach Möglichkeit eine Wärmenutzung erfolgen.  Für größere Anlagen mit vor-Ort-Verstromung muss eine maximale Wärmenutzung verbindlich sein.  Um Betreibern Potenziale zur Erhöhung der Auslastung zu zeigen	Um möglichst hohe Beiträge zum Klimaschutz zu erreichen müssen die Gesamtnutzungsgrade und die Anlagenauslastung optimiert werden	k.o.-Kriterium für Anlagen, daher sollten Gülle- und Mistanlagen ausgenommen werden  ggf. deutliche Mehrkosten, aus denen Erträge erst nach vielen Jahren zur Amortisation führen.  Jeder Betreiber muss ein eigenes Interesse an der Erhöhung der Auslastung der Anlage haben da die Wirtschaftlichkeit sich einhergehend verbessert, so dass hier externe Anreize grundsätzlich nicht erforderlich und damit kostenneutral sind.

könnte eine Sammlung von Maßnahmen und Best-Practice-Beispielen aus der Anlagenpraxis hilfreich sein.

Effizienz und Auslastung können durch Aus- und regelmäßige Weiterbildung von Anlagenfahrern verbessert werden.

<b>Biomethan</b>	Die Standortwahl sollte unter Abwägung von Anlieferstrecken für Substrate (insbesondere bei Gülle) und der verfügbaren Infrastruktur (Einspeisen ins Erdgasnetz) erfolgen.	Die Gasaufbereitung zu Biomethan bietet eine flexible und vielfältige Nutzung des Biogases, die ggf. zu einer sehr nachhaltigen Gasnutzung führt. bei hohen lokalen Wärmenutzungsgraden ökologisch nicht vorteilhaft	Spezifische Kosten für Kleinanlagen sind hoch (ca 1-2 ct/kWh Biomethan höher als bei den vorhandenen Großanlagen); wesentlicher Kostenblock ist die Einspeisestation, für die Anforderungen bei Einspeisemengen unter 150 m <sup>3</sup> /h gesenkt werden sollten.
<b>CO<sub>2</sub> Nutzung</b>	Für die zukünftige Realisierung von Power-to-Methan-Konzepten, einer kommerziellen Nutzung oder auch CCS-Konzepten stellen Biogasanlagen eine der wenigen erneuerbaren und leicht erschließbaren CO <sub>2</sub> -Quellen dar.	Die Nutzung des CO <sub>2</sub> senkt die Klimagasemissionen zusätzlich.	Bisher kaum wirtschaftliche Konzepte werden bei steigender Nachfrage und Preisen für erneuerbare Gase interessant werden. Vorerst müssten Pilotprojekte hinsichtlich der Senkung von Abgaben auf Strom für PtG-Konzepte, höhere Erlöse für das Biomethan und/oder der Investitionskosten unterstützt werden.

# 3 Vergleichende Betrachtung zum Flächenbedarf

---

In diesem Kapitel erfolgt eine vergleichende Betrachtung zum Flächenbedarf von Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen mit Freiflächen-PV sowie weiteren erneuerbaren Energieträgern.

Da gemäß dem Luxemburgischen Regierungsprogramm die Entwicklung von Freiflächen-PV (PV-FFA) auf nicht landwirtschaftlichen Freiflächen genauer betrachtet werden soll, steht hier die Frage der Flächenproduktivität im Vergleich zu Biogas bzw. Biomasse im Vordergrund.

Auf der Basis von verfügbaren Bilanzdaten die Flächenbelegung pro erzeugter kWh Strom durch Freiflächen-PV ermittelt und der Flächenbelegung durch Biogas aus Mais pro kWh Strom (über BHKW) gegenübergestellt. Die verschiedenen Aspekte des Flächenverbrauchs werden dargelegt und u.a. werden die Auswirkungen auf das Landschaftsbild sowie ökologische Auswirkungen diskutiert.

Zur weiteren Veranschaulichung wird der Vergleich auch auf der Ebene von Verkehrsleistung in einem Pkw für verschiedene alternative Antriebe durchgeführt.

## 3.1 Datengrundlagen

### 3.1.1 Flächenbelegung durch Biomethan und Strom aus Mais

Die Erträge von Silomais liegen in Luxemburg in den Jahren 2014 bis 2018 zwischen 12,3 und 16,8 t (Trockensubstanz) pro Hektar.<sup>1</sup> Im Mittel liegt der Ertrag bei 14 t (Trockensubstanz) pro Hektar.

Aus einer Tonne Silomais können bei einem mittleren Wassergehalt von 65 % zwischen 3,5 und 4 GJ Biogas erzeugt werden. Als Rechenwert wird der in der Studie von Fehrenbach et al. (2016) ermittelte Wert von 3,81 GJ Biogas angesetzt. Daraus ergeben sich 65,8 m<sup>2</sup>\*1a/GJ bzw. **237 m<sup>2</sup>\*1a/MWh Biomethan**.

---

<sup>1</sup> Berechnet anhand der Daten zur Flächennutzung und Erträgen in

[https://statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=13352&IF\\_Language=fra&MainTheme=4&FldrName=2&RFPPath=7274](https://statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=13352&IF_Language=fra&MainTheme=4&FldrName=2&RFPPath=7274) und [http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=13362&IF\\_Language=fra&MainTheme=4&FldrName=2&RFPPath=7275](http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=13362&IF_Language=fra&MainTheme=4&FldrName=2&RFPPath=7275)

Als Stromwirkungsgrad wird ein technisch hoher Wert von 37 % angesetzt, wobei eine mittlere Netto-Wärmenutzung von 18 % berücksichtigt wird. Im Ergebnis resultieren **589 m<sup>2</sup>·1a/MWh Strom**.

Tabelle 6: Daten zur Ermittlung der Flächenbelegung für die Erzeugung von Strom aus Biogas auf Basis Silomais

	Faktoren	Einheit	Quelle, Berechnungsweise
Ertrag Silage-Mais	14	t Trockensubstanz/ha	<a href="https://statistiques.public.lu">https://statistiques.public.lu</a>
	40	t Frischsubstanz/ha (65% Wassergehalt)	Fehrenbach et al. (2015)
Anbaufläche pro t Rohstoff	251	m <sup>2</sup> ·1a/t	(= Kehrwert von Ertrag Silage-Mais)
Biogasertrag (Biogasanlage)	3,81	GJ/t FM	Fehrenbach et al. (2015)
Stromwirkungsgrad (Biogas-HKW)	0,37		Fehrenbach et al. (2015)
dem Strom zurechenbarer Anteil (Berücksichtigung Wärmenutzung)	92%		Allokation nach Exergie
<b>Ergebnis Biomethan</b>	<b>65,8</b>	m <sup>2</sup> ·1a/GJ Biomethan	(= Anbaufläche/Biogasertrag)
	<b>237</b>	m <sup>2</sup> ·1a/MWh Biomethan	
<b>Ergebnis Strom aus Biomethan</b>	<b>164</b>	m <sup>2</sup> ·1a/GJ Strom	(= Anbaufläche/Biogasertrag/ Stromwirkungsgrad x anrechenbaren Anteil)
	<b>589</b>	m <sup>2</sup> ·1a/MWh Strom	

### 3.1.2 Flächenbelegung durch Freiland-PV-Anlagen

Nach Daten von BMVI (2015) ist für Strom aus PV-Freiflächenanlagen von einem durchschnittlichen Flächenbedarf von **22 m<sup>2</sup>/MWh Strom** auszugehen. Davon sind etwa 3 % durch Fundamente versiegelt, etwa ein Drittel der Fläche ist überschirmt, die restliche Fläche stellen Zwischenräume dar.

Tabelle 7: Flächenbelegung und Anteile an Flächenarten für PV-FFA bezogen auf 1 kWh Strom

	Anteil an Anlagenfläche	Faktoren	Einheit
<b>Gesamtfläche für PV-FFA</b>		22	m <sup>2</sup> ·1a /MWh
<b>Versiegelung</b>	3%	0,66	m <sup>2</sup> ·1a /MWh
<b>überschirmte Fläche</b>	32 %	7,0	m <sup>2</sup> ·1a /MWh
<b>Zwischenraumfläche</b>	65 %	14	m <sup>2</sup> ·1a /MWh

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von BMVI (2015), Günnewig et al. (2007), Bosch&Partner / ZSW (2016)

### 3.1.3 Flächenbelegung durch Rapsmethylester (Biodiesel)

Raps wird in Luxemburg auf etwa 4.000 ha angebaut, mit Erträgen zwischen 3,1 und 3,8 t pro Hektar.<sup>1</sup> Eine Biodieselproduktion findet in Luxemburg nicht statt. Die Faktoren zur Umwandlung von Rapssaat in Rapsmethylester (RME) gelten jedoch unabhängig vom Ort der Produktion.

Nach den Rechenwerten von Fehrenbach et al. (2015) wird aus 1 Tonne Rapssaat etwa 410 kg Rapsmethylester erzeugt, das entspricht bei einem Heizwert von 37,2 MJ/kg RME einem Kraftstoffenergieinhalt von 15.300 MJ. Ausgehend einem mittleren Flächenertrag von 3,4 t Rapssaat pro Hektar beträgt die Flächenbelegung damit 115 m<sup>2</sup>\*1a/GJ bzw. **415 m<sup>2</sup>\*1a/MWh Biodiesel.**

Tabelle 8: Daten zur Ermittlung der Flächenbelegung für die Erzeugung von Rapsmethylester (RME)

	Faktoren	Einheit	Quelle, Berechnungsweise
Ertrag Rapssaat (Colza)	3,4	t/ha	<a href="https://statistiques.public.lu">https://statistiques.public.lu</a>
Anbaufläche pro t Rohstoff	2.930	m <sup>2</sup> *1a/t	(= Kehrwert von Ertrag Rapssaat)
Biodieselertrag	15,3	GJ/t Rapssaat	Fehrenbach et al. (2015)
dem Biodiesel zurechenbarer Anteil (Berücksichtigung Rapsschrot und Glycerin)	60%		Allokation nach unterem Heizwert
<b>Ergebnis</b>	115	m <sup>2</sup> *1a/GJ Biodiesel	(= Anbaufläche/Biodieselertrag x anrechenbaren Anteil)
	415	m <sup>2</sup> *1a/MWh Biodiesel	

### 3.1.4 Antriebseffizienz Elektro-, Gas- und Diesel-Pkw

Die betrachteten Antriebssysteme weisen sehr unterschiedliche Wirkungsgrade auf. Nach einer Studie von Agora Verkehrswende (2019) liegt die Bandbreite bei einem Elektrofahrzeug der Kompaktklasse zwischen 17 und 22 kWh pro 100 km. Als Rechenwert wird hier **20 kWh/100 km** angesetzt.

In der gleichen Studie werden auch mittlere Verbrauchswerte für einen Diesel-Pkw aufgeführt. Für einen gemischten Fahrzyklus wird darin nach ifeu-Modellierung ein mittlerer Wert von 4,7 Liter pro 100 km angesetzt. Bei einem Heizwert von 36 MJ pro Liter entspricht dies 169 MJ oder **609 kWh/100 km**. Dieser Wert gilt gleichermaßen für Biodiesel.

Ein Erdgasantrieb benötigt nach Daten vom ADAC<sup>2</sup> in der Kompaktklasse und bei einem vergleichbaren gemischten Fahrzyklus zwischen 3,9 und 4,6 kg pro 100 km. Hier wird der

<sup>1</sup> Berechnet anhand der Daten zur Flächennutzung und Erträgen in [https://statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=13352&IF\\_Language=fra&MainTheme=4&FldrName=2&RFPath=7274](https://statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=13352&IF_Language=fra&MainTheme=4&FldrName=2&RFPath=7274) und [http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=13362&IF\\_Language=fra&MainTheme=4&FldrName=2&RFPath=7275](http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=13362&IF_Language=fra&MainTheme=4&FldrName=2&RFPath=7275)

<sup>2</sup> <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/autokosten/erdgas-verbrenner-kostenvergleich/>

Wert für einen Golf 1.5 TGI BlueMotion Comfortline DSG mit 4,1 kg pro 100 km angesetzt. Bei einem Heizwert von 50 MJ/kg ergeben sich 205 MJ oder **56,9 kWh/100 km**.

## 3.2 Vergleichende Gegenüberstellung

Im direkt Vergleich bezogen auf eine Kilowattstunde Strom stehen sich 0,589 m<sup>2</sup> für Biogas und 0,022 m<sup>2</sup> für Freiland-PV gegenüber, damit wird für die kWh Biogas-Strom etwa **27fach mehr an Fläche** benötigt.

### 3.2.1 Flächenverbrauch für gefahrene 100 km

Zur weiteren Veranschaulichung der Unterschiede werden folgende Fahrzeugantriebe bezüglich ihres Flächenverbrauchs für gefahrene 100 km verglichen.

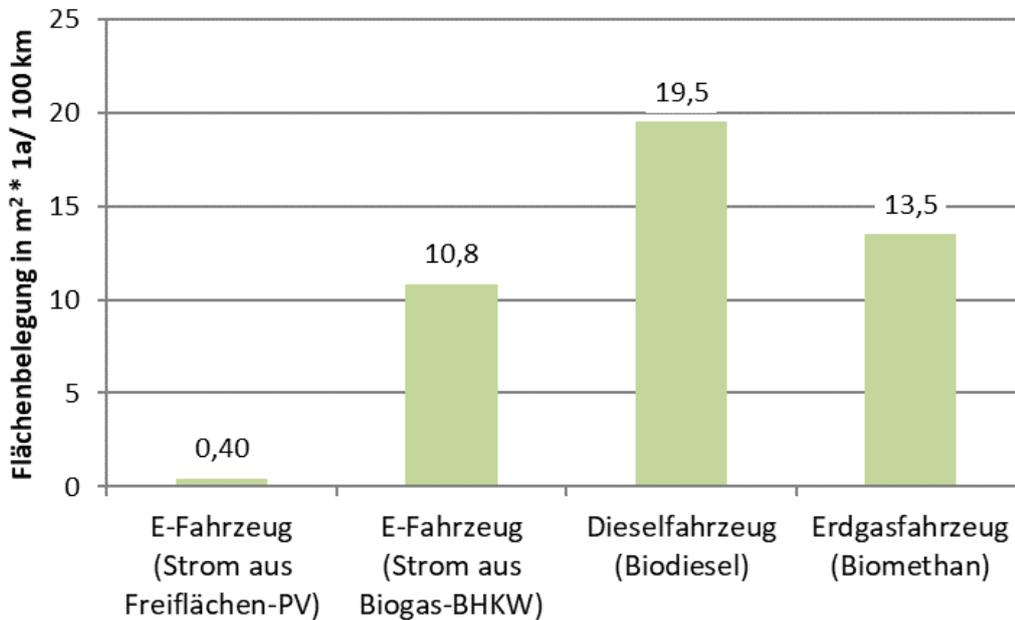
1. Elektrofahrzeug angetrieben von PV-FFA-Strom,
2. Gasfahrzeug mit Biomethan aus Mais-Biogas,
3. Dieselfahrzeug mit Rapsmethylester,
4. Elektrofahrzeug angetrieben von Biogas-BHKW-Strom durchgeführt.

Aus den Daten der vorangehenden Abschnitte werden in Tabelle 9 spezifische Flächenbelegung ermittelt und in Abbildung 15 nochmals grafisch dargestellt. Daraus werden folgende Schlüsse deutlich:

- E-Mobilität ist aufgrund der hohen energetischen Effizienz insgesamt auch bezüglich der Flächenintensität im Vorteil: ein E-Fahrzeug mit Strom aus einem Biogas-BHKW weist insgesamt nur etwa 80 % der Flächenbelegung wie ein Erdgas-Fahrzeug mit dem gleichen Biogas als CNG-Biomethan.
- Im Verhältnis der E-Mobilität mit PV-Strom und Biogas-Strom spiegelt sich der oben erwähnte Faktor 27 wider; damit ist die E-Mobilität mit PV-Strom unter den betrachteten Optionen die mit der bei weitem geringsten Flächenbelegung
- Das mit Biomethan betriebene Erdgasfahrzeug schneidet trotz des spezifisch höheren Energieverbrauchs gegenüber einem Dieselantrieb aufgrund der deutlich höheren Flächenerträge von Mais gegenüber Raps um knapp 25 % besser ab.

Tabelle 9: Gegenüberstellung verschiedener Fahrzeugantriebe bezüglich ihrer Flächenbelegung für gefahrene 100 km

	Energieverbrauch kWh/100 km	Flächenbelegung m <sup>2</sup> *1a/kWh	m <sup>2</sup> *1a/100 km
E-Fahrzeug (Strom aus Freiflächen-PV)	18,4	0,022	0,4
E-Fahrzeug (Strom aus Biogas-BHKW)	18,4	0,589	10,8
Dieselfahrzeug (Biodiesel)	47,0	0,415	19,5
Erdgasfahrzeug (Biomethan)	56,9	0,237	13,5



Berechnung und Darstellung ifeu

Abbildung 15: Gegenüberstellung verschiedener Fahrzeugantriebe bezüglich ihres Flächenverbrauchs für gefahrene 100 km

### 3.2.2 PV-Flächenbedarf für E-Mobilität im Vergleich zu Kraftstoff von 20% Ackerfläche mit Energiepflanzen

Als weiterer Vergleich des Flächenbedarfs für PV-basierte Elektromobilität und Antrieb über Biokraftstoffe soll anhand der vom Luxemburger Aktionsplan für erneuerbare Energien vorgesehenen 20 % der Ackerfläche für Energiepflanzen, angestellt werden. Dabei werden folgende Optionen unterstellt:

1. Es wird ermittelt, welche Kraftstoffmenge von 20 % der Ackerfläche Luxemburgs produziert werden kann.
2. Es ermittelt, wieviel Ackerfläche an PV-Fläche benötigt wird, um die gleiche Antriebsenergie zu erzielen.

Der Vergleich erfolgt auf der Basis der für die Bioenergie günstigsten Variante, dem E-Fahrzeug mit Strom aus Biogas-BHK auf Basis Maissilage. 20 % der Ackerfläche Luxemburgs sind 12.560 ha. Ausgehend von den oben ermittelten 589 m<sup>2</sup>\*1a/MWh Strom lassen sich von dieser Fläche rund 210 GWh Strom produzieren. Das entspricht 0,7 % des Endenergieverbrauchs im Verkehr Luxemburg von ca. 29.000 GWh, der jedoch zu ¾ von Transferbewegungen und Tanktourismus dominiert ist.<sup>1</sup> Am inländischen Energieverbrauch des Verkehrs, können durch Biogasstrom von 20 % Ackerfläche 2,9 % gedeckt werden.

Um den gleichen Energiebeitrag über Freiland-PV zu erreichen benötigt man lediglich 470 ha, das sind 0,7 % der Ackerfläche. Würde man 20 % der Ackerfläche in PV-Anlagen umwandeln, könnten damit annähernd 80 % des Endenergieverbrauchs des inländischen Verkehrs gedeckt werden.

<sup>1</sup> [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/lu\\_neeap\\_2017\\_de\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/lu_neeap_2017_de_0.pdf)

Im Übrigen zeichnen sich inzwischen auch technische Entwicklung im Bereich Freiland-PV ab, die eine Kombination mit landwirtschaftlicher Nutzung auf einer Fläche ermöglichen.

So wurde am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE das Konzept *Agrophotovoltaik* (APV)<sup>1,2</sup> entwickelt: Die Module werden auf eine Tragkonstruktion in fünf Meter Höhe über dem Boden montiert und ermöglichen die Nutzung für die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion. Die Versuchsanlage (auf 0,3 Hektar mit PV-Leistung von 194 kWp) wies eine Steigerung der Landnutzungsrate auf 160 Prozent nach, die bei extrem heißen und trockenen Wetterverhältnissen (z.B. Hitzesommer 2018) noch höher liegen kann, da die Teilverschattung unter den Solarmodulen die Kulturen vor der hohen Sonneneinstrahlung schützt.

Ein anderes Anlagenkonzept verfolgt Next2Sun<sup>3</sup>: hier werden bifaciale Module senkrecht aufgestellt (Ost-Westen-Ausrichtung) und lassen einen breiten Zwischenraum, die eine landwirtschaftliche Nutzung zwischen den Modulreihen erlauben.

---

<sup>1</sup> <http://www.agrophotovoltaik.de/>

<sup>2</sup> <https://www.ise.fraunhofer.de/de/leitthemen/integrierte-photovoltaik/agrophotovoltaik-apv.html>  
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2019/agrophotovoltaik-hohe-ernteertraege-im-hitzesommer.html>

<sup>3</sup> <https://www.next2sun.de/>

## 4 Zusammenfassung

---

### Biogas

Ein generell **positiver** Aspekt der Biogasnutzung ist die Möglichkeit über einen erneuerbaren Energieträger einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.

Dieser Beitrag ist umso bedeutsamer bei der **Vergärung von Gülle und Mist**, da über das Verfahren der Fermentation eine bedeutsame Quelle an Treibhausgasemissionen des Landwirtschaftssektors damit vermieden oder zumindest deutlich verringert werden kann.

Zusätzlich kommt hier als weiterer positiver Aspekt hinzu, dass Gülle, Mist aber auch andere biogene Abfälle als Rohstoff ohne weitere Nutzungskonkurrenz zur Verfügung stehen. Diese Stoffe müssen in jedem Fall in einer umweltfreundlichen und ressourcenschonenden Weise behandelt und als Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Die Biogasnutzung steht nicht im Konflikt zu dieser Anforderung, sie kann deren Umsetzung vielmehr unterstützen.

Die in diesem Papier erstellte Ist-Analyse und Szenarienberechnungen zeigen, dass einem *ambitionierten* Ansatz mit 50 % Erfassung von Gülle und Mist mit ca. 200.000 t CO<sub>2</sub>-Äq. pro Jahr fast doppelt so viel **Treibhausgasemissionen vermeiden** lassen gegenüber dem Ist-Stand. Das entspräche einem Beitrag zur Minderung der Gesamtemission Luxemburgs von 2 %.

Positiv sind neben diesen Umweltaspekten auch die Chancen für Wertschöpfung in der Landwirtschaftsbranche.

**Nachteile** zeichnen sich vielmehr bei einem Ausbau dann ab, wenn damit ein größerer Anstieg des Anbaus und Einsatz von Energiepflanzen verbunden ist. Deswegen sollten dem Einsatz von Anbaubiomasse Grenzen gesetzt werden. Geht man davon aus, dass die Biogasanlagen zu 70 % Gülle und Mist (bezogen auf die Masse) einsetzen, müssen die übrigen 30 % durch andere Substrate gedeckt werden. Dies sind angesichts geringer sonstiger Reststoffoptionen in der Regel Energiepflanzen. Bei dem erwähnten *ambitionierten* Ansatz werden ca. 10.000 ha für den Anteil Energiepflanzen benötigt. Das sind 7,6 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche und 16 % der Ackerfläche und somit über dem Limit von 6,7 % welches die Politikziele Luxemburgs für gasförmige Bioenergie bereitzustellen bereit sind. Ein Maximalszenario wäre somit nicht vereinbar mit diesen Politikzielen. Der Weg könnte hier lauten, dass sich die Substratwahl noch stärker auf Gülle und Mist verdichten muss, sprich, dass landwirtschaftliche Biogasanlagen Anteile von 90 % bezogen auf Masse und höher anstreben sollten.

Die ambitionierten Klimaschutzziele der Mitgliedsstaaten der EU (siehe Paris-Abkommen) werden jedoch auch Veränderungen in der landwirtschaftlichen Produktion erfordern, allem voran in der Tierproduktion, die mit Abstand die Hauptquelle an Treibhausgasemissionen im Landwirtschaftssektor darstellt. Reduktion von Tierzahlen und Umstellung der Ernährungsweisen (Stichworte mehr pflanzliche Proteine) werden das Potenzial an Wirtschaftsdünger mittel- bis langfristig reduzieren. Dies kann jedoch kein

Argument gegen heute wichtige Investitionen in Klimaschutzmaßnahmen des Sektors sein, insofern moderate Potenziale zur Ausschöpfung diskutiert werden und somit keine Lock-In-Effekte geschaffen werden.

Das Positionspapier gibt ausführliche **Empfehlungen für die Rahmensetzung** zur möglichst optimalen Gestaltung von Umweltverhalten und Effizienz einer künftigen Biogasnutzung in Luxemburg. Hierfür werden konkrete Anforderungen an die Erfassung von Substraten, an die technische Ausgestaltung einer künftigen Erzeugung und Nutzung von Biogas und formuliert zu Aspekten wie

### **Vergleich mit Photovoltaik**

Im direkten Vergleich einer auf Energiepflanzenproduktion basierten Biogasnutzung zeigt sich die Photovoltaik (PV) deutlich flächeneffizienter. Grob gesagt, benötigt man für die gleiche Menge Strom über den Biogaspfad gegenüber Solarstrom etwa das 25fache an Fläche. Dies unterstreicht, dass der Einsatz von gezielt angebauten Energiepflanzen für die Biogasnutzung kein effizienter Weg ist.

Der Ausbau der Biogasnutzung sollte sich daher auf die Ausschöpfung bestehender Potenziale von Reststoffen und Abfällen konzentrieren. Substrate aus angepassten landwirtschaftlichen Konzepten (Mischkulturen, Zwischenfrüchten), deren Ziel eine nachhaltige Produktion und Agrobiodiversität ist, sind ebenso als positiv zu werten.

# Literaturverzeichnis

---

AEV (2019): Luxembourg's Informative Inventory Report 1990-2017 - Submission under the UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution Version 1.0. Luxembourg, 24 May 2019

[https://www.ceip.at/ms/ceip\\_home1/ceip\\_home/status\\_reporting/2019\\_submissions/](https://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/status_reporting/2019_submissions/)

Adler, P., Billig, E., Brosowski, A., Daniel-Gromke, J., Falke, I., Fischer, E., Grope, J., Holzhammer, U., Postel, J., Schnutenhaus, J., Stecher, K., Szomszed, G., Trommler, M., Urban, W. (2014): Biogasleitfaden Biogasaufbereitung und –Einspeisung; Hg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR); 5., vollständig überarbeitete Auflage, 2014

[https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/l/e/leitfaden\\_biogaseinspeisung-druck-web.pdf](https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/l/e/leitfaden_biogaseinspeisung-druck-web.pdf)

AGE - Administration de la gestion de l'eau (2020): Rapport conformément à l'article 10 de la directive 91/676/CEE concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole Période 2016 – 2019

ATB (2017): Methan- und Ammoniakemissionen aus der offenen Lagerung von Gärresten und Ansätze zu deren Reduzierung; gefördert vom BMEL FKZ 22011213;

[https://opus4.kobv.de/opus4-slbp/files/12198/Schlussbericht\\_22011213.pdf](https://opus4.kobv.de/opus4-slbp/files/12198/Schlussbericht_22011213.pdf)

Biermayr, P., Cremer, C., Faber, T., Kranzl, L., Ragwitz, M., Resch, G., Toro, F (2007): Bestimmung der Potenziale und Ausarbeitung von Strategien zur verstärkten Nutzung von erneuerbaren Energien in Luxemburg

Biogas Vereenigung (2019): Biogas in Luxemburg - Stand und Perspektiven, Entwurf Juni 2019

BMVI (Hrsg.): Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland. BMVI-Online-Publikation 08/2015.

Bosch & Partner und Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW): Potenziale für PV-Freiflächenanlagen – Fachliche Einführung in den Workshop (Vortragsfolien). Workshop PV-Freiflächen, BMWi, Berlin, 2016

Brosowski, A., Adler, P., Erdmann, G., Stinner, W., Thrän, D., Mantau, U., Blanke, C., Mahro, B., Hering, Th., Reinholdt, G.(2015): Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen (Status quo in Deutschland). Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 36

Convis S.C. (2018): Durchführung einer Studie zur Reduzierung der Klimawirkung der Landwirtschaft in Luxemburg bis 2030; Im Auftrag des MDDI;

<https://environnement.public.lu/dam-assets/actualites/2019/04/Studie-Reduzierung-Klimawirkung-Landwirtschaft.pdf>

Daniel-Gromke, J., Rensberg, N., Denysenko, V., Trommler, M., Reinholz, T., Völler, K., Beil, M., & Beyrich, W. (2017). Anlagenbestand Biogas und Biomethan – Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland (Issue 30). DBFZ Report 30;

<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.10.015>

Fehrenbach, H., Giegrich, J., Köppen, S., Wern, B., Pertagnol, J., Baur, F., Hünecke, K., Dehoust, G., Bulach, W., Wiegmann, K. (2019): BioRest Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor); UBA Texte 115/2019

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-24\\_texte\\_115-2019\\_biorest.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-24_texte_115-2019_biorest.pdf)

Fehrenbach, H., Köppen, S., Markwardt, S.: BioEm - Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade; FKZ 28232; Umweltbundesamt; Texte 09/2016

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_09\\_2016\\_aktualisierung\\_der\\_eingangsdaten\\_und\\_emissionsbilanzen\\_wesentlicher\\_biogener\\_energienutzungspfade\\_1.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_09_2016_aktualisierung_der_eingangsdaten_und_emissionsbilanzen_wesentlicher_biogener_energienutzungspfade_1.pdf)

Fehrenbach, H., Vogt, R., Altröck, M., Kahl, H. (2010): Biomethan als Kraftstoff: Eine Handlungsempfehlung zur Biokraft-NachV für die Praxis; Publikation im Rahmen des Projektes „Biomethan im Kontext der Biokraft-NachV“, gefördert unter O3MAP19 durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Heidelberg, Berlin 2010

[https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Biomethan-als-Kraftstoff\\_Handlungsempfehlung.pdf](https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Biomethan-als-Kraftstoff_Handlungsempfehlung.pdf)

Flessa, H., Greef, J. M., Hofmeier, M., Dittert, K., Ruser, R., Osterburg, B., Poddey, E. Wulf, S., Pacholski, A. (2014): Minderung von Stickstoff – Emissionen aus der Landwirtschaft - Empfehlungen für die Praxis und aktuelle Fragen an die Wissenschaft; BMEL (Hg.) Forschung Themenheft 1/2014

[https://literatur.thuenen.de/digbib\\_extern/dn054531.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn054531.pdf)

Gargano, L., G. Zangerlé, J. Hauptert & J.-P. Hoffmann, 2014. Bulletin du statec - La structure des exploitations agricoles en 2012 et les méthodes de production agricole en 2010. In Bulletin du Statec. Luxembourg - Kirchberg: Statec - Institut national de la statistique et des études économiques

Günnewig, D; Sieben; A., Püschel, M.; Bohl; J.; Mack, M. (2007). Leitfaden zur Berücksichtigung von Umweltbelangen bei der Planung. Im Auftrag des BMU; 2017

Haanel, H.-D., Rösemann, C., Dämmgen, U., Döring, U., Wulf, S., Eurich-Menden, B., Freibauer, A., Döhler, H., Schreiner, C., Osterburg, B., Fuß, R. (2020): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2018 : Report on methods and data (RMD) Submission 2020. Braunschweig: Johann Heinrich von ThünenInstitut, 448 p, Thünen Rep 77, DOI:10.3220/REP1584363708000

Industrieverband Agrar e.V. (2018): Wichtige Zahlen: Düngemittel - Produktion - Markt – Landwirtschaft; Frankfurt Dezember 2018;

[https://www.iva.de/sites/default/files/benutzer/%25uid/publikationen/wichtige\\_zahlen\\_2017-2018.pdf](https://www.iva.de/sites/default/files/benutzer/%25uid/publikationen/wichtige_zahlen_2017-2018.pdf)

MAVDR - Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement rurale (2019): Das neue Schutzzonenkonzept für die Stauseeregion ;

<https://agriculture.public.lu/dam-assets/publications/asta/wasserschutz/M12-presentation-MAVDR-02072019.pdf>

Müller-Langer, F., Perimenis, A., Brauer, S., Thrän, D., Kaltschmitt, M. (2008): Technische und ökonomische Bewertung von Bioenergie-Konversionspfaden; Leipzig, Berlin 2008; [http://www.wbgu.de/wbgu\\_jg2008\\_ex06.Technische und ökonomische Bewertung von Bioenergie-Konversionspfaden](http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_ex06.Technische%20und%20oekonomische%20Bewertung%20von%20Bioenergie-Konversionspfaden)

Prüß, A. (2018): Der nicht geregelte Stickstoffkreislauf; Beitrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LUBW) auf der Umweltbeobachtungskonferenz 2018, Ittlingen, Schweiz

<https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/daten-karten/presentation/Vortrag%20Stickstoffkreislauf.pdf.download.pdf/Vortrag%20Stickstoffkreislauf.pdf>

Reinhold, G., Zorn W. (2015): Eigenschaften von Gärresten und deren Wirkung auf Ertrag und Bodeneigenschaften. In: FNR-Tagung „Pflanzenbauliche Verwertung von Gärresten aus Biogasanlagen“

Rösemann, C., Haenel, H., Dämmgen, U., Döring, U., Wulf, S., Eurich-Menden, B., ... Döhler, H. (2019). Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2017 - Report zu Methoden und Daten (RMD) Berichterstattung 2019 Thünen Report 67. <https://www.thuenen.de/de/infothek/publikationen/thuenen-report/thuenen-report-alle-ausgaben/>.

Schaeler, S., Winter, G., Deuker, A. (2019): Aufkommen, Behandlung und Vermeidung von Lebensmittelabfällen im Großherzogtum Luxemburg – Schätzung 2019; Studie von Eco Conseil im Auftrag der AEV, Esch-sur-Alzette;

[https://environnement.public.lu/content/dam/environnement/documents/offall\\_a\\_ressourcen/gaspillage-alimentaire/Aufkommen-Behandlung-Vermeidung-2018-2019.pdf](https://environnement.public.lu/content/dam/environnement/documents/offall_a_ressourcen/gaspillage-alimentaire/Aufkommen-Behandlung-Vermeidung-2018-2019.pdf)

Scholwin, F., Grope, J., Clinkscales, A., Daniel-Gromke, J., Rensberg, N., Denysenko, V., Stinner, W., Richter, F., Raussen, T., Kern, M., Turk, T., Reinhold, G. (2019): Aktuelle Entwicklung und Perspektiven der Biogasproduktion aus Bioabfall und Gülle; UBA-Forschungsbericht FKZ 37EV 17 104 0; Texte 41/2019

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktuelle-entwicklung-perspektiven-der>

Scholwin, F., Grope, J., Schüch, A., Daniel-Gromke, J., Beil, M., Holzhammer, U. (2014): Ist-Stand der Biomethannutzung Kosten – Klimawirkungen – Verwertungswege - KWK aus Biogas, Biomethan und Erdgas im Vergleich; Studie im Auftrag des BMWi, November 2014;

[https://biogas.fnr.de/fileadmin/user\\_upload/DBFZ\\_BMWi-Ist\\_Stand\\_Biomethan\\_11\\_2014.pdf](https://biogas.fnr.de/fileadmin/user_upload/DBFZ_BMWi-Ist_Stand_Biomethan_11_2014.pdf).

Schön, M, Reitze, F., Ragwitz, M. (2016): Wissenschaftliche Beratung zu Fragen der Energiestrategie Luxemburgs mit besonderem Fokus auf Erneuerbare Energien - Aktualisierung der Potenzialanalyse für Erneuerbare Energien - Ausblick auf 2030 - Studie im Auftrag für das luxemburgische Ministerium für Wirtschaft

Schön, M, Reitze, F., Ragwitz, M. (2015): Aktualisierung der Potenzialanalyse für Erneuerbare Energien; Studie im Auftrag für das luxemburgische Ministerium für Wirtschaft

SER - Service d'Economie rurale (2014): Gülle und Anfall von festem Mist in Luxemburg 2008-2014

STATEC 2019. Consommation d'engrais chimiques 1936 – 2019 .  
[https://statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=13369&IF\\_Language=fra&MainTheme=4&FldrName=2&RFPPath=7275](https://statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=13369&IF_Language=fra&MainTheme=4&FldrName=2&RFPPath=7275)

Thrän, D., Lauer, M., Dotzauer, M., Kalcher, J., Oehmichen, K., Majer, S., Millinger, M., Jordan, M. (2019): Technoökonomische Analyse und Transformationspfade des energetischen Biomassepotentials (TATBIO); study on behalf of the Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/technoekonomische-analyse-und-transformationspfade-des-energetischen-biomassepotentials.html>

Tsachidou, B., Scheuren, M., Gennen, J., Debbaut, V., Toussaint, B., Hissler, C., George, I., Delfosse, P. (2019): Biogas residues in substitution for chemical fertilizers: A comparative study on a grassland in the Walloon Region; Science of The Total Environment; Volume 666, 20 May 2019, Pages 212-225; <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.238>

UBA - Umweltbundesamt (2016): Konzepte zur Minderung von Arzneimittelrückständen aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung in die Umwelt; Fachbroschüre;

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/publikationen/fachbroschuere\\_tam\\_final.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/publikationen/fachbroschuere_tam_final.pdf)

UBA - Umweltbundesamt (2017): Grundwasserkörper in schlechtem Zustand bezüglich Nitrat;

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/styles/300w300h/public/medien/2875/bilder/karte\\_01\\_gw\\_schlechtchemzust\\_mueschr\\_jkr171128.jpg?itok=OYPH2LLG](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/styles/300w300h/public/medien/2875/bilder/karte_01_gw_schlechtchemzust_mueschr_jkr171128.jpg?itok=OYPH2LLG)

Thünen-Institut (2019): Stickstofflieferung aus Wirtschaftsdünger inklusive Gärreste 2014; <https://www.thuenen.de/de/thema/wasser/wohin-mit-guelle-und-gaerresten/>

Weinreich, S.; Paterson, M.; Roth, U. (2020). Leitfaden zur Substrat- und Effizienzbewertung an Biogasanlagen. (DBFZ-Report, 35). Leipzig: DBFZ. VII, 9-63 S. ISBN: 978-3-946629-57-3.

<https://www.dbfz.de/pressemediathek/publikationsreihen-des-dbfz/dbfz-reports/dbfz-report-nr-35/>

Wulf, S., Rösemann, C., Eurich-Menden, B., Grimm, E. (2017): Ammoniakemissionen in der Landwirtschaft Minderungsziele und –potenziale - Aktuelle rechtliche Rahmenbedingungen für die Tierhaltung, Hannover 31.05.2017;

[https://www.ktbl.de/fileadmin/user\\_upload/Allgemeines/Download/Tagungen-2017/Rechtliche\\_Rahmenbedingungen\\_Tierhaltung/Ammoniakemissionen.pdf](https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Allgemeines/Download/Tagungen-2017/Rechtliche_Rahmenbedingungen_Tierhaltung/Ammoniakemissionen.pdf)