

Potenzialstudie

**für Biomethan oder -Wasserstoffproduktion aus biogenen
Reststoffen aus der Tierhaltung in der Region Hochfranken**

Gradel, A.*; Seibert, T.**; Oertel, E.***; Gretsche, L.*

*BtX energy GmbH

**Fachschule für Technik Hof

***consulting.hoch.franken e. V.

Abstract

Die vorliegende Studie untersucht das energetische Potential für die Biomethan- bzw. Wasserstoffherzeugung aus der Verwertung von Reststoffen der Tierhaltung und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen in Hochfranken. Ziel ist es, das mögliche Erzeugungspotenzial für Biomethan oder Wasserstoff und das einhergehende Treibhausgasminderungspotenzial bei einer vollständigen Erschließung dieser Reststoffe für die Energieerzeugung abzuschätzen. Diese Arbeit beleuchtet den Tierbestand und die bestehenden Biogasanlagen in der Region Hochfranken, analysiert die bereits verwerteten Reststoffe aus deren Substratmischungen und errechnet die reale Differenz aus Vorkommen und Einsatz. Die zu Grunde liegenden Daten werden verwendet, um das Potenzial für die Biomethan- bzw. Wasserstoffproduktion zu quantifizieren und um darzulegen, welche Treibstoffmenge anhand des Beispiels „Busverkehr“ substituiert werden könnte und welchen Beitrag dies zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen leisten würde.

Die Studie verdeutlicht, dass ein beträchtlicher Teil der vorhandenen Reststoffe aus der Tierhaltung bisher ungenutzt bleibt. Bei ihrer Nutzung zur Erzeugung von Wasserstoff für den Mobilitätsbereich würde durch Vermeidung von Methanemissionen bei der direkten Ausbringung eine CO₂-Senke erzielt werden, womit eine erhebliche Reduktion der regionalen Treibhausgasemissionen stattfinden könnte.

Inhaltsverzeichnis

I.	Abbildungsverzeichnis.....	III
II.	Tabellenverzeichnis.....	III
III.	Symbolverzeichnis	1
1.	Einführung.....	2
1.1	Hintergrund	2
1.2	Zielsetzung.....	2
2.	Dampfreformierung von Biogas	3
3.	Methodik	6
3.1	Erhebung des Tierbestandes.....	6
3.2	Erhebung des bereits eingesetzten Potenzials im Anlagenbestand	6
3.3	Wasserstoffproduktionsmenge und THG-Minderung	8
4.	Ergebnisse	10
4.1	Gesamter Tierbestand und resultierendes Gaserzeugungspotenzial.....	10
4.2	Bereits in Biogasanlagen eingesetzte Reststoffe	11
4.3	Resultierendes Wasserstoffproduktions- und THG-Minderungspotenzial	13
5.	Zusammenfassung und Fazit	14
6.	Literaturverzeichnis	15

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinfachtes Schema der Dampfreformierung von Biogas zur Wasserstoffherstellung [6].....	3
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Prozessschritte in einer Reformieranlage [6].	4
Abbildung 3: Anlage zur Produktion von 100 kg Wasserstoff aus Biogas pro Tag [6].....	5
Abbildung 4: Gesamter Tierbestand in der Region Hochfranken (Stand 2022)	10
Abbildung 5: Genutztes und ungenutztes Reststoffpotenzial aus der Tierhaltung in der Region Hochfranken	13

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gesamter Tierbestand in der Region Hochfranken.....	10
Tabelle 2: Möglicher Energieertrag der unterschiedlichen Tiergattungen und Gesamtpotenzial.....	10
Tabelle 3: Typische Gaserträge der jeweiligen Substratanteile	11
Tabelle 4: In der Kreisfreien Stadt Hof verwertete Reststoffenergie	11
Tabelle 5: Im Landkreis Hof verwertete Reststoffenergie	11
Tabelle 6: Im Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge verwertete Reststoffenergie	12

III. Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
<i>c</i>	kg 100 km ⁻¹	Spezifischer Verbrauch
<i>H_u</i>	kWh kg ⁻¹	Unterer Heizwert
<i>e</i>	to GJ ⁻¹	Spezifische CO ₂ Emission eines Treibstoffs
<i>E</i>	to a ⁻¹	Jährliche Emission
<i>f</i>	%	Anteil
<i>F</i>	-	Verrechnungsfaktor
<i>G</i>	Nm ³ t ⁻¹	Gasertrag pro eingesetzter Substratmenge
<i>L</i>	km a ⁻¹	Laufleistung pro Jahr
<i>m</i>	to a ⁻¹	Masse pro Jahr
<i>n</i>	-	Anzahl
<i>P</i>	kW	Leistung
<i>Q</i>	kWh a ⁻¹	Jährliche Energiemenge
<i>t</i>	h a ⁻¹	Vollaststunden
<i>V</i>	Nm ³ a ⁻¹	Methanertrag pro Jahr und Tier
<i>η</i>	%	Wirkungsgrad
<i>ρ</i>	kg Nm ⁻¹	Normdichte

Indizes:

<i>BG</i>	Biogasanlage
<i>CO</i>	Kohlenstoffmonoxid
<i>CO₂</i>	Kohlenstoffdioxid
<i>CH₄</i>	Methan
<i>Diesel</i>	Diesel
<i>el</i>	Elektrisch
<i>eq</i>	Äquivalent
<i>G</i>	Gülle
<i>GS</i>	Grassilage
<i>H₂</i>	Wasserstoff
<i>H₂O</i>	Wasser
<i>M</i>	Mist
<i>MS</i>	Maissilage
<i>NaWaRo</i>	Nachwachsende Rohstoffe
<i>Pot</i>	Potenzial
<i>ref</i>	Reformierung
<i>RS</i>	Reststoff
<i>T</i>	Tier
<i>THG</i>	Treibhausgas

1. Einführung

1.1 Hintergrund

Auf der „Pariser Klimakonferenz“ im Jahr 2015 hat sich die deutsche Regierung erstmals völkerrechtlich darauf geeinigt, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen [1]. Um die vereinbarten Ziele zu erreichen, wurde von der Bundesregierung im November 2016 der Klimaschutzplan 2050 beschlossen. Dieser konkretisiert das bestehende Klimaschutzziel und die vereinbarten Zwischenziele und nennt Maßnahmen, um das Pariser Klimaschutzabkommen umzusetzen [2]. Im Juni 2021 hat der Deutsche Bundestag stärkere Klimaschutzziele beschlossen. Mit der Änderung des Klimaschutzgesetzes wurden die Klimaschutzvorgaben verschärft und das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 verankert. Bereits bis 2030 sollen die Emissionen um 65 Prozent gegenüber 1990 sinken [3].

Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung emittiert nach der Ausbringung auf den Flächen CH_4 , welches ein vielfaches der Treibhausgaswirkung von CO_2 verursacht. Durch zwischenzeitliche Nutzung zur Biomethan- oder Wasserstoffproduktion und der beim Prozess oder der Nutzung einhergehenden Oxidation des enthaltenen Kohlenstoffes zu Kreislauf- CO_2 wird demnach eine effektive Treibhausgas-Senke im Vergleich zur bisherigen Nutzung erzeugt [4].

In der vorliegenden Studie wird daher der Fokus auf ungenutzte Reststoffe aus der Landwirtschaft in der Region Hochfranken und das damit einhergehende Potenzial zur Biomethan- oder Wasserstoffherzeugung sowie der Reduktion von Treibhausgasemissionen gelegt. Zahlen und Daten um diese Potenziale zu errechnen wurden unter anderem der EU-Richtlinie für erneuerbare Energien („RED II“) entnommen [5].

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Studie ist die umfassende Evaluierung und Quantifizierung der biogenen Reststoffpotentiale aus der Tierhaltung der Region Hochfranken für die Produktion von Biomethan bzw. Wasserstoff mit verfügbaren Daten und entsprechenden Berechnungen. feste Biomasse wird in der vorliegenden Studie nicht betrachtet.

2. Dampfreformierung von Biogas

Die Herstellung von Biogas und die Abscheidung von CO_2 zur Biomethanaufbereitung ist bereits großflächig etabliert, daher soll in der vorliegenden Studie nur die neuartige Herstellung von Wasserstoff aus Biogas näher erläutert werden.

Im Folgenden wird der Prozess der Dampfreformierung von Biogas zur Herstellung von Wasserstoff betrachtet. Der Prozess beinhaltet die Schritte der Reinigung, Reformierung, Nachbereitung mittels Wassergas-Shift und die abschließende Abtrennung des Wasserstoffs. Abbildung 1 zeigt vereinfacht das Prozessschema vom Substrat zum reinen Wasserstoff.

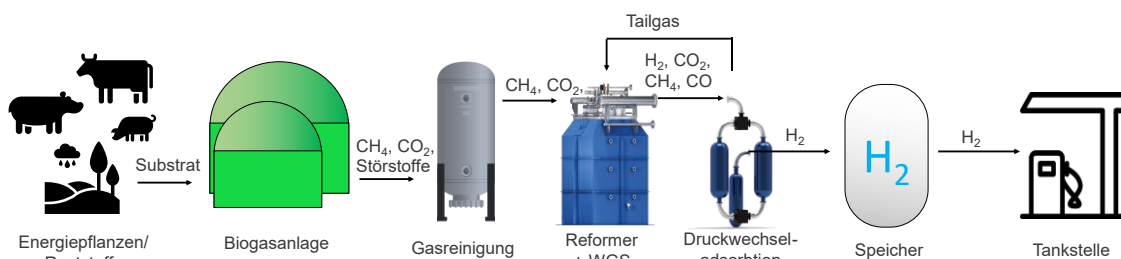


Abbildung 1: Vereinfachtes Schema der Dampfreformierung von Biogas zur Wasserstoffherstellung [6]

Enthaltener Schwefelwasserstoff wird zunächst durch eine vorherige Aktivkohlefilterung des Biogases abgeschieden. Durch eine nickelkatalysierte Dampfreformierung wird anschließend das im gereinigten Gasgemisch vorhandene Methan und CO_2 zusammen mit Wasserdampf zu einem Gasgemisch mit hohem Wasserstoffanteil reformiert. Nach einer weiteren Erhöhung der Wasserstoffausbeute mittels Wassergas-Shift wird das im Produktgas enthaltene Kohlenstoffmonoxid, Methan und Kohlenstoffdioxid durch Druckwechseladsorption, einem adsorptivem Gastrennungsverfahren, abgeschieden [6].

Folgende Reaktionen finden bei der Methanreformierung statt. Die Reaktionen, welche durch die Gleichung beschrieben sind, laufen parallel ab [6]:

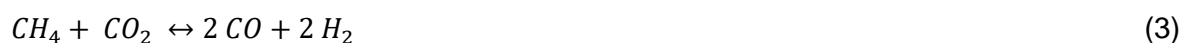
Methan und Wasser reagieren zu Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff



Methan und Wasser reagieren zu Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff



Methan und Kohlenstoffdioxid reagieren zu Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff



Bei der Wassergas-Shift-Reaktion wird Kohlenstoffmonoxid mit dem noch im Gemisch enthaltenen Wasserdampf zu Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff konvertiert [6]. Diese Reaktion findet leicht exotherm statt und diese senkt, je nach Fahrweise des Reaktors, den Kohlenstoffmonoxid-Gehalt auf 0,6 – 1,5 Vol.-% [7].



Nach der eigentlichen Dampfreformierung und der Wassergas-Shift-Reaktion folgt die Wasserstoffabscheidung mittels Druckwechseladsorption (PSA). Bei der Druckwechseladsorption handelt es sich um ein Gastrennverfahren, welches sich die unterschiedlichen Adsorptionseigenschaften der Gase im Gemisch unter erhöhtem Druck zunutze macht. An einem Molekularsieb werden die vom Wasserstoff abzuscheidenden Komponenten unter Druck adsorbiert, während der Großteil des Wasserstoffes das Sieb passiert. PSA-Anlagen bestehen aus mehreren Adsorptionseinheiten, das Rohgas durchläuft eine Adsorptionseinheit mit erhöhtem Druck so lange, bis das darin befindliche Molekularsieb mit den abzuscheidenden Gasen gesättigt ist. Zur Regeneration wird der Druck reduziert und das sogenannte Tailgas, also alle adsorbierten Komponenten wieder abgeblasen [8]. Der Gesamtprozess ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

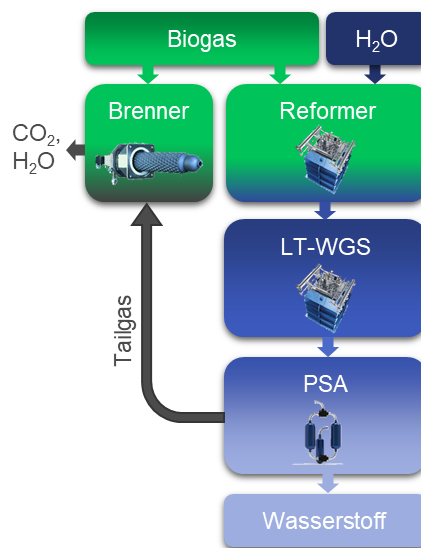


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Prozessschritte in einer Reformieranlage [6].

Das sogenannte Tailgas aus der Wasserstoffabscheidung ist noch brennbar und wird daher im Brenner des Reformers zur Energiebereitstellung eingesetzt. Der Prozess als Ganzes hat demnach nur Biogas, Leitungswasser und eine geringe Menge elektrische Energie als Eingangsströme und sauberes FLOX-Abgas sowie hochreinen Wasserstoff als Ausgangsströme. Der Wasserstoff wird nach der Druckwechseladsorption hochrein aus der Anlage geleitet [6].

Unter Zugabe von ca. 5 Liter Wasser kann der Biogasdirektreformer so aus rund 10 m³ Biogas, was einer Energieleistung von ca. 55 kWh entspricht, ein Kilogramm Wasserstoff mit einem unteren Heizwert von 33,33 kWh erzeugen [9]. Somit ergibt sich ein Wirkungsgrad von ca. 60 % Hinzu komme eine mögliche Wärmeauskopplung von rund 20 % der eingesetzten Energie aus dem Biogas, was einen Systemwirkungsgrad von 80 % vom Biogas zu Wasserstoff + Wärme ergibt. Abbildung 3 zeigt ein Foto einer Wasserstoffproduktionsanlage der BtX energy GmbH für rund 100 kg Wasserstoff pro Tag [6].



Abbildung 3: Anlage zur Produktion von 100 kg Wasserstoff aus Biogas pro Tag [6].

3. Methodik

3.1 Erhebung des Tierbestandes

Der Tierbestand aus der Region Hochfranken wurde mit Hilfe von Statistik Kommunal, den verfügbaren Zahlen des Bayerischen Landesamtes für Statistik, für die Kreisfreie Stadt Hof und für die Landkreise Hof und Wunsiedel im Fichtelgebirge erhoben [10, 11, 12, 13]. Die ermittelten Tierbestände umfassen (Mast-)Rinder, Milchkühe, Jungrinder, Kälber, Schweine, Schafe, Hühner und Pferde. Um die Gesamtzahl $n_{i,ges}$ einer Tiergattung i zu ermitteln, wurden die Tiere der Kreisfreien Stadt Hof $n_{i,Hof}$ und die der Landkreise Hof $n_{i,LK Hof}$ und Wunsiedel im Fichtelgebirge $n_{i,Wun}$ addiert.

$$n_{i,ges} = n_{i,Hof} + n_{i,LK Hof} + n_{i,Wun} \quad (7)$$

mit $i = Rinder, Milchkühe, Jungrinder, Kälber, Schweine, Schafe, Hühner, Pferde$

Im nächsten Schritt erfolgte die Multiplikation der Gesamtanzahl der jeweiligen Tiergattungen aus der gesamten Region Hochfranken, mit der entsprechenden Methanausbeute aus bestehenden Messdaten und dem Energiegehalt von Methan [14]. Q_i ist dabei der gesamte Energiegehalt aus den jährlich anfallenden Reststoffen der jeweiligen Tiergattung i , H_{u,CH_4} ist der Heizwert von Methan in kWh kg⁻¹, ρ_{CH_4} die Normdichte von Methan in kg Nm⁻³, $V_{CH_4,i}$ ist das Volumen des Methanertrages in Nm³ CH₄ pro Tier und Jahr aus den vorliegenden Richtwerten (Ausnahme Hühner: Hier Angabe pro 100 Tiere pro Jahr) und $n_{i,ges}$ entspricht der Gesamtanzahl der Tiere der jeweiligen Gattung i .

$$Q_i = H_{u,CH_4} \cdot V_{CH_4,i} \cdot \rho_{CH_4} \cdot n_{i,ges} \quad (8)$$

Der Ertrag von Jungrindern wurde hier zusätzlich mit dem Faktor für Großvieheinheiten von 0,4 reduziert, der von Kälbern mit dem Faktor 0,3. Anschließend wurden die Ergebnisse der Energiegehalte der jeweiligen Tiergattungen addiert und ein Gasproduktionspotenzial $Q_{Pot,ges}$ erstellt.

$$Q_{Pot,ges} = \sum Q_i \quad (9)$$

3.2 Erhebung des bereits eingesetzten Potenzials im Anlagenbestand

Die in der vorliegenden Studie betrachteten Biogasanlagen wurden unter Verwendung des Energie-Atlas Bayern [15] erfasst. In diesem sind Informationen wie der Standort, die Volllaststunden und die elektrische Leistung der jeweiligen Anlagen aufgeführt. Im Anschluss wurden Biogasanlagenbetreibende persönlich kontaktiert und über ihre Substratzusammensetzungen befragt. Die Substratmischungen setzen sich aus

Reststoffen, beispielsweise Gülle und Mist, sowie unterschiedlichen nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRo) wie Mais- und Grassilage mit variierenden Anteilen zusammen. Bei einer geringen Anzahl von Betrieben, die keine Auskunft geben konnten oder wollten, wurden branchenübliche Substratzusammensetzungen angenommen. Diese wurden in Tabelle 4, 5 und 6 kenntlich gemacht. Für Anlagen mit einer Leistung über 75 kW wurde eine typische Mischung aus 35 % Gülle und 65 % Maissilage angenommen. Bei Anlagen mit genau 75 kW wurde eine Substratzusammensetzung von 90 % Gülle und 10 % Maissilage verwendet, da dieser spezifische Anlagentyp in der Regel auf den fast ausschließlichen Gülleinsatz ausgelegt ist. Nach der Analyse der bestehenden Biogasanlagen erfolgte die Ermittlung der Energiemengen aus NaWaRo und Reststoffen. Im ersten Schritt fand die Bestimmung des spezifischen Methanertrages für den jeweiligen Substratanteil $G_{CH4,j}$ in Nm^3 Methan pro Tonne Input des Materials j statt. Dafür wurde der typische spezifische Gasertrag des Substrates G_j in Nm^3 pro Tonne Input mit dem typischen Methananteil f_{CH4} multipliziert. Die Daten entstammen verfügbaren Quellen für substratübliche Werte [16].

$$G_{CH4,j} = G_j * f_{j,CH4} \quad (10)$$

mit $j = \text{Gülle (G), Mist (M), Maissilage (MS), Grassilage (GS)}$

Für Gülle wurde die Werte der Kategorie „Rindergülle (KTBL)“, für Mist „Schweinemist“, für Maissilage „Maissilage (KTBL)“ und für Grassilage „Grassilage“ aus entsprechend verfügbaren Messdaten verwendet [16].

Im nächsten Schritt erfolgte die Berechnung der Stromgestehung $Q_{RS,BG,el}$ aus den Reststoffanteilen und aus den NaWaRo Anteilen $Q_{NaWaRo,BG,el}$ der jeweiligen Biogasanlagen mit individueller Substratmischung. Dabei bezeichnet $P_{el,BG}$ die eingetragene elektrische Anlagenleistung und t_{BG} die zuletzt dokumentierten Vollaststunden der Anlagen pro Jahr. Des Weiteren bezeichnen G_j die jeweiligen Gaserträge pro Tonne Input von Gülle (G), Mist (M), Maissilage (MS) und Grassilage (GS) sowie $f_{j,CH4}$ die jeweiligen typischen Methananteile. Dann gilt für Reststoff- und NaWaRo-Anteil der gewonnenen elektrischen Energiemengen:

$$Q_{RS,BG,el} = P_{el,BG} \cdot t_{BG} \cdot \frac{G_G \cdot f_G + G_M \cdot f_M}{\sum_j G_j f_j} \quad (11)$$

$$Q_{NaWaRo,BG,el} = P_{el,BG} \cdot t_{BG} \cdot \frac{G_{MS} \cdot f_{MS} + G_{GS} \cdot f_{GS}}{\sum_j G_j f_j} \quad (12)$$

Der einheitenlose Quotient in (11) und (12) ist die anteilige Bereitstellung der Primärenergie aus den Substraten. Heizwerte und Wirkungsgrade sind gekürzt.

Im Anschluss erfolgte die Addition der Energiemengen von allen in Stadt und Landkreis Hof sowie Wunsiedel betriebenen Biogasanlagen aus den jeweiligen Reststoffanteilen und die Errechnung der jährlichen Primärenergie im Biogas über den elektrischen Anlagenwirkungsgrad η_{el} , der auf übliche 40 % für Blockheizkraftwerke festgelegt wurde.

$$Q_{RS,BG,ges} = \frac{\sum Q_{RS,BG,el}}{\eta_{el}} \quad (13)$$

Im letzten Schritt erfolgte die Bildung der Differenz aus dem Gasproduktionspotenzial des gesamten gemeldeten Tierbestands $Q_{Pot,ges}$ und den bereits verwerteten Reststoffen $E_{RS,BG}$. Das Ergebnis dieser Differenz stellt die noch verfügbare Energiemenge ungenutzter Reststoffe $Q_{Pot,u}$ für die Biomethanproduktion dar.

$$Q_{Pot,u} = Q_{Pot,ges} - Q_{RS,BG,ges} \quad (14)$$

3.3 Wasserstoffproduktionsmenge und THG-Minderung

Nach der Ermittlung der bisher ungenutzten Reststoffe, kann im nächsten Schritt ein Wasserstoffproduktionspotenzial erstellt werden. Hierfür wird der untere Heizwert H_{u,H_2} von Wasserstoff 33,33 kWh verrechnet [9]. Der Wirkungsgrad der Biogasreformierung η_{ref} beträgt durchschnittlich 60 % (siehe Abschnitt 2), aus diesem ergibt sich dann die gesamte produzierbare Menge Wasserstoff m_{Pot,H_2} in Tonnen pro Jahr, die erzeugt werden kann:

$$m_{Pot,H_2} = \frac{Q_{Pot,u} * \eta_{ref}}{H_{u,H_2}} \quad (15)$$

Um das einhergehende THG-Minderungspotenzial berechnen zu können, wird die im Wasserstoff enthaltene Energiemenge sowie die aus Messdaten bzw. Richtwerten der Europäischen Kommission vorliegende THG-Minderung pro Energieeinheit eingesetztem Biomethan verwendet. Diese Werte sind der europäischen Richtlinie 2018/2001 zu entnehmen [5]. Aus der Tabelle „Typische Werte und Standardwerte für Biomethan“ wird nach Standardwerten der Europäischen Kommission festgelegt, dass bei der Erzeugung von Biomethan aus Gülle negative Emissionen von -0,103 to $CO_{2,eq}$ pro GJ durch Vermeidung von Methanemissionen angerechnet werden dürfen. Da der Reformierungsprozess einen Wirkungsgrad von 60 % aufweist, ist der energiespezifische Emissionswert des produzierten Wasserstoffs pro produzierter Energieeinheit negativer als der des Methans [6]. Es ergibt sich demnach hier eine spezifische Emission von $e_{H_2} = -0,172$ to pro erzeugten GJ Wasserstoff. Diese Rechnung ist hier vereinfacht, da in der Bilanzierung realer Anlagen zusätzlich Strom für die Anlagentechnik und Kompression eingesetzt werden muss, der ebenfalls positive, negative oder beim Einsatz von PV oder Windstrom auch keine THG-Emissionen in die Bilanz einbringt. Im Falle eines

Straßentransportes des Wasserstoffes zum Ort der Inverkehrbringung müsste auch dieser bilanziert werden. Die beiden Faktoren sind jedoch stark projektabhängig und werden in der vorliegenden Studie daher vernachlässigt.

Die mögliche THG-Minderung wurde für den Einsatz im Verkehrssektor ermittelt, also im Verhältnis zu den Emissionen beim Einsatz von Dieselfahrzeugen im identischen Betrieb. Als gängiger Anwendungszweck wurde der Busverkehr gewählt, wobei der verringerte Energieeinsatz beim Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen durch Vergleich der üblichen Verbräuche von $c_{Bus,Diesel} = 40$ l Diesel, also 1,41 GJ sowie $c_{Bus,H2} = 6$ kg Wasserstoff, also 0,72 GJ auf 100 km Laufleistung einberechnet werden muss. Der zu verrechnende THG-Emissionsfaktor zur Einschätzung der vermiedenen Deselemissionen entspricht dann:

$$F_{THG,Diesel} = \frac{c_{Bus,Diesel}}{c_{Bus,H2}} = 1,96 \quad (16)$$

Ein Dieselbus im Linienverkehr verbraucht dementsprechend rund die doppelte Energiemenge, dies liegt im Wesentlichen an der höheren Effizienz des Brennstoffzellenantriebes, gekoppelt mit der Möglichkeit, über die Fahrbatterie zu rekuperieren. Die spezifischen Emissionen e_{Diesel} von Diesel werden mit dem Standardwert 0,0941 t CO₂ eq pro GJ verrechnet [5], demnach kann die gesamte erreichbare THG-Minderung $E_{Pot,min,ges}$ des erhobenen Wasserstoffpotenzials beim Einsatz in Brennstoffzellenbussen in Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr wie folgt bestimmt werden:

$$E_{Pot,min,ges} = m_{Pot,H2} (F_{THG,Diesel} \cdot e_{Diesel} - e_{H2}) \quad (17)$$

Abschließend wurde zur Veranschaulichung ermittelt, wie viele Wasserstoffbusse im durchschnittlichen Linieneinsatz durch das zuvor errechnete Gesamtpotenzial an biogenem Wasserstoff $m_{Pot,H2}$ versorgt werden könnten. Für die Berechnung relevante Daten sind hier wieder der Verbrauch $c_{Bus,H2}$ in kg pro 100 km und die typische Laufleistung $L_{Bus,H2}$ von 90.000 km pro Jahr, die jährlich von einem Linienbus Bus zurückgelegt wird [17].

$$n_{Bus,H2} = \frac{m_{Pot,H2}}{L_{Bus,H2} \cdot c_{Bus,H2}} \quad (18)$$

Hinweis: Die Emissionseinsparung wurde mit Hilfe von realistischen Vergleichswerten erhoben und entspricht nicht dem Erlössystem des THG-Quotenhandels. In diesem wird der Effizienzfaktor bei Wasserstofffahrzeugen derzeit zum einen fehlerhaft verrechnet und zum anderen für biogenen Wasserstoff nicht anerkannt.

4. Ergebnisse

4.1 Gesamter Tierbestand und resultierendes Gaserzeugungspotenzial

Die Bestimmung des Tierbestandes für die jeweiligen Tiergattungen erfolgte durch die Anwendung der Formel (7) verwendet. Somit ergab sich der in abelle 1 und Abbildung 4 dargestellte Tierbestand:

abelle 1: Gesamter Tierbestand in der Region Hochfranken

Tiergattung	$n_{i,Hof}$	$n_{i,LK Hof}$	$n_{i,Wun}$	$n_{i,ges}$
Rinder	-	12.032	5.482	17.514
Milchkühe	1.851	17.409	7.163	24.572
Jungrinder	-	3.347	1.652	4.999
Kälber	-	8.974	3.633	12.607
Schweine	1.421	29.577	8.419	39.417
Schafe	77	3.002	874	3.876
Hühner	245	12.177	4.265	16.687
Pferde	77	622	402	1.101

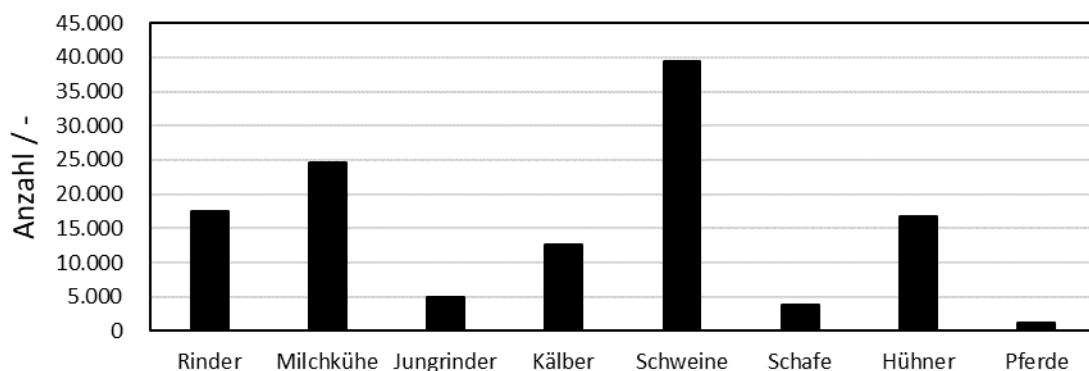


Abbildung 4: Gesamter Tierbestand in der Region Hochfranken (Stand 2022)

Im Folgenden wurde mit Hilfe von Gleichung (8) der mögliche Energieertrag Q_n der unterschiedlichen Tiergattungen bestimmt und zum Gesamtpotenzial aufsummiert:

Tabelle 2: Möglicher Energieertrag der unterschiedlichen Tiergattungen und Gesamtpotenzial

Tiergattung	$V_{CH_4,i}$ in $Nm^3 a^{-1}$	$n_{i,ges}$	Q_i in $GWh a^{-1}$
Rinder	185	17.514	32,30
Milchkühe	289	24.572	70,80
Jungringer	55,5	4.999	3,69
Kälber	74	12.607	6,98
Schweine	19	39.417	7,47
Schafe	81	3.876	3,12
Hühner	164 pro 100 Tiere	16.687	0,27
Pferde	388	1.101	4,26
Summe ($Q_{Pot,ges}$)			128,89

4.2 Bereits in Biogasanlagen eingesetzte Reststoffe

Die Ermittlung des Volumens für die jeweiligen Substratanteile $V_{t,i}$ erfolgte unter Anwendung von Gleichung (10) mit typischen Werten aus der Literatur [16]. Die jeweiligen Werte sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Typische Gaserträge der jeweiligen Substratanteile

Substrat		G_i in $\text{Nm}^3 \text{ t}_{\text{input}}^{-1}$	f_{CH_4} in Vol.-%	$G_{\text{CH}_4,i}$ in $\text{Nm}^3 \text{ t}_{\text{input}}^{-1}$
Gülle	G	18	55	9,90
Mist	M	75	60	45,00
Maissilage	MS	202	52	105,04
Grassilage	GS	208	54	112,32

Zur Bestimmung des bereits in Biogasanlagen eingesetzten Energiepotenzials $Q_{\text{RS,BG,ges}}$ aus Reststoffen kam die Formel (11) zum Einsatz. In Tabelle 4 sind die Einzelwerte für die Kreisfreie Stadt Hof, in Tabelle 5 die Einzelwerte für den Landkreis Hof und in Tabelle 6 die Einzelwerte für den Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge aufgeführt. Mit einem Stern markierte Anlagen sind in der Substratmischung geschätzt, da keine Daten erhoben werden konnten.

Tabelle 4: In der Kreisfreien Stadt Hof verwertete Reststoffenergie

Anlage	P in kW	t in h	f_G in %	f_M in %	f_{MS} in %	f_{GS} in %	$Q_{\text{RS,BG,el}}$ in MWh a^{-1}
1	1.050	3.752	35,0	-	45,0	20,0	186,49
2	1.160	2.724	35,0	-	45,0	20,0	149,58
3	1.200	3.017	35,0	-	45,0	20,0	171,38
4	340	7.584	35,0	-	40,0	25,0	121,46
5	160	8.355	45,0	-	27,5	27,5	92,72
6	190	7.254	33,0	-	59,5	7,5	60,69
7	251	7.321	33,0	-	59,5	7,5	80,92
Summe:							863,25

Tabelle 5: Im Landkreis Hof verwertete Reststoffenergie

Anlage	P in kW	t in h	f_G in %	f_M in %	f_{MS} in %	f_{GS} in %	$Q_{\text{RS,BG,el}}$ in MWh a^{-1}
8	265	7.471	35,0	-	32,5	32,5	92,57
9	526	6.666	0	-	50	50	0
10*	373	4.080	35,0	-	65,0	-	73,50
11	274	2.618	40,0	-	35,0	25,0	41,21
12	290	3.633	40,0	-	30,0	30,0	60,32
13	220	7.456	40,0	-	40,0	20,0	94,91
14*	345	7.283	35,0	-	65,0	-	121,36
15	190	7.345	60,0	-	-	40,0	162,96
16	191	7.625	40,0	10,0	30,0	20,0	197,34
17	325	3.800	50,0	-	25,0	25,0	103,11
18*	720	6.403	35,0	-	65,0	-	222,66

19	735	3.519	-	20,0	30,0	50,0	240,80
20	75	8.640	90,0	10,0	-	-	648,00
21	950	3.169	45,0	-	20,0	35,0	207,06
22	330	7.293	-	-	50,0	50,0	0
23	330	4.323	-	-	50,0	50,0	0
24	1.249	3.537	-	35,0	65,0	-	828,06
25	900	4.007	35,0	-	30,0	35,0	168,21
26	75	7.913	90,0	10,0	-	-	593,48
27	999	4.933	30,0	-	24,0	46,0	301,29
28	75	8.753	90,0	-	10,0	-	525,32
29	75	7.781	99,0	-	0,5	0,5	177,40
30*	860	4.271	35,0	-	65,0	-	290,44
31*	75	8.438	90,0	-	10,0	-	155,54
32	540	1.882	58,0	4,0	13,0	25,0	74,50
33*	380	4.059	35,0	-	65,0	-	474,12
34	75	8.396	97,0	-	3,0	-	75,97
35	160	8.031	40,0	-	60,0	-	244,89
36	1.346	4.059	34,0	-	33,0	33,0	174,34
37	75	8.704	80,0	-	10,0	10,0	109,33
38	290	8.063	35,0	-	32,5	32,5	85,77
39	400	5.001	33,0	-	32,0	35,0	124,24
40	440	4.932	40,0	-	30,0	30,0	42,20
41	110	5.452	45,0	-	40,0	15,0	132,08
42	380	4.112	50,0	-	25,0	25,0	572,70
43	75	7.636	100,0	-	-	-	292,65
44*	75	8.502	90,0	-	10,0	-	301,29
Summe							7.891,62

Tabelle 6: Im Landkreis Wunsiedel im Fichtelgebirge verwertete Reststoffenergie

Anlage	P in kW	t in h	f _G in %	f _M in %	f _{MS} in %	f _{GS} in %	Q _{RS,BG,el} in MWh a ⁻¹
45	610	3.559	32,5		14,5	53,0	89,58
46	485	4.130	32,5	-	14,5	53,0	82,65
47	460	3.557	50,0	-	50,0	-	140,93
48	1.310	3.520	25,0	-	50,0	25,0	137,38
49	990	2.569	37,4	-	20,9	41,7	180,46
50	600	2.763	15,0	-	25,0	60,0	25,88
51	800	4.433	-	60,0	20,0	20,0	1.358,74
52	780	7.457	30,0	-	50,0	20,0	221,60
53	630	3.913	23,0	6,0	50,0	21,0	151,31
54	75	8.783	80,0	-	-	20,0	171,71
55	75	8.475	90,0	2,0	4,0	4,0	336,97
56	310	7.286	34,0	-	40,0	16,0	120,00
57	350	5.466	-	33,0	40,0	27,0	325,83
58	600	3.956	-	-	50,0	50,0	-
59	1.200	2.987	-	50,0	35,0	15,0	1.059,61
60	430	7.534	40,0	-	44,0	16,0	188,25
61	760	4.290	35,0	-	-	65,0	147,73
62	600	5.576	40,0	-	54,0	6,0	196,51
Summe							4.935,13

Die insgesamt heute schon zur Energieerzeugung eingesetzte Primärenergiemenge (Biomethan) kann dann mit Gleichung 13 bestimmt werden:

$$Q_{RS,BG,ges} = \frac{\sum Q_{RS,BG,el}}{\eta_{el}} = 34,23 \text{ GWh a}^{-1} \quad (19)$$

Somit kann das gesamte nicht genutzte Energiepotenzial aus Reststoffen der Region Hochfranken wie folgt geschätzt werden:

$$Q_{Pot,u} = Q_{Pot,ges} - Q_{RS,BG,ges} = 94,66 \text{ GWh a}^{-1} \quad (20)$$

In Abbildung 5 erfolgt eine Gegenüberstellung bereits genutzter und ungenutzter Reststoffpotenziale aus der Tierhaltung in der Region Hochfranken:

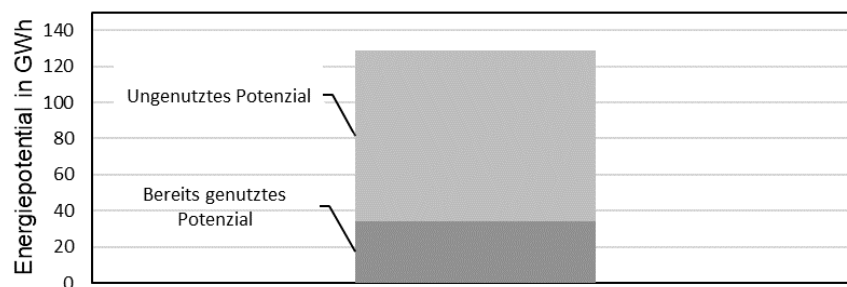


Abbildung 5: Genutztes und ungenutztes Reststoffpotenzial aus der Tierhaltung in der Region Hochfranken

4.3 Resultierendes Wasserstoffproduktions- und THG-Minderungspotenzial

Aus den in Abschnitt 4.2 lässt mit Hilfe von Gleichung (15) sich ein Wasserstoff-Produktionspotenzial von

$$m_{Pot,H2} = \frac{Q_{Pot,u} \cdot \eta_{ref}}{H_{u,H2}} = 1704 \text{ to a}^{-1} \quad (21)$$

abschätzen. Diese Menge ist durch Einsetzen der Standardwerte für Emissionen im Vergleich zum Einsatz von Dieselfahrzeugen mit einer THG-Minderung von

$$E_{Pot,min,ges} = m_{Pot,H2} (F_{THG,Diesel} \cdot e_{Diesel} - e_{H2}) = 73.205,4 \text{ to a}^{-1} \quad (22)$$

verbunden. Zum Vergleich: Dies entspricht ca. 115 % der gesamten Emissionen des Verkehrssektors der Stadt Hof. Zur Veranschaulichung wurde abschließend anhand von Gl. (18) berechnet, wie viele durchschnittliche Linienbusse mit dem identifizierten Potenzial betrieben werden könnten.

$$n_{Bus,H2} = \frac{m_{Pot,H2}}{L_{Bus,H2} \cdot c_{Bus,H2}} = 316 \text{ (gerundet)} \quad (23)$$

Hierzu muss erwähnt sein, dass im Überlandverkehr eingesetzte Biomethanfahrzeuge in etwa die gleiche Systemeffizienz und somit die gleiche Reichweite und Klimabilanz erreichen würden, wie lokal emissionsfreie Wasserstofffahrzeuge im Stadtverkehr. Eine angemessene Mischung der Technologien nach Einsatzzweck ist demnach zu empfehlen.

5. Zusammenfassung und Fazit

In der vorliegenden Studie zur Potentialermittlung für Biomethan- bzw. Wasserstoffproduktion aus biogenen Reststoffen aus der Tierhaltung für die Region Hochfranken wurden die Gaserzeugungs- und Wasserstoffproduktionspotenziale aus Reststoffen der regionalen Tierhaltung analysiert. Zu Beginn wurde die Methodik zur Erhebung des Tierbestands, des Bioanlagenbestands sowie zur Berechnung des Wasserstoffproduktions- und THG-Minderungspotenzials beschrieben.

Der Tierbestand umfasste dabei Rinder, Milchkühe, Jungrinder, Kälber, Schweine, Schafe, Hühner und Pferde. Die Ermittlung der Gesamtanzahl jeder Tiergattung erfolgte durch Addition der Tiere in der Kreisfreien Stadt Hof, im Landkreis Hof und im Landkreis Wunsiedel, wobei das Gaserzeugungspotential jeder Tiergattung anhand von Literaturwerten für die Methanausbeute und Methanenergiegehalt berechnet wurde.

Die Erfassung der Biogasanlagen fand umfasste die eingetragenen Volllaststunden des Jahres 2021 und die eingetragene elektrische Leistung, dazu wurden die Substratzusammensetzungen der Anlagen bei den Anlagenbetreibern erfragt und nicht zugängliche Informationen durch geeignete Annahmen geschätzt. Das Volumen der Substratanteile wurde anhand von Gasertrag und Methangehalt nach Literaturwerten bestimmt und anschließend die Energiemengen der Reststoff- und NaWaRo-Anteile in den Anlagen berechnet. Die Primärenergie der Gaserzeugung aus bereits verwerteten Reststoffen wurde dann aus dem üblichen Anlagenwirkungsgrad von 40 % bei der Stromerzeugung ermittelt. Daraufhin folgte die Berechnung der ungenutzten Energie aus Reststoffen anhand der Differenz aus Potenzial und berechnetem heutigem Einsatz und des daraus resultierenden Wasserstoffproduktionspotenzials beim Einsatz der Dampfreformierung von Biogas. Es wurde ein ungenutztes Energiepotenzial von jährlich rund 95 GWh in Form von Biomethan ermittelt, aus dem ca. 1700 Tonnen erneuerbarer Wasserstoff pro Jahr gewonnen werden könnte.

Anschließend wurde das THG-Minderungspotenzial durch die Vermeidung von Methanemissionen bei der Nutzung dieser Reststoffe sowie die zusätzlichen Einsparungen durch die Substitution von Diesel im Straßenverkehr berechnet. Dies erfolgte am Beispiel des Linienbusverkehrs und ergab eine mögliche THG-Minderung von rund 73.000 Tonnen pro Jahr. Zur Veranschaulichung wurde ergänzend errechnet, dass mehr als 300 Busse im üblichen Linienbetrieb mit dieser erneuerbaren Treibstoffmenge versorgt werden können.

6. Literaturverzeichnis

- [1] United Nations, „Paris Agreement,“ Paris, 2015.
- [2] BMUB, Referat KI I 1 , „Klimaschutzplan 2050,“ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin, 2022.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, „Deutsche Klimaschutzpolitik,“ [Online]. Available: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-deutsche-klimaschutzpolitik.html>. [Zugriff am 3 April 2023].
- [4] J. Appelhans, C. Böttcher, K. Keßler, C. Mielke, A. Nowack, K. Purr, A. Schwetje, D. Sorg und J. Tambke, „Unterschätztes Treibhausgas Methan - Queuillen, Wirkungen, Minderungsoptionen,“ Umweltbundesamt, Dessau-Rößlau, 2022.
- [5] E. Parlament, *Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen*, Brüssel: Europäische Union, 2018.
- [6] A. Gradel, „Wasserstoff aus Biogas,“ BtX energy GmbH, Hof, 2023.
- [7] P. Smirniotis und G. Reddy, *Water Gas Shift Reaction - Research Developments and Applications*, Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [8] D. Bathen und M. Breitbach, *Adsorptionstechnik*, Heidelberg: Springer, 2001.
- [9] K.-H. Grote, *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*, Heidelberg: Springer, 2011.
- [10] Bayerisches Landesamt für Statistik, „Viehbestände in Bayern 2022,“ Fürth, 2022.
- [11] Bayerisches Landesamt für Statistik, *Statistik Kommunal 2020 - Landkreis Hof 09475*, Fürth, 2021.
- [12] Bayerisches Landesamt für Statistik, *Statistik Kommunal 2020 - Kreisfreie Stadt Hof 09464*, Fürth, 2021.
- [13] Bayerisches Landesamt für Statistik, *Statistik Kommunal 2020 - Landkreis Wunsiedel i.Fichtelgebirge 09479*, Fürth, 2021.
- [14] „Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.,“ [Online]. Available: <https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen>. [Zugriff am 6 Dezember 2022].
- [15] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, „Energieatlas Bayern,“ [Online]. Available: <https://www.karten.energieatlas.bayern.de/>. [Zugriff am 13 Dezember 2022].
- [16] Archea Service GmbH, „Gaserträge und Nährstoffgehalte,“ Eidhoven, 2024.
- [17] P. Glonner, Interviewee, *Artuhr Bus*. [Interview]. 14 April 2023.