



Technisches Biogaspotenzial aus landwirtschaftlicher Biomasse in Bayern

3/2025
ISSN 1611 4159



Impressum

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan
Internet: www.LfL.bayern.de

Redaktion: Institut für Landtechnik
Vöttinger Straße 36, 85354 Freising
E-Mail: Landtechnik@LfL.bayern.de
Telefon: 08161 8640-3451

Titelfoto: ALB Bayern e.V.

1. Auflage: November 2025

Druck: www.saxoprint.de

Schutzgebühr: 10,00 Euro



LfL

**Technisches Biogaspotenzial aus
landwirtschaftlicher Biomasse
in Bayern**

**Kleinräumig differenzierte Analyse:
aktuell und in Szenarien
für das Jahr 2030**

**Mathias Effenberger
Matthias Steindl
Thomas Venus**

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|--|-----------|
| Impressum | 2 |
| Inhaltsverzeichnis | 5 |
| Abbildungsverzeichnis | 6 |
| Tabellenverzeichnis | 7 |
| Kurzfassung | 8 |
| Abstract | 10 |
| 1 Hintergrund | 12 |
| 2 Begriffsbestimmungen | 13 |
| 3 Thematische Hinführung | 14 |
| 4 Erläuterung der Berechnungsmethoden | 18 |
| 4.1 Inventarisierung der Biomasse..... | 18 |
| 4.1.1 Prinzipielle Verfügbarkeit verschiedener Biomassen..... | 19 |
| 4.1.2 Geographische Bezugsräume..... | 19 |
| 4.1.3 Biomassebedarf für die Biogaserzeugung..... | 21 |
| 4.1.4 Biomassebedarf in der Tierhaltung..... | 25 |
| 4.1.5 Biomasse aus pflanzlicher Produktion..... | 26 |
| 4.1.6 Biomasse aus der Tierhaltung..... | 28 |
| 4.2 Bilanzierung des technischen Biomassepotenzials..... | 29 |
| 4.3 Technisches und genutztes Methanpotenzial..... | 30 |
| 5 Betrachtung von Szenarien und Sensitivitäten | 32 |
| 5.1 Annahmen in den Szenarien für die Biomasse aus pflanzlicher Produktion..... | 32 |
| 5.2 Annahmen in den Szenarien für den Anfall und Bedarf von Biomasse in der Tierhaltung..... | 34 |
| 5.3 Annahmen in den Szenarien für die Entwicklung der Biogaserzeugung und -nutzung..... | 36 |
| 5.4 Sensitivitätsanalyse..... | 36 |
| 6 Vorstellung und Einordnung der Ergebnisse | 38 |
| Literaturverzeichnis | 45 |

Abbildungsverzeichnis

Seite

| | |
|---|----|
| Abb. 1:.. Schematischer Rechenweg zur Bestimmung des technischen Methan- und Stromerzeugungspotenzials aus Biogas von landwirtschaftlichen Substraten..... | 18 |
| Abb. 2:.. Zuordnung der Gemeinden zu den vier unterschiedenen landwirtschaftlichen Erzeugungsgebieten in Bayern..... | 20 |
| Abb. 3:.. Schema zur Rückrechnung des Biomasseverbrauchs je Biogasanlage mit Angaben zu verwendeten Kennwerten. | 22 |
| Abb. 4:.. Schema zur Identifizierung der relevanten Biogasanlagenstandorte aus den Daten des Energieatlas Bayern (verändert nach Krautkremer et al. 2024)..... | 23 |
| Abb. 5:.. Verteilung der Methanertragsparameter für die verwendeten Stichproben von BGA, landwirtschaftlichen Erzeugungsgebieten und Anlagentypen. | 24 |
| Abb. 6:.. Aufteilung des mittleren Substratmix auf vier Biomassekategorien, differenziert nach landwirtschaftlichen Erzeugungsgebieten und Anlagentypen. | 24 |
| Abb. 7:.. Schema zur Berechnung des Biomasseverbrauchs für Futtermittel in der Tierhaltung (verändert nach Krautkremer et al. 2024)..... | 25 |
| Abb. 8:.. Schema zur Berechnung des Biomasseverbrauchs für Einstreu in der Tierhaltung (verändert nach Krautkremer et al. 2024). | 26 |
| Abb. 9:.. Schema zur Berechnung der pflanzlichen Biomasse aus Haupt- und Nebenprodukten. | 27 |
| Abb. 10: Schema zur Berechnung des Biomasseanfalls aus der Tierhaltung. | 28 |
| Abb. 11: Schematische Darstellung der Bilanzierung des technischen Biomassepotenzials für die Biogasproduktion in Import- und Exportgemeinden unter Berücksichtigung des Biomassebedarfs für die Tierhaltung..... | 30 |
| Abb. 12: Aufteilung der aktuellen Biogaserzeugung bzw. des technischen Biogaspotenzials auf verschiedene Kategorien von Biomasse aus der Landwirtschaft. | 39 |
| Abb. 13: Grafische Darstellung der Schätzwerte aus dem linearen Regressionsmodell nach Steindl et al. (2025) für die Sensitivität des Technischen Methanpotenzials T _{MetPot} gegenüber einer Veränderung der betreffenden Variable um ein Prozent. Lesebeispiel: Verringert sich die produktive LF um 1 % und wird aus der Tierhaltung frei werdende Biomasse nicht für die Biogasproduktion berücksichtigt, so nimmt T _{MetPot} schätzungsweise um 1,4 % ab; wird Biomasse aus der Tierhaltung zusätzlich berücksichtigt, sinkt T _{MetPot} nur um ca. 1,3 %. Dargestellt sind nur die signifikanten Zusammenhänge bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit <0,01..... | 40 |
| Abb. 14: Technisches Methanpotenzial aus Biogas in der „Bayernplan-Studie“ (2015) sowie in der aktuellen Studie (2022 und 2030), differenziert nach Biomassekategorien; für das Bezugsjahr 2030 stellen die Säulen das Szenario „Mittel“ dar, die Fehlerbalken den Wertebereich aller drei Szenarien; die Hilfslinien und Pfeile illustrieren den direkten Vergleich des technischen Potenzials 2015 vs. 2022..... | 42 |
| Abb. 15: Aufteilung des technischen Methanpotenzials aus Ernte-Nebenprodukten laut aktueller Studie bzw. Bayernplan-Studie. | 44 |

Tabellenverzeichnis

Seite

| | | |
|---------|--|----|
| Tab. 1: | Verlauf der Anbauflächen nachwachsender Rohstoffe zur Biogaserzeugung in Deutschland von 2013 bis 2023, Angaben in 1.000 ha (nach: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2025)..... | 16 |
| Tab. 2: | Aufteilung der Substratgrundlage des in Bayern zusätzlich erschließbaren Methanpotenzials laut der Potenzialanalyse aus dem Jahr 2012 (nach: Aschmann et al. 2013)..... | 17 |
| Tab. 3: | Kategorisierung der landwirtschaftlichen Biomasse nach Herkunft, prinzipieller Verfügbarkeit für die Biogaserzeugung sowie Nutzungskonkurrenz. | 19 |
| Tab. 4: | Übersicht zu den geographischen Bezugseinheiten für die Potenzialberechnung. | 21 |
| Tab. 5: | Übersicht über divergierende Annahmen in den Szenarien, welche den Biomasseanfall aus pflanzlicher Produktion beeinflussen. | 33 |
| Tab. 6: | Für die Szenarienbildung geschätzte jährliche Veränderungsdaten des Viehbestands von Rindern und Schweinen. | 34 |
| Tab. 7: | Übersicht über divergierende Annahmen in den Szenarien, welche den Biomasseanfall und -bedarf der Tierhaltung beeinflussen. | 35 |
| Tab. 8: | Aktuell und in den Szenarien für das Jahr 2030 ungenutztes Biogaspotenzial, absolut und relativ zum aktuellen technischen Potenzial, unterteilt in verschiedene Kategorien von Biomasse aus der Landwirtschaft. | 38 |
| Tab. 9: | Nutzung und erschließbares bzw. technisches Potenzial (Schwankungsbereich) von Biogas aus landwirtschaftlicher Biomasse gemäß „Bayernplan-Studie“ und aktueller Potenzialstudie; alle Angaben in Mio. m ³ Methan..... | 41 |

Kurzfassung

Mit dem **Energie-Atlas Bayern** (<https://www.energieatlas.bayern.de/>) steht ein Web-Portal mit umfassenden Informationen und Werkzeugen zur Nutzung erneuerbarer Energien (EE) in Bayern zur Verfügung, darunter kartenbasierte Anwendungen wie das „Mischpult Energiemix Bayern vor Ort“, mit dem sich die technischen Potenziale für die Strom- und Wärmeerzeugung aus EE bis auf Gemeindeebene darstellen lassen. Für den Energieträger Biogas fehlte dort bislang eine räumlich und nach verschiedenen Biomassen differenzierte Datengrundlage. Daher beauftragte das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) im Jahr 2023 das Institut für Landtechnik der LfL sowie zwei weitere wissenschaftliche Institute mit einer **Studie zur detaillierten Bestimmung des technischen Biogaspotenzials aus der Land- und Abfallwirtschaft, einschließlich von Szenarioanalysen unter Nachhaltigkeitskriterien**. Mit den Ergebnissen aus diesem Projekt wurde im Jahr 2024 die Datengrundlage zu Biogas im Energie-Atlas aktualisiert. Der vorliegende Beitrag in der LfL-Schriftenreihe erläutert die Methodik der Potenzialstudie in ausführlicher und allgemeinverständlicher Form und ordnet die Ergebnisse fachlich ein.

Der **Begriff des technischen Potenzials** bezeichnet in der Fachsprache diejenige Teilmenge des theoretischen Potenzials einer Ressource, die unter Berücksichtigung technischer, struktureller und gesetzlicher Beschränkungen nutzbar ist. Das wirtschaftliche Potenzial wiederum beschreibt den Anteil, der unter aktuellen ökonomischen Bedingungen erschlossen werden kann, während das erschließbare Potenzial die tatsächlich genutzte Menge umfasst.

Biogas trägt in Bayern etwa elf Prozent zur gesamten Stromerzeugung bei. Da die Stromerzeugung aus Biogas im Gegensatz zu fluktuierenden EE wie Photovoltaik und Windkraft gesteuert werden kann, ist sie von großer Bedeutung für die Netzstabilität. Wie mehrfach vorgerechnet wurde, könnten in Deutschland durch vierfache Überbauung der Stromerzeugungsaggregate auf Biogasanlagen rund 12 GW Regelleistung im Stromnetz zur Verfügung gestellt werden, womit erheblich weniger Gaskraftwerke zugebaut werden müssten als derzeit von der Bundesregierung geplant.

Die **Frage, aus welchen Substraten zukünftig Biogas erzeugt werden soll**, wird seit vielen Jahren intensiv diskutiert. Die hierzulande in Bezug auf den energetischen Anteil noch dominierende Biogaserzeugung aus gezielt angebauten Energiepflanzen ist aufgrund der Konkurrenz um Anbauflächen, der erheblichen Umweltwirkungen und dem insgesamt begrenzten und zudem unsicheren Effekt für den Klimaschutz sehr umstritten. Politisch angestrebt wird ein Ausbau der Biogaserzeugung aus **Wirtschaftsdüngern, Ernte-Nebenprodukten und organischen Abfällen („Biomüll“)**.

Der vorliegende Bericht befasst sich mit dem **Biogaspotenzial aus landwirtschaftlicher Biomasse in Bayern**, wie es in der oben erwähnten aktuellen Studie erhoben wurde. Hierfür wurde die landwirtschaftliche Biomasse in vier grundlegende Kategorien unterteilt: Grünfütter, Marktfrüchte, (Ernte-)Nebenprodukte und Wirtschaftsdünger. **Erzeugung und Verbrauch** dieser Biomassen wurden auf Gemeindeebene analysiert, wobei **regionale Unterschiede** bei den Erträgen, den Anbaukulturen und dem Substratmix der Biogasanlagen berücksichtigt wurden. Für Biomasse aus pflanzlicher Erzeugung wurden die Erträge und der Anfall von Ernte-Nebenprodukten unter Berücksichtigung der Flächennutzung und produktionseinschränkender Maßnahmen berechnet. In der Tierhaltung wurden der Anfall von Wirtschaftsdüngern sowie der Bedarf für Futtermittel und Einstreu basierend auf den Tierbeständen und der Struktur der Haltungssysteme bilanziert. Der Biomassebedarf für Biogasanlagen wurde aus der erzeugten elektrischen Energie beziehungsweise im Falle der

Biogas-Aufbereitungsanlagen aus der installierten Einspeiseleistung und der Verfügbarkeit (Kapazitätsfaktor) abgeleitet. Das technische Methanpotenzial aus Biogas als Differenz von Produktion und Verbrauch einer bestimmten Biomasse wurde für alle Gemeinden einzeln bestimmt, wobei innerhalb des Bilanzraumes Bayern Überschüsse und Defizite an einzelnen Biomassen zwischen den Gemeinden ausgeglichen wurden.

Zusätzlich zur aktuellen Nutzung von Biogas (Bezugsjahr 2021) und zum aktuellen technischen Potenzial (Bezugsjahr 2022) wurde das erwartete technische Potenzial im Jahr 2030 für **drei verschiedene Szenarien** ausgewertet:

- **"Hoch"**: für die Biogaserzeugung günstige Entwicklungen,
- **"Mittel"**: Fortschreibung aktueller Trends und
- **"Niedrig"**: die Biogaserzeugung einschränkende Entwicklungen.

Die Szenarien berücksichtigen Faktoren wie Flächenverbrauch für Siedlungen und Verkehrswege, Wiedervernässung von Moorflächen, Stilllegungsquoten und freiwillige Naturschutzmaßnahmen. Für die Tierhaltung werden in den Szenarien die Viehbestände auf Basis der Trends in der jüngeren Vergangenheit fortgeschrieben bzw. verstärkt. Die Veränderung in der tatsächlichen Biogasnutzung wird ausgehend vom aktuell genutzten Methanpotenzial projiziert: keine Veränderung im Szenario "Hoch", -5 % im Szenario "Mittel" und -15 % im Szenario "Niedrig". Ergänzend werden Ergebnisse aus einer Sensitivitätsanalyse vorgestellt, die nicht Bestandteil des obengenannten Forschungsprojekts war. Außerdem wird ein Vergleich der Ergebnisse aus der aktuellen Potenzialstudie mit denjenigen aus der „Bayernplan-Studie“ von 2013 vorgenommen, womit beurteilt werden kann, wie realistisch die damals getroffenen Annahmen zum erschließbaren Potenzial waren.

Das **aktuelle technische Methanpotenzial** aus landwirtschaftlicher Biomasse in Bayern (Bezugsjahr 2022) beträgt **3.026 Mio. m³**. Bis 2030 könnte das technische Biogaspotenzial **je nach Szenario auf 94 % bis 113 % des Wertes im Bezugsjahr 2022 steigen**.

Die für das **Bezugsjahr 2021 berechnete Produktionsmenge von 1.689 Mio. m³ Methan** aus Biogas **entspricht rund 56 % des berechneten technischen Potenzials**. Diese Biogasproduktion basiert **aktuell zu rund 80 % auf Grünfutter und Marktfrüchten vom Ackerland**, d. h. auf Biomasse, welche im Prinzip in Nutzungskonkurrenz mit der Nahrungs- und Futtermittelerzeugung steht. Gemäß Randbedingung für die Potenzialanalyse soll die Nutzung solcher Biomasse zur Biogaserzeugung das aktuelle Niveau nicht übersteigen und bildet damit einen Anteil von rund 45 % am gesamten technischen Biogaspotenzial. Während rund 12 % des aktuell genutzten Methanpotenzials aus Wirtschaftsdüngern erzeugt werden, stellen diese Substrate rund 27 % des aktuellen und in den Szenarien für das Jahr 2030, auch bei abnehmenden Viehbeständen, noch 21 bis 23 % des technischen Potenzials. Die Nutzung des Aufwuchses von Dauergrünland hat aktuell einen Anteil von 7 % an der Biogaserzeugung, was ungefähr dem entsprechenden Anteil am gesamten technischen Potenzial entspricht; zukünftig könnte sich der Beitrag dieser Biomasse zum technischen Biogaspotenzial in etwa verdoppeln. Bei den Nebenprodukten, denen 14 bis 19 % des technischen Potenzials zugeschrieben werden, ist die Nutzung zur Biogaserzeugung bisher marginal und kann zugleich nicht genau bestimmt werden.

Der zentrale Wert für das technische Methanpotenzial aus Biogas ist in der aktuellen Studie rund 7 % höher als in der Bayernplan-Studie. Angesichts der komplexen Berechnungen und methodischer Unterschiede erscheint diese Abweichung moderat und plausibel. Man kann daraus schlussfolgern, dass der verfügbare **Wissensstand zum technischen Biogaspotenzial in Bayern gut belastbar** ist. Um auf dieser Basis das erschließbare Potenzial verlässlich abzuschätzen, wären hingegen gesonderte Untersuchungen erforderlich.

Abstract

The web portal “Energieatlas Bayern” (<https://www.energieatlas.bayern.de/>) provides comprehensive information and tools for the use of renewable energies (RE) in Bavaria, including map-based applications such as the “Mischpult Energiemix Bayern vor Ort” which allows the technical potentials for electricity and heat generation from RE to be displayed at the municipal level. Since spatial and biomass-differentiated data for the energy carrier biogas were lacking, the Bavarian State Office for the Environment (LfU) commissioned the Institute for Agricultural Engineering at the Bavarian State Research Center for Agriculture (LfL) and two other scientific institutes in 2023 to conduct a **study on the detailed determination of the technical biogas potential from agriculture and waste management, including scenario analyses based on sustainability criteria**. In 2024, the “Energieatlas Bayern” was updated with the results from this project.

This publication by LfL aims to explain the methodology of the original study in detail and in an understandable manner, and to contextualize the results.

The term **“technical potential”** refers to the portion of the theoretical potential of a resource that is considered usable under the given technical, structural, and legal restrictions. Furthermore, the economic potential describes the share of the theoretical potential that can be exploited under current economic conditions, while the exploitable potential encompasses the actual utilized amount.

In Bavaria, biogas contributes about eleven percent to total electricity generation. Since electricity generation from biogas can be controlled, unlike fluctuating RE sources such as photovoltaics and wind power, it is of great importance for grid stability. As repeatedly calculated, Germany could provide around 12 GW of balancing power in the electricity grid by quadrupling the capacity of biogas plants and, in this way, reduce the need for new gas-fired power plants compared to current federal government plans.

For many years, there has been an **intensive debate on the selection of input materials for biogas production**. In Germany, biogas production is still predominantly based on cultivated energy crops. Yet this practice is highly controversial due to competition for arable land, significant environmental impacts, and the overall limited and uncertain effect on climate protection. Consequently, an expansion of **biogas production from manure, harvest by-products, and organic waste (“biowaste”)** is being pursued by federal politics.

This report deals with the **biogas potential from agricultural biomass in Bavaria**, as determined in the aforementioned study. For this purpose, agricultural biomass was divided into four basic categories: green fodder, market crops, (harvest) by-products, and animal manure. The **production and consumption** of these biomasses were analyzed at the municipal level, **considering regional differences** in yields, crop types, and input mixes of biogas plants. For plant-based biomass, yields and the amount of harvest by-products were calculated considering land use and agri-ecological measures limiting production. In animal husbandry, the production of manure and the demand for feed and bedding were balanced based on livestock numbers and the structure of husbandry systems. The biomass demand for biogas plants was derived from the electricity generated or, in the case of biogas upgrading plants, from the installed feed-in capacity and availability (capacity factor). The technical methane potential from biogas, as the difference between production and consumption of a specific biomass, was determined for each municipality individually, and surpluses and

deficits of individual biomasses on the municipal level were balanced over the whole of Bavaria.

In addition to current biogas use (reference year 2021) and technical potential (reference year 2022), the **expected technical potential in 2030 was evaluated for three scenarios:**

- **"High"**: favorable developments for biogas production,
- **"Medium"**: continuation of current trends, and
- **"Low"**: developments that restrict biogas production.

The scenarios consider factors such as land use for settlements and traffic routes, rewetting of peatlands, set-aside, and voluntary measures for nature conservation. For animal husbandry, livestock numbers are projected based on recent trends. Changes in actual biogas use are projected from the current methane potential: no change in scenario „High“, -5% in scenario "Medium", and -15% in scenario "Low". Additionally, results from a sensitivity analysis, which was not part of the research project, are presented. A comparison of the results from the current study with those from the "Bayernplan" study of 2013 allow for the assessment of how realistic the assumptions about the exploitable potential were at that time.

The **current technical methane potential** from agricultural biomass in Bavaria (reference year 2022) amounts to **3,026 million m³**. **By 2030**, depending on the scenario, the technical biogas potential could reach a level of **94% to 113% relative to the value for the 2022**.

The calculated **production volume of 1,689 million m³ of methane from biogas for the reference year 2021 corresponds to about 56% of the technical potential**. Current biogas production is **based on approximately 80% green fodder and market crops from arable land**, i.e., biomass that is essentially in competition with food and fodder production. According to the study's boundary condition, the use of such biomass for biogas production should not exceed the current level and thus accounts for about 45% of the total technical biogas potential. While around 12% of the currently utilized methane potential is produced from animal manure, this type of substrate accounts for about 27% of the current and, in the scenarios for 2030 with decreasing livestock numbers, still 21 to 23% of the technical potential. The use of biomass from perennial grassland currently contributes about 7% to biogas production and is roughly matching its share in total technical potential; in the future, this contribution could about double. For harvest by-products, which are attributed 14 to 19% of the technical potential, utilization for biogas production has been marginal so far and, at the same time, cannot be precisely determined.

The central value for the technical methane potential from biogas in the current study is about 7% higher than that in the "Bayernplan" study as of 2013. Given the complex calculations and methodological differences, this deviation appears moderate and plausible. Thus, it can be concluded that the **available knowledge on the technical biogas potential in Bavaria is well-founded**. However, to reliably estimate the exploitable potential on this basis, further specific investigations would be necessary.

1 Hintergrund

Mit dem Energie-Atlas (<https://www.energieatlas.bayern.de/>) steht ein Web-Portal mit vielfältigen Informationen und Werkzeugen rund um die Bereitstellung und Nutzung von Erneuerbaren Energien (EE) in Bayern zur Verfügung. Da die Energiebereitstellung aus EE stets raumbezogen zu betrachten ist, werden im Energie-Atlas Bayern umfangreiche Kartenbasierte Webanwendungen angeboten. Mit der Anwendung „Mischpult Energiemix Bayern vor Ort“ lassen sich bis auf Gemeindeebene Umfang und technisches Potenzial für die Strom- und Wärmeerzeugung aus EE im Vergleich zum aktuellen Verbrauch darstellen (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) 2024). Den dort für die Strom- und Wärmeerzeugung aus Biogas ausgewiesenen technischen Potenzialen lag jedoch bisher keine entsprechend räumlich differenzierte Analyse zu Grunde. Auch war es nicht möglich, die zukünftige Entwicklung des technischen Biogaspotenzials einzuschätzen.

Um die Datengrundlage zur Energiebereitstellung aus Biogas im Energie-Atlas Bayern auf den neuesten Stand zu bringen und die Funktionalität der dazu angebotenen Webanwendungen zu verbessern, wurde am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der LfL eine neue Methodik zur differenzierten und räumlich hochaufgelösten Bestimmung des technischen Biogaspotenzials aus der Landwirtschaft entwickelt. Diese Arbeiten waren Teil eines Forschungsprojekts im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU), welches auch die Ermittlung der technischen Biogaspotenziale aus der Abfallwirtschaft und der genutzten Potenziale sowie eine Szenarioanalyse für die mittelfristige Entwicklung dieser Potenziale unter Berücksichtigung strenger Nachhaltigkeitskriterien beinhaltete (Krautkremer et al. 2024).

Der vorliegende Beitrag für die LfL Schriftenreihe wurde mit dem Ziel verfasst, die Berechnungsmethode für das technische Biogaspotenzial aus der Landwirtschaft in ausführlicher und allgemeinverständlicher Form zu erläutern und die Ergebnisse breiter zu diskutieren. Hierbei werden auch Ergebnisse miteinbezogen, die in einer zusätzlichen Studie für wissenschaftliche Kreise veröffentlicht wurden (Steindl et al. 2025). Für die Darstellung der technischen Potenziale werden die Web-Anwendungen im Energie-Atlas Bayern genutzt, deren Datengrundlage im Juli 2024 auf Basis des obengenannten Forschungsprojekts aktualisiert wurde. Auf die im Energie-Atlas bereitgestellten Hilfen und Hintergrundinformationen wird in dieser Schrift nicht weiter eingegangen.

2 Begriffsbestimmungen

Aufgabe des Forschungsprojekts „Technisches Biogaspotenzial Bayern“ war die Bestimmung des technischen Potenzials zur Energiebereitstellung aus Biogas. Das *technische Potenzial* beschreibt eine Teilmenge des *theoretischen Potenzials*, welches unter Beachtung vorhandener Beschränkungen nutzbar ist. Neben technischen Beschränkungen werden hierbei auch längerfristig wirkende, strukturelle und gesetzlich verankerte Beschränkungen berücksichtigt.

Das *wirtschaftliche Potenzial* ist wiederum eine Teilmenge des technischen Potenzials, die unter den jeweiligen ökonomischen Rahmenbedingungen, die sich gegebenenfalls kurzfristig verändern können, wirtschaftlich erschlossen werden kann. Hiervon ist das *erschließbare Potenzial* zu unterscheiden, das die in der Realität genutzte Teilmenge des technischen Potenzials umfasst (Thrän und Pfeiffer 2013; Kaltschmitt und Hartmann 2021).

Das Potenzial zur Erzeugung von Methan durch Vergärung von Biomasse in Biogasanlagen wird in diesem Bericht als *Methanpotenzial* und nicht als Biomethanpotenzial bezeichnet, um eine Verwechslung mit dem Begriff „Biomethan“ zu vermeiden, welcher im Allgemeinen für aufbereitetes Biogas verwendet wird, das die gleichen verbrennungstechnischen Eigenschaften wie Erdgas aufweist.

Da der Methangehalt in Biogas je nach verwendeter Biomasse, aber auch verfahrensabhängig schwankt, werden bewusst keine Biogasmengen ausgewiesen, sondern konsequent die umgerechneten Methanmengen angegeben.

Alle im Bericht in „m³“ angegebenen Gasmengen beziehen sich auf Normbedingungen bei 273,15 K und 101,325 kPa.

Unter dem Begriff *Nebenprodukt* wird im Folgenden ausschließlich pflanzliche Biomasse verstanden, welche bei der Ernte im landwirtschaftlichen Betrieb anfällt, z. B. Getreidestroh oder Rübenblatt.

Zum Zwecke der Biogaserzeugung angebaute Primärprodukte vom Acker- oder Dauergrünland werden in dieser Schrift als *Energiepflanzen* bezeichnet, nicht als nachwachsende Rohstoffe.

3 Thematische Hinführung

Unter allen Erneuerbaren Energieträgern (EE) in Bayern rangierte die Stromerzeugung aus Biogas im Jahr 2023 mit einem Anteil von rund 11 % an dritter Stelle nach Photovoltaik (27 %) und Wasserkraft (20 %). Der Anteil aller erneuerbaren Energieträger an der gesamten Stromerzeugung in Bayern wiederum betrug rund 72 %, somit wurden knapp 8 % des Stroms aus Biogas erzeugt. Betrachtet man nur die Stromerzeugung aus Bioenergie, so ist Biogas mit einem Anteil von rund 73 % der mit Abstand wichtigste Bioenergieträger (Voigtländer 2024). Bei der Wärmebereitstellung ist der Anteil der Erneuerbaren deutlich geringer: in Bayern betrug dieser im Jahr 2023 rund 29 % und Biogas steuerte hier einen Anteil von 7 % zur erneuerbaren bzw. rund 2 % zur gesamten Wärmeversorgung bei. Die Nutzung von Biogas als Kraftstoff ist in Bayern marginal.

Der erneuerbare Anteil am Nettostromverbrauch in Bayern im Jahr 2023 war mit rund 55 % deutlich geringer als derjenige an der Stromerzeugung, woran erkennbar wird, dass der Freistaat seit dem Ausstieg aus der Kernenergienutzung zum Netto-Importeur von Strom wurde. Die Fortschritte in der Energiewende relativieren sich in ernüchternder Weise, wenn man auf die Energiebilanz für die gesamte Bundesrepublik blickt: demnach wurden im Jahr 2023 noch 80,5 % des Primärenergieverbrauchs aus fossilen Ressourcen gedeckt (AGEB - Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. 2025), was dem durchschnittlichen Wert für die G20 entspricht (World Energy Council - Weltenergieerat Deutschland 2024). Bayern erreichte diesbezüglich mit schätzungsweise 74,5 % einen merklich niedrigeren Wert (Voigtländer 2024). Bis zum Jahr 2030 soll dazu der Anteil der EE am Primärenergieverbrauch in Deutschland auf rund 31 % gesteigert werden (Agora Energiewende 2017a). Der massive Ausbau der Erneuerbaren Energien wird als unverzichtbar angesehen, um das politische Ziel der Vermeidung eines „gefährlichen Klimawandels“ zu erreichen, welches gemäß der Vereinbarung von Paris festgemacht wurde an einer Begrenzung des Anstiegs der globalen Mitteltemperatur um deutlich weniger als zwei Grad gegenüber der vorindustriellen Referenzperiode (Conference of the Parties 2015).

Ein Versorgungssystem aus Erneuerbaren Energien basiert auf der mehr oder weniger direkten Nutzung der Sonneneinstrahlung. Der begrenzende Faktor ist hierbei nicht die auf der Erde eintreffende Energiemenge, sondern deren flächige Verteilung. Entsprechend gestaltet sich die Energiebereitstellung aus EE deutlich flächenintensiver als die Nutzung von fossilen oder nuklearen Energieträgern. Dies gilt in besonderer Weise für die Bioenergie.

Genügend für die Stromversorgung in Deutschland in der fossil-nuklearen Epoche wenige hundert Kohle-, Gas- und Kernkraftwerke, speisen mittlerweile viele Hunderttausende PV-Anlagen, Zehntausende Windkraftanlagen und Tausende Bioenergie-Kraftwerke ins Stromnetz ein (Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2021): Das Energieversorgungssystem wird in seiner Struktur sehr viel dezentraler. Gleichzeitig wird auch die Verbraucherstruktur kleinteiliger, wenn aus EE erzeugte elektrische Energie zunehmend auch zur Wärmebereitstellung und als Antriebsenergie genutzt wird (Agora Energiewende 2017b). Im Zuge dieser Transformation des Energieversorgungssystems übernehmen Kommunen als „Betreiber des Wandels“ und als treibende Kräfte der Energiewende vielfältige wichtige Rollen (Schmieder et al. 2023). Von besonderer Bedeutung ist hierbei die kommunale Wärmeplanung, die mit dem Wärmeplanungsgesetz vom 20. Dezember 2023 für alle Kommunen bundesweit verpflichtend geregelt wurde.

Die Aufgabe, den fortlaufenden Ausgleich zwischen Last und Erzeugung / Einspeisung sicherzustellen, um das Stromnetz stabil zu halten, wird im Zuge der Energiewende ungleich

komplexer. das Netz ist, wie oben erwähnt, in erster Linie auf Verteilung der in Großkraftwerken erzeugten Strommengen ausgelegt, nicht auf eine flächig verteilte Einspeisung und den überregionalen Ausgleich zwischen Erzeugungsleistung und Last; gleichzeitig wird der Ausbau der Übertragungsnetze durch Widerstand in den direkt betroffenen Kommunen massiv verzögert. So ist der Aufwand für den sogenannten „Dispatch“, das ist die Einsatzplanung der verfügbaren einheimischen Kraftwerke am Vortag, sowie für den „Redispatch“, das ist die Anweisung der Kraftwerksbetreiber durch die Übertragungsnetzbetreiber zur räumlichen Verschiebung der geplanten Stromproduktion, um Netzengpässe zu vermeiden, in den zurückliegenden zehn Jahren kontinuierlich gestiegen (Next Kraftwerke GmbH 2025).

In diesem Zusammenhang wurde mehrfach auf das besondere Potenzial von Biogasanlagen hingewiesen, dass diese durch „Flexibilisierung“ netzdienlich betrieben werden können. Dies beinhaltet die Überbauung der installierten elektrischen Leistung, so dass Biogas zwischengespeichert und in Zeiten erhöhten Strombedarfs mit höherer Leistung verstromt werden kann, gegebenenfalls ergänzt um die Modulation der Biogaserzeugung. Bereits im Jahr 2012 wurde an der LfL im Auftrag der Bayerischen Staatsregierung unter dem Schlagwort „Bayernplan“ untersucht, ob durch die Flexibilisierung der Stromerzeugung in Biogasanlagen ein Teil des geplanten Zubaus von Gaskraftwerken mit einer elektrischen Gesamtleistung von 4 GW obsolet werden könnte (Aschmann et al. 2013). In einer Betrachtung aus dem Jahr 2014 zeigen Hahn et al., wie durch vierfache Überbauung der Biogasanlagen in Deutschland mit rund 3 GW elektrischer Bemessungsleistung rund 12 GW Regelleistung im Stromnetz zur Verfügung gestellt werden könnten. Tatsächlich erreichte die installierte Verstromungskapazität der knapp 10.000 Biogasanlagen hierzulande zum Ende des Jahres 2023 ca. 5,9 GW (Fachverband Biogas e.V. 2024), jedoch wurden nur ca. 300 Biogasanlagen tatsächlich systemdienlich in Abhängigkeit der Residuallast im Stromnetz betrieben (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2023).

Die möglichst systemdienliche Verstromung der begrenzten erzeugbaren Mengen an Biogas ist auch aus ökologischen Gründen geboten. Bereits im Jahr 2007 forderte der Wissenschaftliche Beirat für Agrarpolitik die Inanspruchnahme von Ackerflächen für die Biogaserzeugung aus Energiepflanzen zu begrenzen, da dies energetisch und ökonomisch ineffizient sei und erhebliche Risiken für den Klimaschutz mit sich bringe (Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik (WBA) 2007; Isermeyer 2022). Die Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina empfahl in ihrer Stellungnahme zu den Möglichkeiten und Grenzen der Bioenergie die Erzeugung von Biogas aus Energiepflanzen auf den Umfang zu begrenzen, der „dazu beiträgt, die Biogasproduktion aus Agrarabfällen und den fluktuierenden Energiebedarf zu stabilisieren und zu optimieren“ (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina 2012). Zuvor hatten Nitsch et al. (2004) unter Berücksichtigung von Naturschutzbelangen eine potenzielle Anbaufläche für Energiepflanzen von 1,1 Mio. ha im Jahr 2020 und 2,0 Mio. ha im Jahr 2030 angegeben, für das Jahr 2050 gar bis zu 4,2 Mio. ha.

Blickt man auf die reale Entwicklung, so wurden im Jahr 2023 in Deutschland rund 70 % des verstromten Biogases nach Energiegehalt aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt und hierdurch wurde eine Anbaufläche von 1,37 Mio. ha in Anspruch genommen. Wie aus Tab. 1 erkennbar wird, gab es in den zehn Jahren davor keinen klaren Trend mehr zur Ausweitung der Anbauflächen. Gegenüber dem Jahr 2013 war eine wesentliche Zunahme nur für Grassilage (hier inkl. Leguminosen und Zwischenfrüchte) mit rund 120.000 ha mehr und für Maissilage mit rund 40.000 ha mehr zu verzeichnen (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2025). Die Deutsche Energie-Agentur geht in ihrem „Marktmonitoring Bioenergie“ dann auch davon aus, dass angesichts der vielfältigen Nutzungskonkurrenzen

in Verbindung mit den Auswirkungen der Klimakrise keine Ausweitung des Energiepflanzenanbaus auf Ackerland erfolgen wird (Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2022).

Tab. 1: *Verlauf der Anbauflächen nachwachsender Rohstoffe zur Biogaserzeugung in Deutschland von 2013 bis 2023, Angaben in 1.000 ha (nach: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2025).*

| | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| Gras (Silage)¹ | 166 | 204 | 182 | 230 | 214 | 241 | 235 | 336 | 294 | 291 | 229* |
| Silphie | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,8 | 1,9 | 3,0 | 3,2 | 3,5 | 10 | 10 | 10* |
| Zucker- rübe | 14,7 | 15,1 | 16 | 16,3 | 20 | 23,4 | 27,7 | 26,1 | 24,9 | 30,8 | 20,7* |
| Getreide (Korn) | 145 | 163 | 155 | 177 | 185 | 203 | 218 | 271 | 91,4 | 84,2 | 161* |
| Getreide (Silage) | 100 | 101 | 120 | 98,9 | 97,3 | 87,2 | 112 | 123 | 104 | 77,1 | 63,1* |
| Mais (Silage) | 855 | 884 | 879 | 918 | 925 | 1.020 | 1.030 | 916 | 821 | 1.040 | 846* |

¹) Inklusive Ganzpflanzensilage aus Leguminosen und Zwischenfrüchten; *) vorläufiger Wert.

Im Gegensatz zur Nutzung von Energiepflanzen wird für die Biogaserzeugung aus landwirtschaftlichen Abfallstoffen, insbesondere Gülle, der weitere Ausbau gefordert (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina 2012). Die Stärkung der Vergärung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft gehört zu den wichtigsten Maßnahmen, mit denen die Bundesregierung die Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft verringern möchte (Deutsche Bundesregierung 2019). Dennoch stagnierte die Biogaserzeugung aus Gülle in den vergangenen Jahren und es wird nur etwa ein Drittel des technischen Potenzials ausgeschöpft, wofür hauptsächlich die hohen Investitionskosten für Güllekleinanlagen in Verbindung mit fehlenden langfristigen Perspektiven als ursächlich gesehen werden (Kornatz et al. 2023).

Für Bayern wurde zuletzt im Zuge der oben erwähnten Studie zum „Bayernplan“ aus dem Jahr 2012 das vorhandene und mittelfristig, d. h. bis ins Jahr 2015 zusätzlich erschließbare Potenzial der Biogaserzeugung analysiert, ausgehend vom Anlagenbestand und der Flächennutzung zum Ende des Jahres 2011 (Aschmann et al. 2013). In vorausschauender Weise wurde damals als Randbedingung festgelegt, dass keine Ausdehnung des Anbaus von nachwachsenden Rohstoffen zur Biogaserzeugung erfolgen soll. Der Potenzialanalyse lag im Wesentlichen eine Regionalisierung auf Ebene der Regierungsbezirke zu Grunde, was Wirtschaftsdünger und Erntenebenprodukte betrifft. Das Methanpotenzial aus Nebenprodukten der Verarbeitung und des Konsums von Lebensmittel sowie aus Landschaftspflegematerial und Grünabfällen wurde summarisch für Bayern abgeschätzt. Das Biomassepotenzial von freiwerdenden Futterflächen aufgrund des Rückgangs der Rinderhaltung bis ins Jahr 2015 wurde differenziert nach Erzeugungsgebieten betrachtet. Unter diesen Annahmen wurde ein zusätzlich erschließbares Methanpotenzial in Höhe von rund 840 Mio. m³ ermittelt, das sich wie in Tab. 2 gezeigt aufteilt. Das zum 31.12.2011 genutzte Methanpotenzial aus Biogas betrug ca. 1.462 Mio. m³, woraus sich eine potenzielle Steigerung um rund 57 % ergibt.

Tab. 2: Aufteilung der Substratgrundlage des in Bayern zusätzlich erschließbaren Methanpotenzials laut der Potenzialanalyse aus dem Jahr 2012 (nach: Aschmann et al. 2013).

| Substratgrundlage | Anteil, % |
|--|------------------|
| Wirtschaftsdünger | 28 |
| Nebenprodukte aus Lebensmittelverarbeitung und -konsum | 5 |
| Erntenebenprodukte | 36 |
| Landschaftspflegematerial und Grünabfälle | 3 |
| Rückgang des Futterbaus bis 2015 | 28 |

4 Erläuterung der Berechnungsmethoden

Als Datengrundlage für das Mischpult „Energimix Bayern vor Ort“ im Energie-Atlas Bayern werden prinzipiell die folgenden drei Datensätze benötigt: (1) das genutzte Biogaspotenzial, d. h. die im Basisjahr 2022 energetisch verwertete Methanmenge aus Biogas; (2) das technische Biogaspotenzial aus der Landwirtschaft und (3) das technische Biogaspotenzial aus der Abfallwirtschaft. In der vorliegenden Schrift werden nur die Datensätze (1) und (2) behandelt. Für die Erläuterung des technischen Biogaspotenzials aus der Abfallwirtschaft wird auf den Abschlussbericht zum Forschungsprojekt „Biogaspotenzial Bayern“ verwiesen (Krautkremer et al. 2024).

Den prinzipiellen Rechenweg zur Bestimmung des technischen Biogaspotenzials und des daraus resultierenden Stromerzeugungspotenzials zeigt Abb. 1. Das ungenutzte und damit verfügbare technische Potenzial ergibt sich als Differenz aus dem gesamten technischen Potenzial und dem in bestehenden Biogasanlagen bereits realisierten Potenzial. Die einzelnen Berechnungsverfahren und deren Datengrundlage werden im Folgenden genauer erläutert.

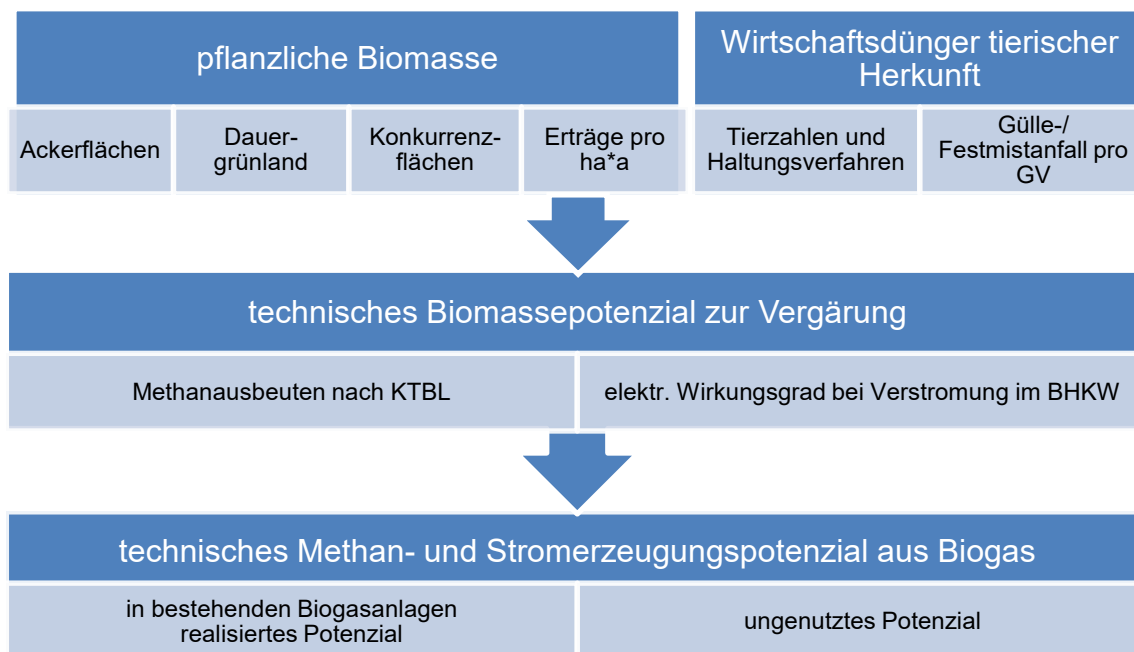


Abb. 1: Schematischer Rechenweg zur Bestimmung des technischen Methan- und Stromerzeugungspotenzials aus Biogas von landwirtschaftlichen Substraten.

4.1 Inventarisierung der Biomasse

An landwirtschaftlichen Biomassen, die zur Biogaserzeugung genutzt werden können, werden für die vorliegende Potenzialstudie Primärprodukte vom Ackerland oder Dauergrünland, pflanzliche Nebenprodukte und Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung betrachtet. Primärprodukte umfassen hierbei sämtliche Arten von Grünfütter und Ackerkulturen. Nebenprodukte im Sinne dieser Potenzialanalyse sind ausschließlich als Erntenebenprodukte zu verstehen, welche direkt im landwirtschaftlichen Betrieb anfallen. Es werden somit vier

Typen von landwirtschaftlicher Biomasse für die Biogasproduktion unterschieden und wie folgt weiter kategorisiert.

4.1.1 Prinzipielle Verfügbarkeit verschiedener Biomassen

Die Kategorisierung im Hinblick auf die prinzipielle mengenmäßige Verfügbarkeit unterschiedlicher Kategorien von Biomasse bildet eine politische Beschränkung ab, wie sie in einem Eckpunkte-Papier aus dem Jahr 2022 von der damaligen Bundesregierung formuliert wurde: demnach solle die stoffliche Nutzung von Biomasse priorisiert und bei der energetischen Nutzung der Fokus auf Abfall- und Reststoffe gerichtet werden (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) et al. 2022). Für die Potenzialanalyse wurde dies so übersetzt, dass Marktfrüchte und Grünfütter vom Ackerland als „beschränkt“ kategorisiert wurden (Vergleiche Tab. 3), weshalb das Biogaspotenzial aus diesen Substraten auf die bereits bestehende Nutzung im Jahr 2021 begrenzt wurde. Diese Annahme wird durch die oben dargestellte Beobachtung gestützt, dass bundesweit in den zurückliegenden Jahren die entsprechenden Anbauflächen in Summe nicht mehr ausgeweitet wurden.

Tab. 3: Kategorisierung der landwirtschaftlichen Biomasse nach Herkunft, prinzipieller Verfügbarkeit für die Biogasproduktion sowie Nutzungskonkurrenz.

| Typ | Herkunft | Prinzipielle Verfügbarkeit | Nutzungskonkurrenz | Beispiele |
|-------------------|---------------|----------------------------|----------------------------|--|
| Grünfütter | Ackerland | beschränkt | Lebens-/Futtermittel (KFL) | Maissilage, Getreide-Ganzpflanzensilage, Ackergras |
| | Dauergrünland | unbeschränkt | Tierhaltung (KT) | Grünlandaufwuchs |
| Marktfrucht | Ackerland | beschränkt | KFL | Getreidekorn, Maiskorn, Zuckerrüben |
| Nebenprodukt | Ackerland | unbeschränkt | KT | Getreidestroh |
| | | | ohne (oK) | Rübenblatt, Rapsstroh, Körnermaisstroh |
| Wirtschaftsdünger | Tierhaltung | unbeschränkt | oK | Rindergülle, Rindermist Schweinegülle |

Demgegenüber bedeutet „unbeschränkt“, dass für die Biogasproduktion aus diesen Substraten keine regulatorischen Obergrenzen festgelegt wurden und deren Potenzial nur technisch begrenzt ist. Eine abweichende Klassifizierung der Biomassen nach Nutzungskonkurrenz wurde in Steindl et al. (2025) vorgenommen (Siehe Tab. 3: zweite Spalte von rechts).

4.1.2 Geographische Bezugsräume

Die kleinsten geographischen Einheiten für die Potenzialanalyse bilden die 2.229 Gemeinden in Bayern, da die Informationen im Kartenteil des Energie-Atlas Bayern bis hinunter auf diese Ebene verfügbar sein sollen. Dementsprechend erfolgt die Bilanzierung der zu betrachtenden landwirtschaftlichen Biomassen prinzipiell auf Gemeindeebene.

Für bestimmte Parameter, die zur Berechnung der Produktion bzw. des Bedarfs an verschiedenen Biomassen benötigt werden, wäre eine Auswertung auf Gemeindeebene allerdings unverhältnismäßig aufwändig oder mangels Datengrundlage nicht möglich gewesen. Die Festlegung dieser Parameter erfolgte auf Ebene von vier landwirtschaftlichen Erzeugungsgebieten, welchen die Gemeinden zugeordnet wurden (Siehe Abb. 4). Zur Übersicht, auf welcher geographischen Einheit diese und weitere regionalspezifische Kennwerte für die Potenzialanalyse ausgewertet wurden, dient Tab. 4 auf der folgenden Seite.

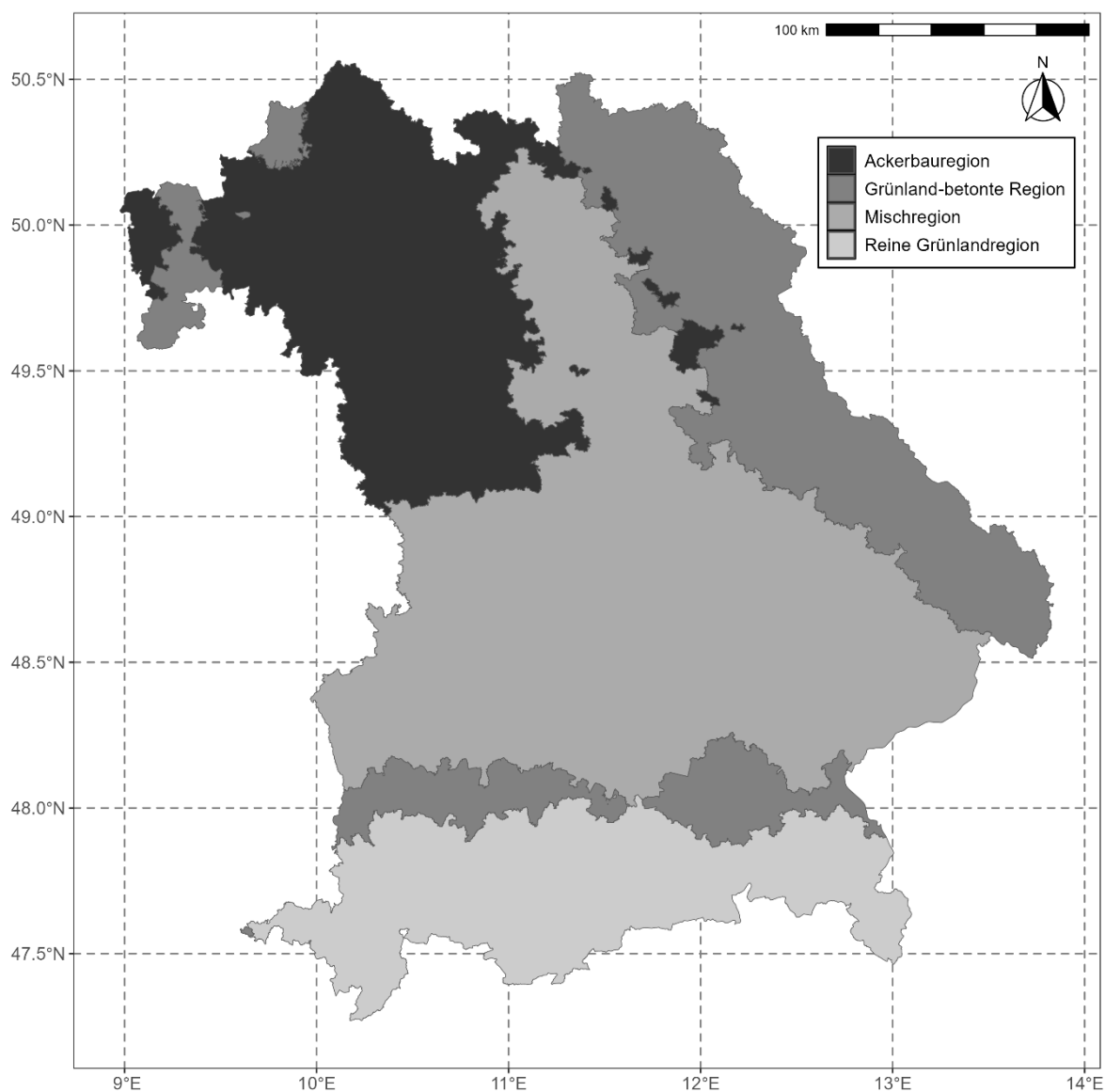


Abb. 2: Abgrenzung der vier unterschiedenen landwirtschaftlichen Erzeugungsgebiete in Bayern.

Tab. 4: Übersicht zu den geographischen Bezugseinheiten für die Potenzialberechnung.

| Gemeinde | Erzeugungsgebiet | Regierungsbezirk | Gesamtgebiet |
|--|---------------------------|------------------|---|
| <i>Biogaserzeugung</i> | | | |
| Stromerzeugung aus Biogas bzw. Biomethanherzeugung | spezifischer Methanertrag | | Elektrischer Wirkungsgrad BHKW |
| | Substratmix | | Stromeigenbedarfsanteil BGA |
| | | | Jahresbetriebsstunden |
| <i>Tierhaltung</i> | | | |
| Tierbestand | Futtermengen | Haltungsform | |
| | | Weideanteil | |
| <i>Pflanzliche Produktion</i> | | | |
| Landwirtschaftliche Nutzfläche | | Erträge | Flächenverbrauch für Siedlungs- und Verkehrsflächen |
| Flächenstatus | | | Wiedervernässung von Moorflächen |
| Produktionseinschränkungen | | | Verpflichtende Stilllegung von Ackerland |
| Anteil der angebauten Kulturen | | | Flächenanteil für Natur- und Umweltschutzmaßnahmen |

4.1.3 Biomassebedarf für die Biogaserzeugung

Das Potenzial an in der Menge prinzipiell „beschränkter“ landwirtschaftlicher Biomasse zur Biogaserzeugung (Vergleiche Tab. 3) wird auf den entsprechenden Substratbedarf der Biogasanlagen im Jahr 2022 festgelegt. Zu den für die Biogaserzeugung eingesetzten Mengen dieser Substrate liegen jedoch keine offiziellen Daten vor. Der aktuelle Substratbedarf der Biogasanlagen wird daher aus der in einer Gemeinde aus Biogas erzeugten Energiemenge abgeleitet, wie in Abb. 3 schematisch dargestellt.

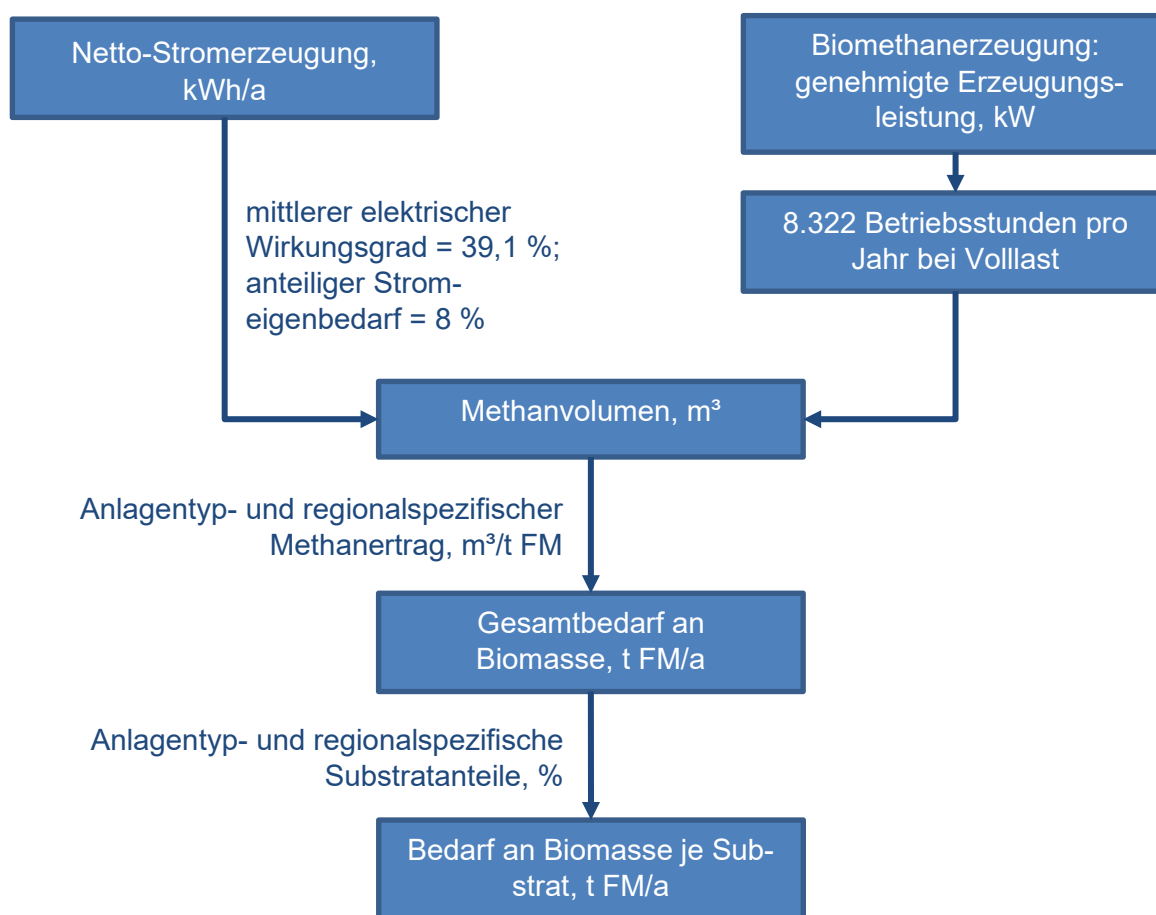


Abb. 3: Schema zur Rückrechnung des Biomasseverbrauchs je Biogasanlage mit Angaben zu verwendeten Kennwerten.

Im ersten Schritt müssen im Energie-Atlas Bayern diejenigen Biomasseanlagen mit Stromerzeugung identifiziert werden, bei welchen es sich um Biogasanlagen (BGA) mit Einsatz landwirtschaftlicher Substrate handelt (Abb. 4). Diese lassen sich wiederum unterscheiden in „N-BGA“, welche überwiegend Energiepflanzen in Mischung mit Wirtschaftsdüngern und geringen Anteilen anderer landwirtschaftlicher Biomassen einsetzen, oder „G-BGA“, welche überwiegend bzw. ausschließlich Wirtschaftsdünger vergären (auch bekannt als „Güllekleinanlagen“ oder „Hofbiogasanlagen“ mit einer installierten elektrischen Leistung bis maximal 150 kW).

Das erzeugte Methanvolumen im Biogas wird bei Biogasanlagen mit Verstromung unter Annahme des für eine BGA-Stichprobe errechneten mittleren elektrischen Wirkungsgrades aus der erzeugten elektrischen Energie (Abb. 3: linke Seite), bei Biomethan-Einspeiseanlagen auf Basis der genehmigten Produktionsleistung sowie der jährlichen Volllaststunden (Abb. 3: rechte Seite) berechnet.

Aus dem Methanvolumen wird der Gesamtbedarf an Biomasse mittels eines anlagentyp- und regionalspezifischen Ertragsparameters, das ist der spezifische Methanertrag in Kubikmeter pro Tonne Frischmasse, berechnet. Dieser wird ermittelt als der Median der Ertragsparameter für eine Stichprobe von BGA des jeweiligen Typs in der jeweiligen Region (Vergleiche).

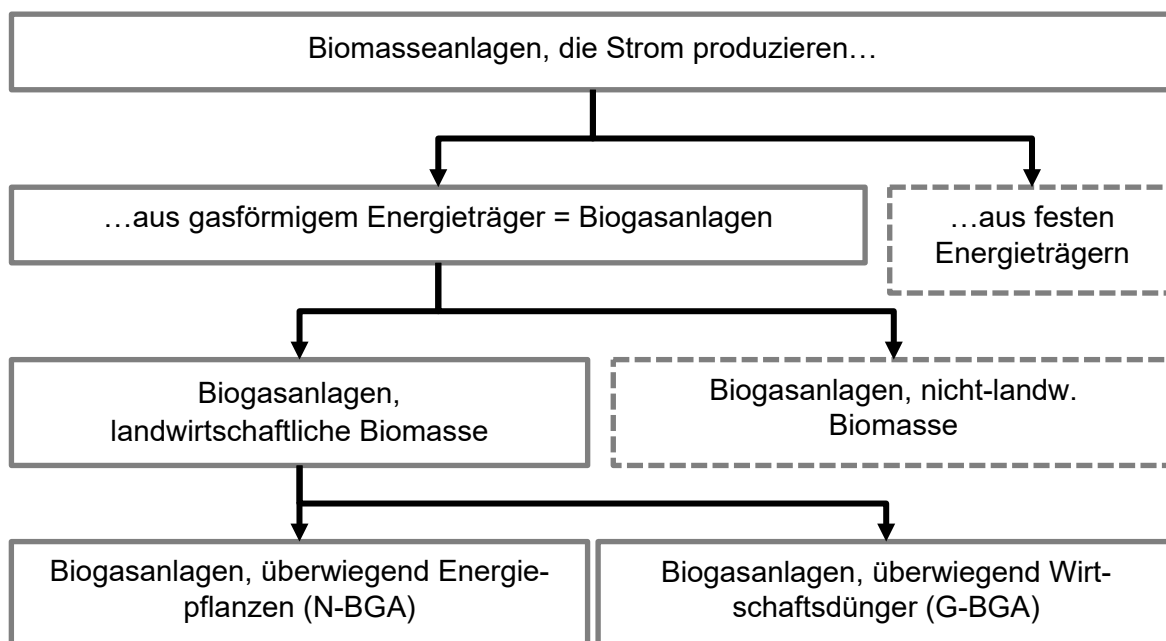


Abb. 4: Schema zur Identifizierung der relevanten Biogasanlagenstandorte aus den Daten des Energieatlas Bayern (verändert nach Krautkremer et al. 2024)

Um den Verbrauch an einzelnen Substraten zu bestimmen, wird ein nach Anlagentyp und Region differenzierter Substratmix verwendet. Hierfür werden die arithmetischen Mittelwerte der Massenanteile einzelner Substrate (normiert auf 100 %) für eine Stichprobe von BGA des jeweiligen Typs in der jeweiligen Region eingesetzt. Wie sich dieser Substratmix nach Anlagentyp und Region unterscheidet, zeigt Abb. 6.

Für den Anlagentyp N-BGA wurden die regionalspezifischen Ertragsparameter und Substratanteile aus den Angaben in den EEG-Jahresendgutachten 2019 bis 2022 von mehr als 600 BGA ermittelt, welche durch ein Umweltgutachterbüro bereitgestellt wurden. Für den Anlagentyp G-BGA standen Datensätze von 69 BGA zur Verfügung, die bei einer Umfrage im Jahr 2023 erhoben wurden.

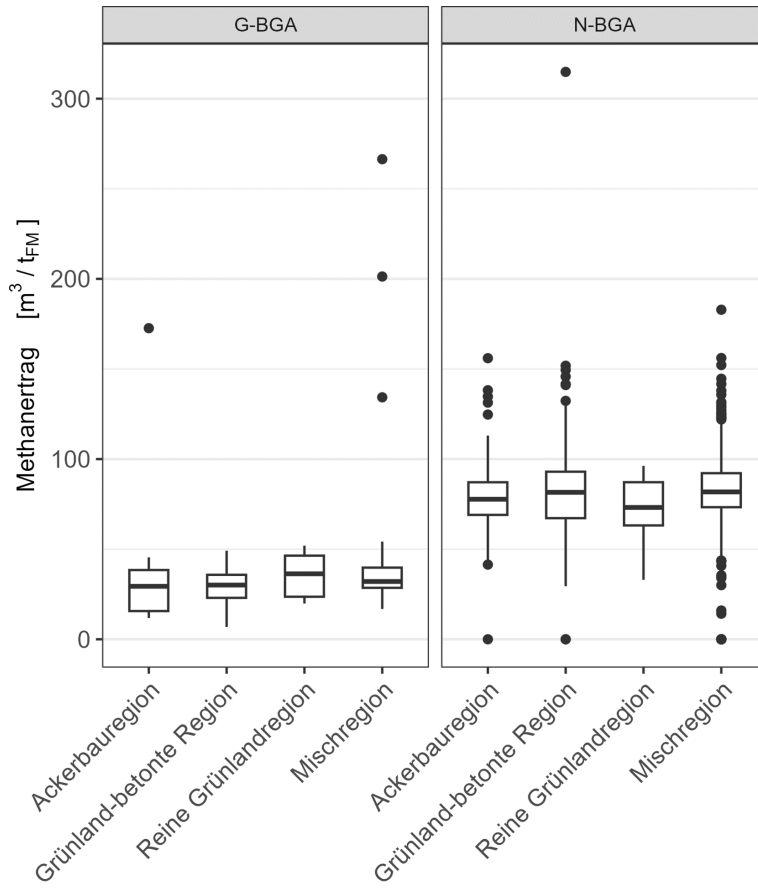


Abb. 5: Verteilung der Methanertragsparameter für die verwendeten Stichproben von BGA, landwirtschaftlichen Erzeugungsgebieten und Anlagentypen.

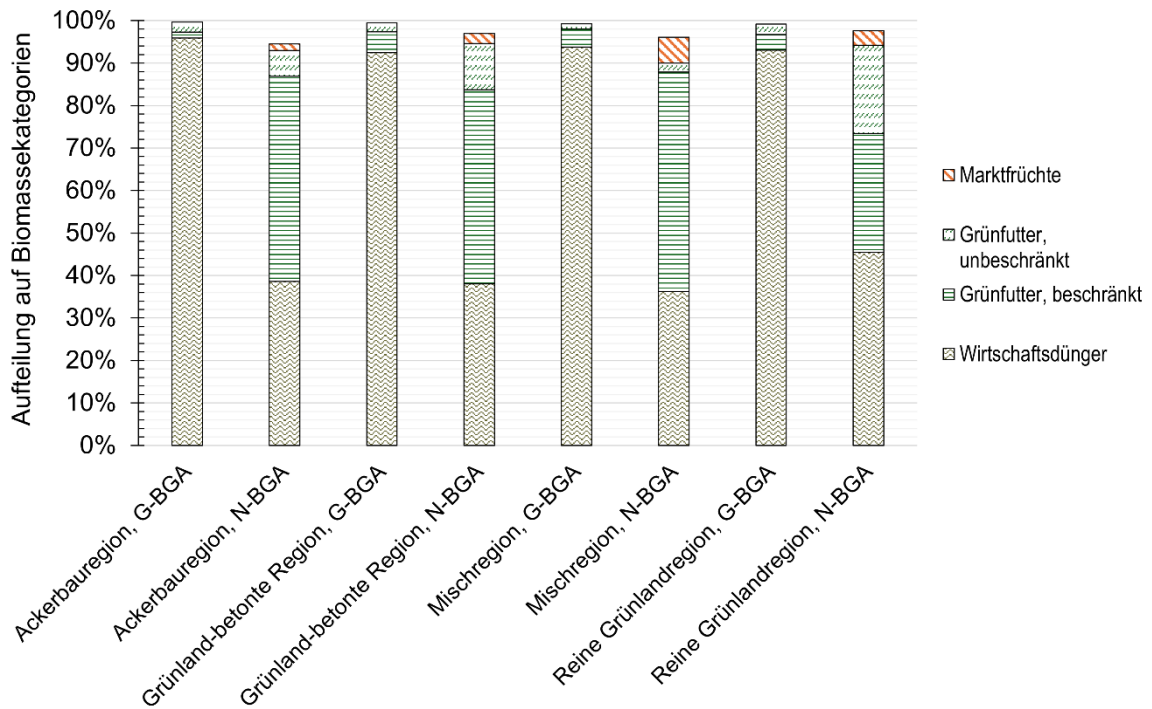


Abb. 6: Aufteilung des mittleren Substratmix auf vier Biomassekategorien, differenziert nach landwirtschaftlichen Erzeugungsgebieten und Anlagentypen.

4.1.4 Biomassebedarf in der Tierhaltung

Der Biomassebedarf in der Tierhaltung setzt sich zusammen aus dem Verbrauch an Futtermitteln und dem Bedarf an Einstreu. Folgende Biomassen wurden bilanziert: Ackergras, Gras von Dauergrünland, Getreidekorn, Getreidestroh, Klee (Klee gras), Luzerne, Maiskorn und Maissilage. Berücksichtigt wurde die Haltung von Rindern, Schafen, Ziegen, Schweinen, Pferden, Geflügel und Wild im Gehege. Der Biomassebedarf wird auf Gemeindeebene berechnet auf Basis der mittleren Tierbestände, differenziert nach den wichtigsten Tierkategorien gemäß Integriertem Verwaltungs- und Kontrollsystem (INVEKOS).

Für Raufutterfresser (Rinder, Schafe, Ziegen, Pferde und Wild) und Schweine wird angenommen, dass der *Futtermittelbedarf* direkt aus der Produktion in der Gemeinde bedient wird. Hierzu werden für die betrachteten Tierkategorien nach den vier Erzeugungsgebieten differenzierte Futterrationen definiert (Vergleiche Abb. 7 in Verbindung mit Abb. 2). Für die Geflügelhaltung wird der Futtermittelbedarf nicht bilanziert, da Geflügel haltende Betriebe das Futter in der Regel aus überregionalen Mischfutterwerken zukaufen.

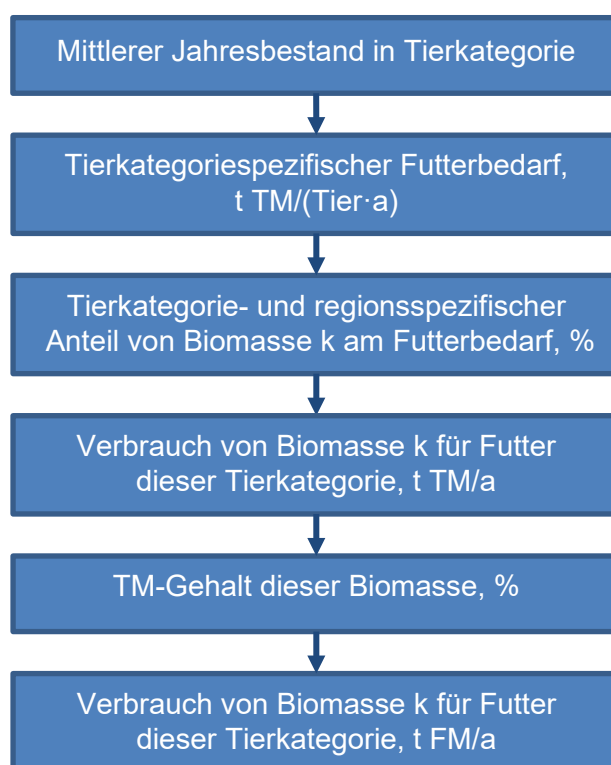


Abb. 7: Schema zur Berechnung des Biomasseverbrauchs für Futtermittel in der Tierhaltung (verändert nach Krautkremer et al. 2024).

Einen wichtigen Sonderfall stellen 96 Gemeinden im reinen Grünlandgebiet dar, in denen Gras auf Almen oder Alpen wächst. Da der Aufwuchs abgesehen von einer Beweidung praktisch nicht erschlossen werden kann, wurde diese Biomasse nicht direkt für das Methanpotenzial berücksichtigt. Der Aufwuchs von Almen und Alpen wird jedoch als Futter eingesetzt und geht deshalb in die Biomassebilanz für diesen Gemeinden mit ein, indem der Bedarf an Gras für Raufutterfresser primär hierdurch gedeckt wird. Für den darüber hinausgehenden Bedarf an Raufutter wird angenommen, dass dieser von „regulären“ Dauergrünlandflächen stammt, die keine Almen oder Alpen sind.

Die Berechnung des Verbrauchs von Biomasse als *Einstreu* basiert wie der Futtermittelbedarf auf dem Jahresmittel der Bestandszahl einer Tierkategorie auf Gemeindeebene. Der Einstreubedarf je Tier wird auf Grundlage von Daten der Landwirtschaftszählung 2020 sowie Expertenschätzungen der LfL zu den Anteilen unterschiedlicher Haltungssysteme nach Tierkategorie und Regierungsbezirk differenziert, wie in Abb. 8 schematisch dargestellt. Bei fehlenden Daten zum Einstreubedarf werden die Werte einer ähnlichen Tierkategorie herangezogen. In die Bilanzierung für das Biogaspotenzial geht nur der Anteil der Tierhaltung in Ställen mit Festmistsystemen ein (Siehe Abb. 8: rechte Seite) und für diese werden die Angaben zum „hohen Einstreubedarf“ gemäß LfL-Basisdaten verwendet (LfL Agrarökologie). Freilandhaltung und Gülle basierte Haltungssysteme (Siehe Abb. 8: linke Seite) bleiben unberücksichtigt, da bei diesen Systemen der Bedarf an Einstreumaterial deutlich geringer ist oder gänzlich entfällt.

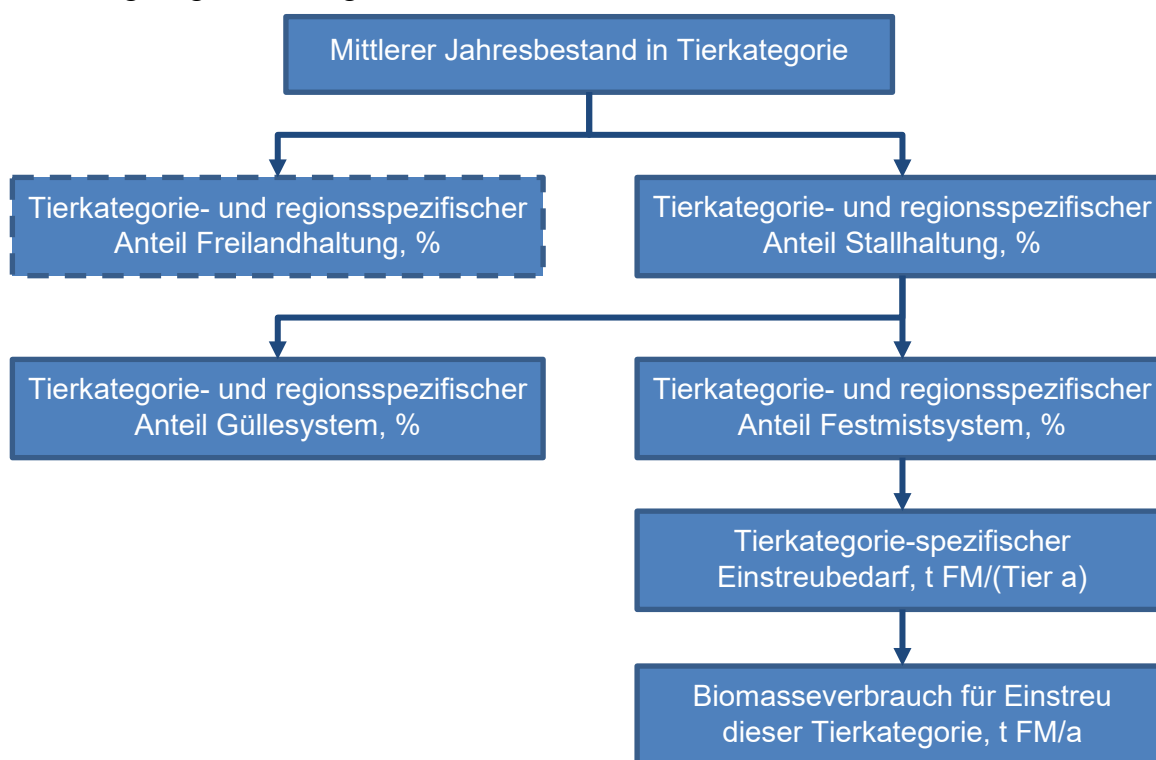


Abb. 8: Schema zur Berechnung des Biomasseverbrauchs für Einstreu in der Tierhaltung (verändert nach Krautkremer et al. 2024).

4.1.5 Biomasse aus pflanzlicher Produktion

Die Berechnung des Anfalls an Biomasse aus pflanzlichen Hauptprodukten erfolgt auf Gemeindeebene durch Multiplikation der landwirtschaftlichen Nutzfläche mit Ertragswerten in Abhängigkeit von Anbaukultur und Regierungsbezirk, wobei produktionseinschränkende Maßnahmen berücksichtigt werden (Siehe Abb. 9 und Abschnitt 5.1). Der Anfall an Biomasse aus einem Nebenprodukt wird auf Basis des Hauptprodukts unter Verwendung kulturspezifischer Werte für das Verhältnis von Haupt- zu Nebenprodukt und den Nutzungsfaktor (auch: „Bergequote“) berechnet (Siehe Abb. 9: rechte Seite).

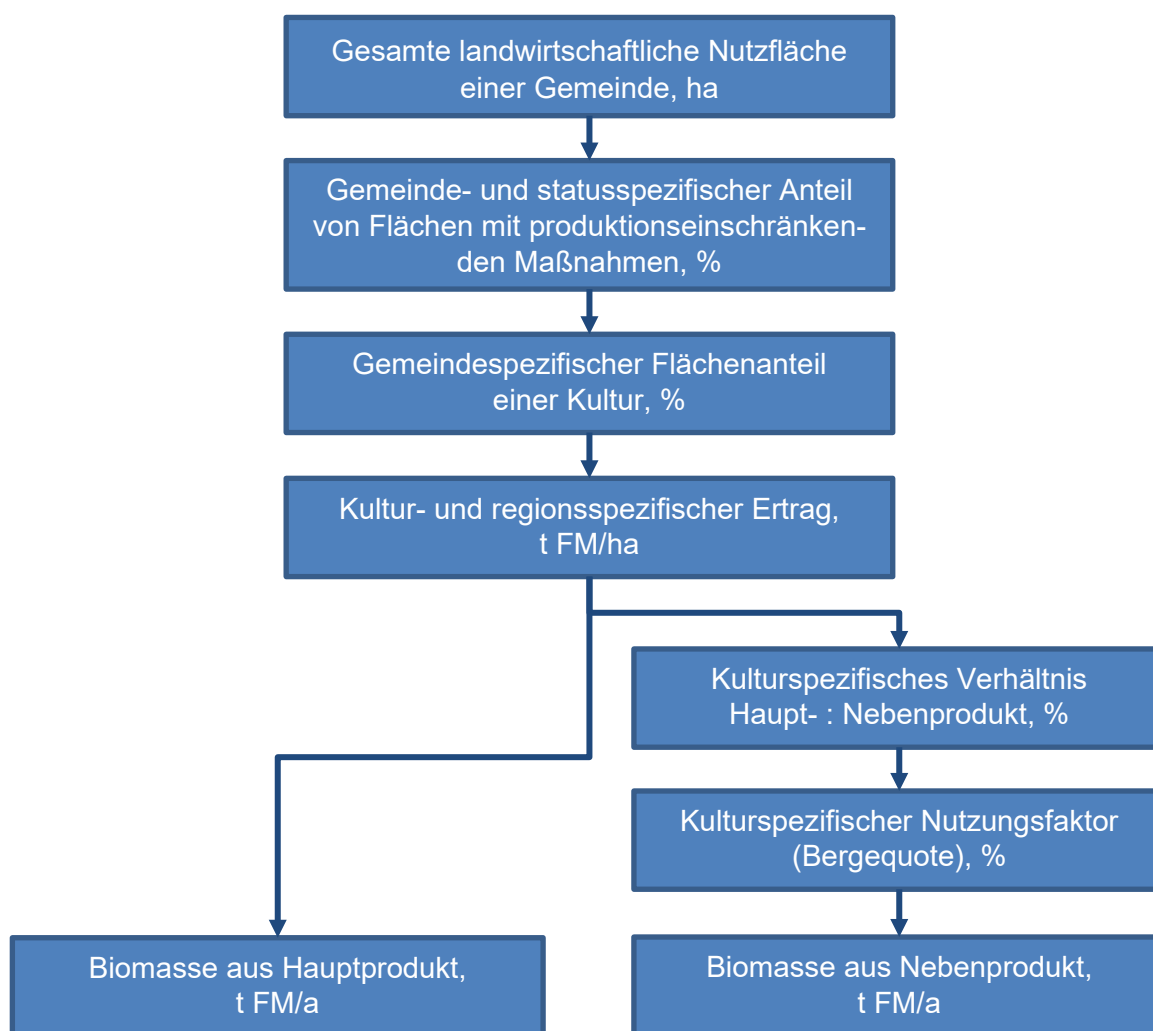


Abb. 9: Schema zur Berechnung der pflanzlichen Biomasse aus Haupt- und Nebenprodukten.

Grundlage für die Bestimmung der Biomasse aus der pflanzlichen Produktion im Basisszenario bildet die Flächennutzung in den Gemeinden gemäß INVEKOS für das Jahr 2022. Dort sind alle landwirtschaftlichen Nutzflächen anhand eindeutiger Nutzungs-codes für die einzelnen Kulturen erfasst. Für das Basisszenario wurden die Flächen je Gemeinde nach Nutzungs-codes aggregiert.

Die kultur- und regionalspezifischen Erträge für die Nutzungen Winterweizen (einschließlich Dinkel und Einkorn), Roggen und Wintermenggetreide, Wintergerste, Sommergerste, Körnermais/Mais zum Ausreifen (einschließlich Corn-Cob-Mix), Triticale, Hafer, Kartoffeln, Zuckerrüben, Winterraps, Grünmais/Silomais (einschließlich Lieschkolbenschrot), Erbsen (ohne Frischerbsen), Ackergras (einschließlich Mischungen mit überwiegend Gras), Wiesen (Schnittnutzung) und Weiden (einschließlich Mähweiden und Almen) wurden je Regierungsbezirk als arithmetische Mittelwerte aus den Erntestatistiken für die Jahre 2016 bis 2022 ermittelt (Bayerisches Landesamt für Statistik). Die Erträge von Nutzungen, für die keine Daten zur Erntestatistik vorliegen, wurden unter Verwendung von Basisdaten der LfL (LfL Agrarökologie) oder nach Expertenmeinung geschätzt. Die als Trockenmasse (TM) angegebenen Erträge von Ackergras, Wiesen und Weiden wurden einheitlich mit einem TM-Gehalt von 28,2 % (Wert für Grassilage nach Dandikas et al. 2021) in Frischmasse umgerechnet.

Das technische Biomassepotenzial von Erntenebenprodukten wurde auf Basis der Erträge unter Verwendung des Haupt-/Nebenprodukt-Verhältnisses (HNV) und einer Bergequote berechnet. Die Werte für HNV wurden aus Basisdaten der LfL bezogen (LfL Agrarökologie). Für Getreidestroh wurde die Bergequote über alle Getreidekulturen hinweg mit 67,5 % angesetzt (mittlerer Wert nach DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ)). Des Weiteren wurde angenommen, dass als Einstreu verwendetes Getreidestroh mit dem vergorenen Wirtschaftsdünger auf diejenigen Flächen zurückgeführt wird, von denen es gewonnen wurden. Dieselbe Annahme wurde für die übrigen Nebenprodukte (Rübenblatt, Leguminosen-, Mais-, Raps-, Sonnenblumenstroh, Hopfenrebenhäcksel und Rebentrester) getroffen.

4.1.6 Biomasse aus der Tierhaltung

Das für die Biogasproduktion relevante Biomassepotenzial aus der Tierhaltung umfasst den Anfall von Wirtschaftsdüngern aus Stallhaltung, in Abhängigkeit des Haltungssystems als Gülle oder als Festmist. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Wirtschaftsdünger während der Zeiträume, in welchen die Tiere im Freiland gehalten werden, nicht erfasst werden.

Grundlage für die Berechnung des Wirtschaftsdüngeranfalls bilden analog zur Berechnung des Bedarfs an Einstreu die Angaben zum mittleren Jahresbestand einer Tierkategorie innerhalb einer Gemeinde gemäß INVEKOS. Anhand der Anteile von Festmist- oder Güllebasierten Haltungssystemen und Freilandhaltung werden die mittleren Jahresbestandszahlen auf die entsprechenden Haltungsformen aufgeteilt. Mittels der spezifischen Faktoren zum Gülle- bzw. Festmistanfall wird daraus der Wirtschaftsdüngeranfall je Tierkategorie auf Gemeindeebene berechnet (Siehe Abb. 10). Für die Umrechnung der Volumenangaben zum Gülleanfall wird für Gülle eine Dichte von 1 t/m^3 angenommen. Schließlich wird der Wirtschaftsdüngeranfall auf Gemeindeebene nach Tierarten aggregiert.

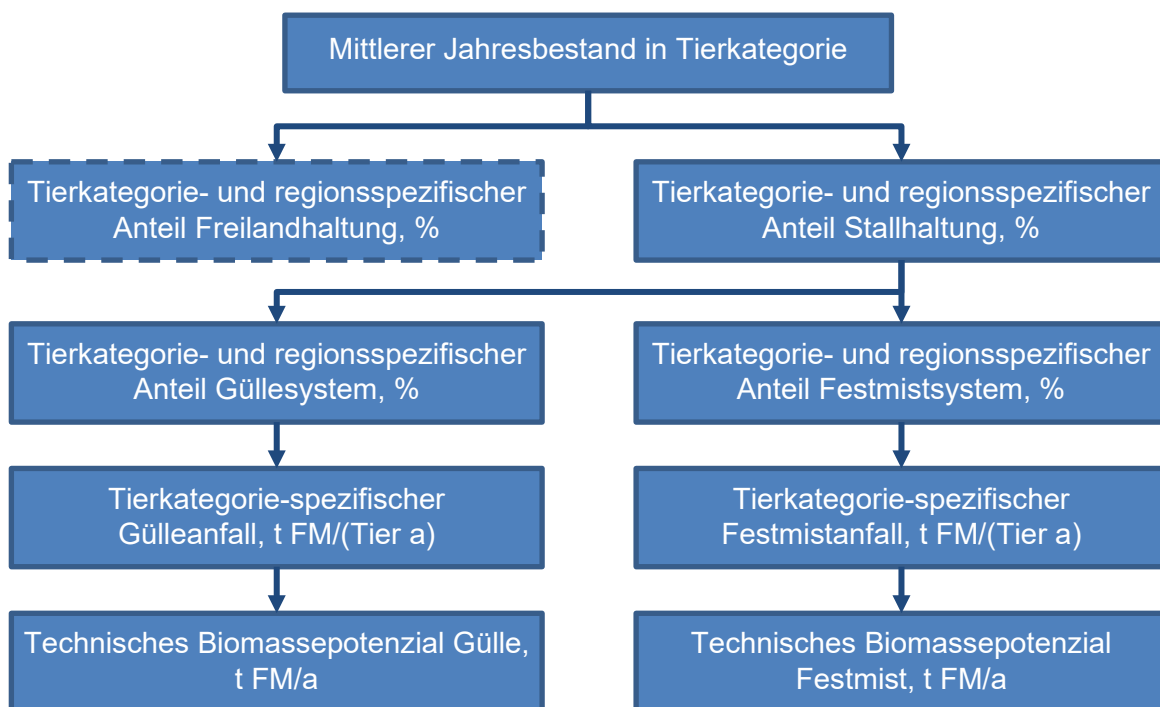


Abb. 10: Schema zur Berechnung des Biomasseanfalls aus der Tierhaltung.

4.2 Bilanzierung des technischen Biomassepotenzials

Das technische Biomassepotenzial zur Biogaserzeugung, $TBPot_{BG}$ wird auf Gemeindeebene ausgewertet. Hierbei unterscheidet sich die Berechnung für die unterschiedlichen Typen von Biomasse wie folgt.

Für **Biomasse ohne Nutzungskonkurrenz**, B_{oK} , das sind Wirtschaftsdünger sowie Nebenprodukte von nicht als Futtermittel oder Einstreu genutzten Ackerkulturen (Vergleiche Tab. 3), entspricht das Technische Biomassepotenzial zur Biogaserzeugung, $TBPot_{BG,oK}$ der gesamten Produktion dieser Biomasse:

$$TBPot_{BG,oK} = BProd_{oK}$$

Für **Biomasse mit Nutzungskonkurrenz zur Tierhaltung**, B_{KT} , das sind Grünlandaufwuchs sowie als Einstreu genutzte Ernte-Nebenprodukte (Vergleiche Tab. 3) entspricht das Technische Biomassepotenzial zur Biogaserzeugung, $TBPot_{BG,KT}$ der verbliebenen Biomasseproduktion nach Abzug des Bedarfs der Tierhaltung, $BBed_T$.

Für **Biomasse mit Nutzungskonkurrenz zur Futtermittel- oder Lebensmittelerzeugung**, B_{KFL} , das sind Marktfrüchte und Grünfutter vom Ackerland (Vergleiche Tab. 3) wird das Technische Biomassepotenzial zur Biogaserzeugung, $TBPot_{KFL}$ dem aktuellen Biomassebedarf für die Biogaserzeugung, $BBed_{BG}$ gleichgesetzt.

Ist in einer Gemeinde für eine bestimmte Biomasse der Bedarf für die Tierhaltung größer als die Produktion, gilt: $TBPot_{BG} = 0$ (Vergleiche Abb. 11: Importgemeinde, Fall 1). Das Biomassedefizit muss durch Import aus anderen Gemeinden ausgeglichen werden. Ist in einer Gemeinde für eine bestimmte Biomasse die Produktion größer als der Bedarf für die Tierhaltung und zugleich nicht ausreichend, um den Gesamtbedarf für Tierhaltung und Biogasproduktion zu decken, gilt zwar: $TBPot_{BG} > 0$, es ergibt sich jedoch ein Importbedarf (Vergleiche Abb. 11: Importgemeinde, Fall 2). Fällt in einer Gemeinde mehr Biomasse eines bestimmten Typs an, als zur Bedarfsdeckung der Tierhaltung in dieser Gemeinde benötigt wird, kann ein Export dieser Biomasse zur Bedarfsdeckung in anderen Gemeinden erfolgen (Vergleiche Abb. 11: Exportgemeinde).

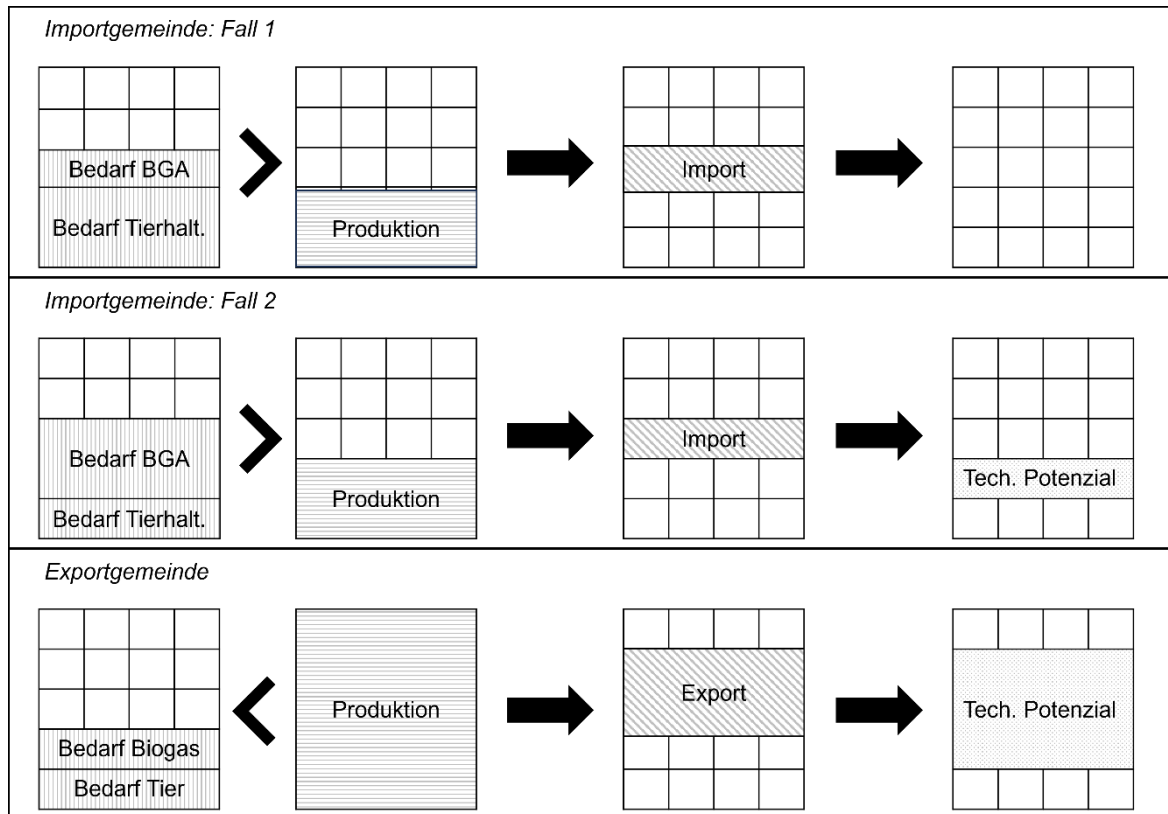


Abb. 11: Schematische Darstellung der Bilanzierung des technischen Biomassepotenzials für die Biogasproduktion in Import- und Exportgemeinden unter Berücksichtigung des Biomassebedarfs für die Tierhaltung.

Die Biomassedefizite von Importgemeinden und die Biomasseüberschüsse von Exportgemeinden werden für das gesamte Gebiet von Bayern saldiert. Für alle in der Menge prinzipiell beschränkten Biomassetypen wird die Gesamtmenge der Defizite (= Importmengen) auf die Exportgemeinden verteilt, entsprechend deren jeweiligen Anteilen am Gesamtüberschuss. Dadurch wird für diese Biomassetypen das technische Biomassepotenzial denjenigen Gemeinden zugeordnet, in denen die ursprüngliche Produktion und nicht die Nutzung dieser Biomasse stattfindet. Auf diese Weise werden folgende wichtige Aspekte berücksichtigt: i) Der Transport von Biomasse über Gemeindegrenzen hinweg; ii) die korrekte Zuordnung des technischen Potenzial zu derjenigen Gemeinde, in der die Biomasse tatsächlich produziert wird und iii) die vollständige Erfassung des Potenzials auch in denjenigen Gemeinden, in denen der Verbrauch eines bestimmten Biomassetyps dessen Produktion übersteigt.

4.3 Technisches und genutztes Methanpotenzial

Von entscheidendem Interesse für das Vorankommen der Energiewende ist die Frage, in welcher Höhe noch ungenutztes Potenzial an Biomasse zur Biogaserzeugung verfügbar ist. Dem geschätzten technischen Biogaspotenzial ist dazu der aktuelle Umfang der Nutzung von Biogas gegenüberzustellen.

Das Technische Methanpotenzial aus einem bestimmten Biomassetyp, $TMetPot_b$ berechnet sich aus dem technischen Biomassepotenzial, wie in Abschnitt 4.2 erläutert, durch Multiplikation mit den typischen Werten für den organischen Trockenmassegehalt, oDM und die Methanausbeute, Y_M dieser Biomasse nach Dandikas et al. (2021). Das gesamte technische

Methanpotenzial aus der Landwirtschaft ergibt sich, in dem $TMetPot_b$ für alle betrachteten Typen von Biomasse (b) in allen Gemeinden (g) in Bayern aufsummiert wird:

$$TMetPot = \sum_g \sum_b (TBPot_{b,g}^{BG} * oDM_b * Y_b)$$

Das genutzte Methanpotenzial wurde aus den verfügbaren Daten der Übertragungsnetzbetreiber zur Brutto-Stromerzeugung der auf Biogasanlagen betriebenen BHKW zurückgerechnet, ergänzt durch Angaben im Marktstammdatenregister und eine Datenbank beim LfU. Hierbei wurde für den spezifischen Methanbedarf ein mittlerer Wert von 2,56 m³ pro Kilowattstunde angesetzt (Vergleiche Abschnitt 4.1.3).

Nicht miteinberechnet wurde die Stromerzeugung von BHKW, welche Biomethan aus dem öffentlichen Gasnetz beziehen, da dieses Biomethan auch außerhalb Bayerns und somit der Bilanzgrenze der Potenzialstudie produziert worden sein könnte. Mit in die Berechnung einbezogen wurde jedoch das in Bayern ins öffentliche Netz eingespeiste Biomethan aus Anlagen zur Biogasaufbereitung. Zwar kann dieses Biomethan bilanziell auch außerhalb Bayerns verwertet worden sein, es wurde jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit aus Biomasse erzeugt, welche innerhalb Bayerns anfällt.

5 Betrachtung von Szenarien und Sensitivitäten

Ausgehend von der Analyse des aktuellen Potenzials (d. h. im Basisjahr 2022) wird das technische Methanpotenzial im Jahr 2030 für drei Szenarien zur Entwicklung der grundlegenden Rahmenbedingungen für die Biogaserzeugung aus landwirtschaftlicher Biomasse abgeschätzt. Für das Szenario „Hoch“ werden Annahmen getroffen, welche den Ausbau der Biogaserzeugung begünstigen. Demgegenüber wird für das Szenario „Niedrig“ angenommen, dass die Rahmenbedingungen einschränkend auf die Biogaserzeugung wirken. Das Szenario „Mittel“ liegt dazwischen und bildet im Wesentlichen die Fortschreibung aktueller Trends ab. Als Mindestanforderung an alle drei Szenarien gilt jedoch, dass die aktuell geltenden Vorgaben zum Natur- und Umweltschutz eingehalten werden und sich diesbezüglich keine Verschlechterung ergibt.

5.1 Annahmen in den Szenarien für die Biomasse aus pflanzlicher Produktion

Für die Berechnung des Potenzials an Biomasse aus pflanzlicher Produktion wird in allen Szenarien angenommen, dass die regional- und anlagentypspezifischen Ertragsparameter und Substratmischungen unverändert bleiben. Auf Gemeindeebene wird für die Ackernutzung eine durchschnittliche Fruchtfolge auf Basis der Nutzungscodes und Flächen der Jahre 2018 bis 2022 unterstellt. Die Flächen an Dauergrünland werden in den Szenarien gegenüber dem Basisjahr als unverändert angenommen. Dies bedeutet, dass in den Szenarien die mengenmäßig prinzipiell beschränkten Biomassen vom Typ Grünfutter und Marktfrucht (Vergleiche Abschnitt 4.1.1), im Umfang des aktuellen Verbrauchs weiterhin zur Verfügung stehen, sofern deren gesamte Produktionsmenge in Bayern nicht kleiner ist als deren Verbrauch.

Der Umfang der im Jahr 2030 zur Verfügung stehenden landwirtschaftlichen Nutzfläche (LF) wird ausgehend vom Basisjahr 2022 geschätzt. Hierbei werden die Flächeninanspruchnahme für Siedlungen und Verkehrswege, die Wiedervernässung von landwirtschaftlich genutzten Moorflächen, die verpflichtende Stilllegung von Ackerland im Rahmen der GAP sowie freiwillige produktionseinschränkende Maßnahmen zum Natur- und Umweltschutz berücksichtigt, wie in Tab. 5 zusammengefasst.

Der jährliche Verlust an LF wird auf die einzelnen Gemeinden entsprechend deren Anteilen an der gesamten LF in Bayern verteilt. Im Szenario „Niedrig“ wird davon ausgegangen, dass der über die Jahre 2013 bis 2020 gemittelte jährliche Flächenverbrauch im Umfang von 11,3 ha pro Tag unverändert fortschreitet. Im Szenario „Hoch“ wird angenommen, dass das politische Ziel der Verringerung des Flächenverbrauchs auf 5 ha täglich erreicht wird, und im Szenario „Mittel“ wird der Mittelwert zwischen den Szenarien „Hoch“ und „Niedrig“ angesetzt.

Bei der Wiedervernässung von landwirtschaftlich genutzten Moorflächen wurde angenommen, dass Ackerland in Dauergrünland umgewandelt wird, auf welchem in Folge der Wiedervernässung jedoch nur die Hälfte des Ertrags gegenüber extensiv genutztem Dauergrünland erzielt wird (Je nach Regierungsbezirk beläuft sich somit der Frischmasseertrag auf 9,1 – 12,1 t FM/a). Um das von der Bayerischen Staatsregierung ursprünglich ausgegebene Ziel der Klimaneutralität bis zum Jahr 2040 zu erreichen, müssten im jährlichen Durchschnitt ehemalige Moorflächen im Umfang von rund 2.750 ha wiedervernässt werden; demgegenüber wurden in den Jahren 2014 bis 2018 jährlich nur etwa 135 ha wiedervernässt (Bayerischer Oberster Rechnungshof 2021). Letzterer Wert wird für das Szenario „Hoch“

angenommen und für das Szenario „Mittel“ bzw. „Niedrig“ um 50 % bzw. 100 % gesteigert (Vergleiche Tab. 5).

Für alle Empfänger von Zahlungen im Rahmen der Gemeinsamen Agrar-Politik (GAP) gelten in Deutschland die Grundsätze der Erhaltung landwirtschaftlicher Flächen in gutem landwirtschaftlichem und ökologischem Zustand (GLÖZ). Darin enthalten ist die Vorgabe eines Anteils nichtproduktiver Flächen am gesamten betrieblichen Ackerland von mindestens vier Prozent (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2023). Für die freiwillige Erhöhung dieses Anteils auf bis zu sechs Prozent können Förderprämien im Rahmen der Öko-Regelungen beantragt werden. Dementsprechend wurde die Stilllegungsquote im Szenario „Hoch“ entsprechend dem gesetzlich vorgeschriebenen Mindestwert angesetzt und in den Szenarien „Mittel“ und „Niedrig“ schrittweise um einen Prozentpunkt erhöht.

Tab. 5: Übersicht über divergierende Annahmen in den Szenarien, welche den Biomasseanfall aus pflanzlicher Produktion beeinflussen.

| Szenariobezeichnung | Niedrig | Mittel | Hoch |
|--|---------|--------|-------|
| Flächenverbrauch für Siedlungen und Verkehr, ha/a | 4.111 | 2.968 | 1.825 |
| Wiedervernässung von landw. genutzten Moorflächen, ha/a | 270 | 203 | 135 |
| Stilllegungsanteil von Ackerland, % | 6 | 5 | 4 |
| Änderungsrate des Anteils der nichtproduktiven LF, %-Punkte/a | +0,5 | 0 | -0,5 |
| Anteil der Gärreste von Nebenprodukten, welche auf die Anbauflächen zurückgebracht werden – außer Getreidestroh, % | 50 | 75 | 100 |

Des Weiteren sollten auch die Auswirkungen von freiwilligen Maßnahmen zum Natur- und Umweltschutz Berücksichtigung finden, welche im Rahmen von Förderprogrammen wie dem Kulturlandschaftsprogramm (KULAP), dem Vertragsnaturschutzprogramm (VNP) oder den Öko-Regelungen (ÖR) erbracht werden. Diese lassen sich hinsichtlich der Schutzgüter in die folgenden vier Kategorien einteilen:

1. Biodiversität und Artenvielfalt;
2. Boden und Gewässer;
3. Klima;
4. Kulturlandschaft.

Detaillierte Informationen, wann und wo solche Maßnahmen umgesetzt wurden, sind zwar im INVEKOS verfügbar, jedoch sind den Autoren keine Angaben aus systematischen Untersuchungen bekannt, wie sich diese Maßnahmen, einzeln und in Kombination, auf die landwirtschaftlichen Erträge und somit das Biomassepotenzial aus der pflanzlichen Produktion auswirken. Um diesen Aspekt in den Szenarien abbilden zu können, wird daher auf einen sehr stark vereinfachten agronomischen Ansatz zurückgegriffen: Es wird angenommen, dass bei einem erzielbaren Deckungsbeitrag von 1.000 € pro Hektar eine freiwillige Maßnahme zum Natur- und Umweltschutz, welche mit einer Kompensationszahlung in

Höhe von 10 € pro Hektar vergütet wird, den Ertrag um den entsprechenden Bruchteil, also um $10 \text{ €} / 1.000 \text{ €} = 1 \%$ mindert. Des Weiteren wird nur diejenige Maßnahme mit der höchsten Kompensationszahlung für die Abschätzung der Ertragsminderung berücksichtigt, entsprechend der Annahme, dass es zu keiner Kumulierung der produktionseinschränkenden Effekte kommt, wenn auf derselben Fläche mehrere Maßnahmen umgesetzt werden.

Der geschätzte Biomasseertrag einer Kultur (k) von einer Fläche $F_{f,k}$, auf der freiwillige (f) Maßnahmen zum Natur- und Umweltschutz erfolgen, kann somit berechnet werden, indem die Fläche mit dem für die jeweilige Kultur und Region (j) spezifischen Ertragsfaktor $e_{j,k}$ und einem Flächenkorrekturfaktor u_f multipliziert wird:

$$BProd_{f,k} = F_{f,k} * u_f * e_{j,k}$$

Der Flächenkorrekturfaktor entspricht dem geschätzten relativen Ertrag bei Anwendung derjenigen Maßnahme mit der höchsten Kompensationszahlung $x_{f,max}$:

$$u_f = 100 \% - x_{f,max} * \frac{1 \%}{10 \text{ €}}$$

Zusätzlich wird eine jährliche Änderungsrate für den Anteil der LF mit Produktionseinschränkungen eingeführt, um in den Szenarien den Effekt einer Ausweitung (Szenario „Niedrig“) oder Einschränkung (Szenario „Hoch“) von freiwilligen Maßnahmen zum Natur- und Umweltschutz auf den Umfang der nichtproduktiven LF abzubilden (Vergleiche Tab. 5).

5.2 Annahmen in den Szenarien für den Anfall und Bedarf von Biomasse in der Tierhaltung

Für die Tierhaltung wurden die Viehbestände im Jahr 2030 geschätzt, indem je Tierkategorie die Bestände im Basisjahr unter Verwendung einer jährlichen Veränderungsrate fortgeschrieben wurden. Die durchschnittliche jährliche Veränderungsrate r wurde aus den jeweiligen Tierzahlen n für ganz Bayern in den Jahren 2022 und 2018 nach folgender Formel geschätzt:

$$r_{2018/2022} = \left(\frac{n_{2022}}{n_{2018}} \right)^{\frac{1}{2022-2018}} - 1$$

Für Rinder und Schweine sind die auf diese Weise berechneten Veränderungsraten in Tab. 6 aufgeführt. Diese liegen bei Schweinen mit ca. -5 % deutlich höher als bei Rindern mit ca. -2 % (Ausnahme: Männliche Rinder über 2 Jahre, Zuchtbullen). Für das Szenario „Niedrig“ wurden diese Veränderungsraten um 0,1 verringert (Vergleiche Tab. 7), was einen stark beschleunigten Rückgang der Viehbestände gegenüber der jüngsten Vergangenheit bedeuten würde.

Tab. 6: Für die Szenarienbildung geschätzte jährliche Veränderungsraten des Viehbestands von Rindern und Schweinen.

| Tierkategorie | Veränderungsrate, 1/a |
|---|-----------------------|
| Kälber (Zucht/Mast) bis 6 Monate | -0,02 |
| Männliche Rinder über 6 Monate bis 1 Jahr | -0,022 |
| Männliche Rinder über 1 Jahr bis 2 Jahre | -0,018 |

| Tierkategorie (Fortsetzung) | Veränderungsrate, 1/a |
|---|-----------------------|
| Männliche Rinder über 2 Jahre, Zuchtbullen | 0,023 |
| Weibliche Rinder 6 Mo. bis 1 Jahr | -0,02 |
| Weibliche Rinder 1 bis 2 Jahre | -0,019 |
| Andere weibliche Rinder über 2 Jahre | -0,028 |
| Kühe (Milch-, Mutter- und Ammenkühe) | -0,02 |
| Ferkel bis unter 30 kg | -0,05 |
| Zuchtsauen ab 1. Abferkelung / Jungsauen trächtig | -0,055 |
| Andere Zuchtschweine (o. Eber) ab 50 kg | -0,045 |
| Jungschweine 30 bis unter 50 kg | -0,045 |
| Mastschweine (einschl. Eber) ab 50 kg | -0,037 |

Die sonstigen den Biomassebedarf in der Tierhaltung bestimmenden Faktoren (Vergleiche Abschnitt 4.1.4) wurden in den Szenarien unverändert gelassen. Die Szenarien unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der zur Biogasproduktion verfügbaren, weil nicht mehr in der Tierhaltung benötigten „beschränkten“ Biomasse (Tab. 7: unterste Zeile). Dabei handelt es sich um eine zentrale Annahme mit erheblicher Auswirkung auf die Ergebnisse. Methodisch und politisch bestehen zwei mögliche Sichtweisen: Einerseits kann argumentiert werden, dass diese Biomasse nicht als Potenzial für die Bioenergienutzung anerkannt werden darf, da sie per Definition den „beschränkten“ Biomassetypen zugeordnet ist und somit von vornherein nicht für einen zusätzlichen Ausbau vorgesehen war. Andererseits ließe sich vertreten, dass die bisher in der Tierhaltung gebundene Biomasse mit dem Rückgang der Viehbestände tatsächlich frei wird und somit als Potenzial für die Biogasproduktion neu erschlossen werden kann. Je nach gewählter Sichtweise variiert das ausgewiesene technische Potenzial erheblich. In den Szenarien wird diese Unsicherheit durch unterschiedliche Annahmen zur energetischen Nutzung der freiwerdenden Biomasse abgebildet: von einer vollständigen (0 %) über eine teilweise (50 %) bis hin zu einer vollständigen Verfügbarkeit (100 %).

Tab. 7: Übersicht über divergierende Annahmen in den Szenarien, welche den Biomasseanfall und -bedarf der Tierhaltung beeinflussen.

| Szenariobezeichnung | Niedrig | Mittel | Hoch |
|--|-----------------------|-----------------|-----------------|
| Jährliche Änderungsrate des Viehbestands je Tierkategorie | $r_{2018/2022} - 0,1$ | $r_{2018/2022}$ | $r_{2018/2022}$ |
| Anteil der freiwerdenden Biomasse, die für die Biogasproduktion zusätzlich verfügbar ist | 0 % | 50 % | 100 % |

5.3 Annahmen in den Szenarien für die Entwicklung der Biogaserzeugung und -nutzung

Es ist hervorzuheben, dass das technische Potenzial grundsätzlich unabhängig von der tatsächlichen oder zukünftigen Biogaserzeugung ist. Für die Berechnung des ungenutzten (oder: noch verfügbaren) technischen Potenzials muss jedoch die Differenz zwischen technischem und genutztem Potenzial gebildet werden. Daher ist für die Abschätzung des zukünftig ungenutzten technischen Potenzials zwingend eine Annahme über die Entwicklung des Anlagenbestands erforderlich.

Die zukünftige Entwicklung des Anlagenbestands und der Energiebereitstellung aus Biogas wird von einer Vielzahl an verschiedenartigen Faktoren beeinflusst. Hier sind insbesondere das reguläre Ende der Förderperiode nach dem EEG, vorzeitige Außerbetriebnahmen, das Volumen und der Höchstgebotswert der Ausschreibungen, weitere energiewirtschaftliche Regelungsmechanismen im EEG, die Entwicklung der Substratpreise, aber auch technische Regelwerke zu nennen. Somit erschien es praktisch nicht möglich, belastbare Prognosen für die Entwicklung des Anlagenbestands auf Basis dezidierter Annahmen für alle relevanten Einflussfaktoren zu erstellen.

Stattdessen wurde für die Szenarien pauschal die prozentuale Veränderung des genutzten Methanpotenzials im Jahr 2030 im Verhältnis zum Ist-Stand im Basisjahr wie folgt festgelegt:

- Szenario „Hoch“: keine Veränderung;
- Szenario „Mittel“: Verringerung um 5 %;
- Szenario „Niedrig“: Verringerung um 15 %.

Für das Verständnis der Ergebnisse zur Potenzialberechnung ist zu beachten, dass sich das ungenutzte technische Potenzial jeweils als Differenz aus dem technischen und dem genutzten Methanpotenzial ergibt. Eine Verringerung der Biogasnutzung ergibt somit auch dann eine Zunahme des ungenutzten Potenzials, wenn das technische Methanpotenzial gleichbleibt oder in geringerem Maße abnimmt als das genutzte Methanpotenzial.

5.4 Sensitivitätsanalyse

Die oben erläuterten Szenarien dienen vor allem dazu, einen verlässlichen Erwartungsbereich für das technische Methanpotenzial aus der Vergärung von landwirtschaftlicher Biomasse in mittelfristiger Perspektive abzustecken. Um hingegen den Einfluss einzelner Parameter auf das verfügbare Methanpotenzial zu verstehen, wurden zusätzlich Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Diese sind unabhängig von den Szenarien zu sehen und stellen keine Prognosen, sondern vielmehr „Was-wäre-wenn“-Analysen dar, die den Einfluss einzelner Parameter isoliert quantifizieren und sichtbar machen.

An dieser Stelle wird ein Auszug der Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalysen vorgestellt, welche in einem Zeitschriftenartikel veröffentlicht wurden (Steindl et al. 2025) und im Energie-Atlas Bayern nicht verfügbar sind. Für diese Sensitivitätsanalyse wurde eine Monte-Carlo-Simulation mit $n = 10.000$ Durchläufen auf ein lineares Regressionsmodell zur Abschätzung des Technischen Methanpotenzials $TMetPot$ angewandt, welches die folgenden landwirtschaftlichen Variablen enthält:

- relative Verringerung der produktiven LF
- relative Verringerung des Tierbestands
- relative Verringerung des Anteils am Tierbestand in Stallhaltung

-
- relative Steigerung des Anteils an Marktfrüchten und Grünfutter vom Ackerland (Vergleiche Abschnitt 4.2), der witterungsbedingt vorzeitig geerntet werden muss, und keine Verwendung als Nahrungs- oder Futtermittel zulässt

Zusätzlich wurden mittels einer Schaltvariable die zwei Fälle unterschieden, ob anfallende Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung bzw. nicht mehr für die Tierhaltung benötigte „beschränkte“ Biomasse für die Biogaserzeugung nutzbar sind oder nicht.

6 Vorstellung und Einordnung der Ergebnisse

Für die Interpretation der Ergebnisse ist es wichtig zu beachten, dass die Berechnungen für die in Biogasanlagen genutzte Biomasse zum einen und für das technische Biogaspotenzial zum anderen auf verschiedenen Datengrundlagen basieren. Die Nutzung in Biogasanlagen wurde aus der Energieproduktion in Verbindung mit geschätzten Methanerträgen und Substratmischungen abgeleitet (Vergleiche Abschnitt 4.1.3). Das technische Potenzial hingegen wurde auf Basis der verfügbaren Angaben zur Flächennutzung und Tierhaltung sowie regionalspezifischen Schätzwerten für die verwendeten landwirtschaftlichen Parameter ermittelt, wie in Kapitel 4.1 beschrieben.

Im Jahr 2021 wurden laut der vorliegenden Studie 1.689 Mio. m³ Methan in Biogas aus landwirtschaftlicher Biomasse erzeugt. Demgegenüber steht ein für das Jahr 2022 berechnetes technisches Methanpotenzial in Höhe von 3.026 Mio. m³. Vernachlässigt man die Abweichung um ein Jahr zwischen der Nutzung und dem technischen Potenzial von Methan aus Biogas, welche in der unterschiedlichen Verfügbarkeit der jeweiligen Datenbasis begründet ist, waren rund 56 % des aktuellen technischen Biogaspotenzials erschlossen. Das mögliche technische Biomethanpotenzial aus Biogas in den Szenarien für das Jahr 2030 beträgt im Vergleich zum aktuellen technischen Potenzial 94 bis 113 % (Tab. 8).

Tab. 8: *Aktuell und in den Szenarien für das Jahr 2030 ungenutztes Biogaspotenzial, absolut und relativ zum aktuellen technischen Potenzial, unterteilt in verschiedene Kategorien von Biomasse aus der Landwirtschaft.*

| Szenario | Nutzung, Mio. m ³ | | Technisches Methanpotenzial, Mio. m ³ | | |
|---------------------------------|---------------------------------|-------|---|------------------|------------------|
| | Aktuell | | „Niedrig“ | „Mittel“ | „Hoch“ |
| Bezugsjahr | 2021 | 2022 | 2030 | | |
| Grünfutter, beschränkt | 1.206 (100 %)* | 1.206 | 651 | 734 | 734 |
| Marktfrüchte | 162 (100 %) | 162 | 1.206 | 1.279 | 1.352 |
| Grünfutter, unbeschränkt | 119 (50 %) | 239 | 452 | 392 | 523 |
| Wirtschaftsdünger | 196 (24 %) | 832 | 162 | 176 | 189 |
| Nebenprodukte | 6,2 (1 %) | 587 | 374 | 474 | 620 |
| SUMME | 1.689 (56 %) | 3.026 | 2.845 (94 %) | 3.055 (101 %) | 3.418 (113 %) |

*) im Verhältnis zum aktuellen technischen Potenzial.

Die aktuelle Nutzung von Biomasse aus der Landwirtschaft zur Biogaserzeugung basiert zu rund 80 % auf Grünfutter und Marktfrüchten vom Ackerland, d. h. auf Biomasse, welche im Prinzip in Nutzungskonkurrenz mit der Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln

steht (Abb. 12: Säule ganz links). Da gemäß Randbedingung für die Potenzialanalyse die Nutzung von Biomasse dieser Kategorien zur Biogasfermentation nicht ausgeweitet werden soll, beträgt deren entsprechender Anteil am technischen Biogaspotenzial lediglich rund 45 %. Die für die Szenarien „Niedrig“ und „Mittel“ ausgewiesene geringfügige Steigerung resultiert nicht aus einer Ausweitung der Produktion, sondern aus einem verminderten Bedarf für Biomasse dieser Kategorien in der Tierhaltung.

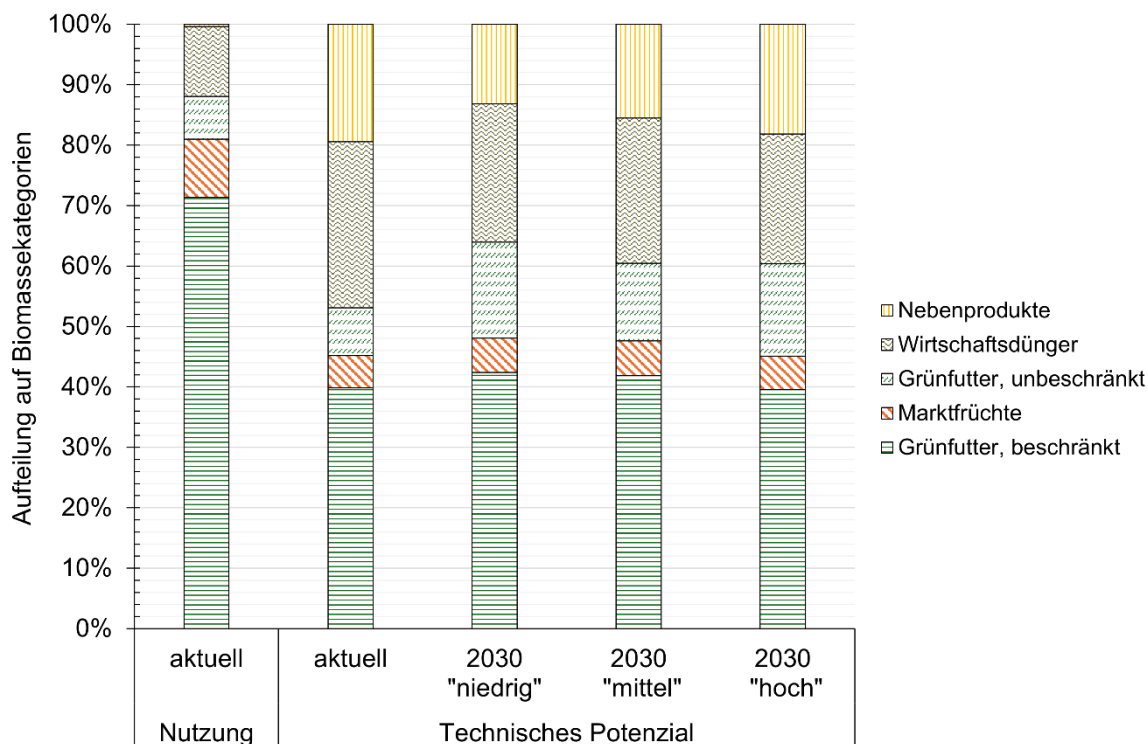


Abb. 12: Aufteilung der aktuellen Biogasfermentation bzw. des technischen Biogaspotenzials auf verschiedene Kategorien von Biomasse aus der Landwirtschaft.

Das technische Biogaspotenzial von Wirtschaftsdüngern in Bayern wird lediglich zu knapp 24 % genutzt (Tab. 8). Während rund 12 % des aktuell genutzten Methanpotenzials aus Wirtschaftsdüngern erzeugt werden, stellen diese Substrate rund 27 % des gesamten technischen Potenzials. Selbst bei abnehmenden Viehbeständen machen die Wirtschaftsdünger in den Szenarien für das Jahr 2030 noch immer ca. 21 – 23 % des technischen Potenzials aus (Abb. 12).

Die Nutzung des Aufwuchses von Dauergrünland („Grünfutter, unbeschränkt“) erfolgt aktuell mit einem Anteil von 7 % an der Biogasfermentation nahe dessen entsprechendem Anteil am gesamten technischen Potenzial. Gemäß den Szenarien könnte sich der relative Beitrag dieser Biomasse zum technischen Biogaspotenzial zukünftig in etwa verdoppeln.

Bei den Nebenprodukten fällt in Tab. 8 auf, dass die ermittelte Nutzung im Vergleich zum ausgewiesenen technischen Potenzial marginal ist. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Biogasfermentation aus Getreidestroh, welches als Einstreumaterial verwendet wird, der Kategorie Wirtschaftsdünger zugeschlagen wird. Hingegen waren in der verwendeten Datengrundlage die Mengen an Ernte-Nebenprodukten, welche explizit als Substrate ausgewiesen wurden, sehr gering.

In der Studie von Steindl et al. (2025) fällt das absolute technische Methanpotenzial aufgrund einiger abweichender Annahmen mit 3.333 Mio. m³ um rund 10 % höher aus als in der hier vorgestellten Potenzialanalyse, was an dieser Stelle nicht weiter thematisiert wird. Die dort vorgenommene Sensitivitätsanalyse ergibt einen signifikanten Zusammenhang des technischen Methanpotenzials mit allen vier betrachteten kontinuierlichen Variablen: produktive LF, Tierbestand, Anteil am Tierbestand in Stallhaltung („Aufstellungsquote“) und zusätzlicher Anfall an Biomasse aus Marktfrüchten und Grünfütter vom Ackerland aufgrund frühreifer Ernte. Für die drei ersten Variablen ergibt sich zudem ein signifikanter Zusammenhang mit der Verfügbarkeit von nicht mehr in der Tierhaltung benötigter Biomasse (Abb. 13).

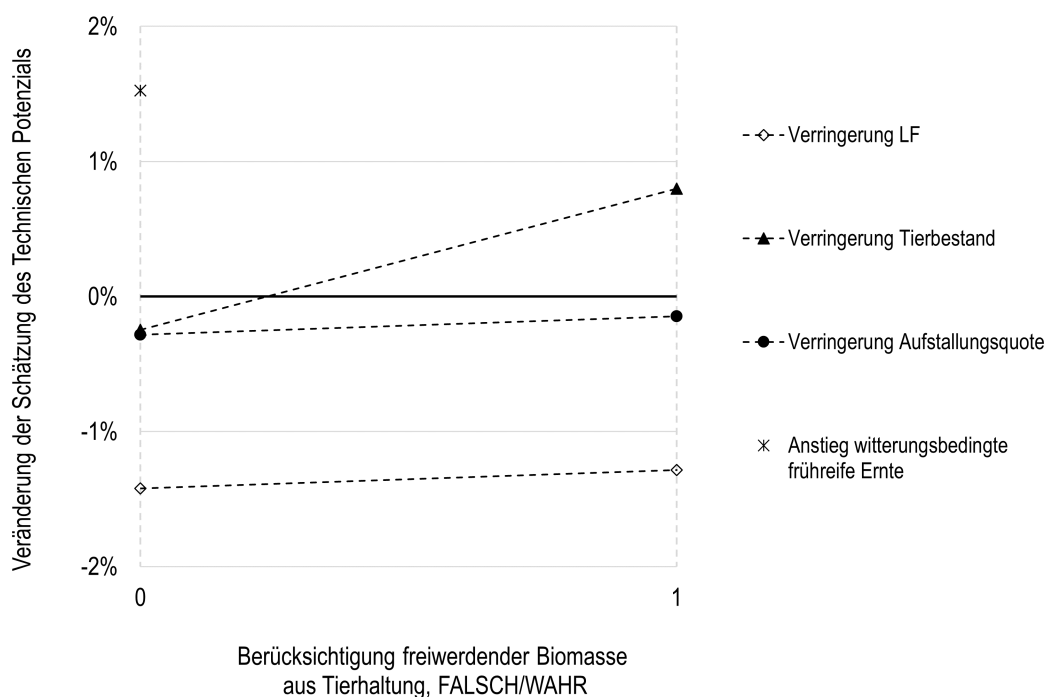


Abb. 13: Grafische Darstellung der Schätzwerte aus dem linearen Regressionsmodell nach Steindl et al. (2025) für die Sensitivität des Technischen Methanpotenzials T_{MetPot} gegenüber einer Veränderung der betreffenden Variable um ein Prozent. Lesebeispiel: Verringert sich die produktive LF um 1 % und wird aus der Tierhaltung frei werdende Biomasse nicht für die Biogasproduktion berücksichtigt, so nimmt T_{MetPot} schätzungsweise um 1,4 % ab; wird Biomasse aus der Tierhaltung zusätzlich berücksichtigt, sinkt T_{MetPot} nur um ca. 1,3 %. Dargestellt sind nur die signifikanten Zusammenhänge bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $<0,01$.

Die insbesondere für die Politik bedeutsame Frage, zu welchem Anteil das bisher ungenutzte technische Biogaspotenzial zukünftig weiter erschlossen werden kann, lässt sich anhand der vorliegenden Potenzialstudie nicht direkt beantworten. Vergleicht man die Ergebnisse aus der aktuellen Potenzialstudie mit denjenigen aus der Studie von Aschmann et al. (2013) (im Folgenden „Bayernplan-Studie“ genannt), kann jedoch beurteilt werden, wie realistisch die damals getroffenen Annahmen zum erschließbaren Potenzial waren: in der „Bayernplan-Studie“ war nicht das technische Potenzial, sondern das zusätzlich erschließbare Potenzial (gegenüber dem Referenzjahr 2011) zu berichten.

Es sollen zunächst die Ergebnisse aus den beiden Studien für die gesamte Nutzung bzw. das gesamte technische Potenzial von Biogas aus landwirtschaftlicher Biomasse betrachtet werden. Hierfür wurden die Werte aus der Bayernplan-Studie entsprechend in ein gesamtes technisches Potenzial im Jahr 2015 umgerechnet. Die Abweichungen, die sich aus unterschiedlichen Annahmen für die Berechnungsfaktoren in den beiden Studien ergeben, wurden für den Vergleich vernachlässigt. Auf Basis dieser Zahlen war die Methanerzeugung aus landwirtschaftlicher Biomasse in Bayern im Jahr 2021 um rund 17 % höher als im Jahr 2011 (Tab. 9: Zeile „Nutzung“).

Tab. 9: Nutzung und erschließbares bzw. technisches Potenzial (Schwankungsbereich) von Biogas aus landwirtschaftlicher Biomasse gemäß „Bayernplan-Studie“ und aktueller Potenzialstudie; alle Angaben in Mio. m³ Methan.

| Quelle | „Bayernplan“ (Aschmann et al. 2013) | aktuelle Studie (Krautkremer et al. 2024) |
|--|---|---|
| Nutzung | 1.447 | 1.689 |
| zusätzlich erschließbares Potenzial | 776 | - |
| Technisches Potenzial (Schwankungsbereich in Szenarien) | 2.823 (1.988...3.256) | 3.026 (2.845...3.418) |

Der Vergleich mit der Nutzung im Basisjahr der aktuellen Studie (2021) gegenüber den Schätzungen in der Bayernplan-Studie zeigt, dass ca. 31 % des zusätzlich erschließbaren Potenzials tatsächlich erschlossen wurden (Vergleiche Tab. 9: $(1.689 - 1.447) / 776$). Wendet man diesen beobachteten „Erschließungsfaktor“ von 0,31 auf das nicht erschlossene technische Potenzial gemäß der aktuellen Studie an (Vergleiche Tab. 9: $3.026 - 1.689 = 1.337$), ergibt sich folgender Schätzwert für das insgesamt erschließbare Methanpotenzial (Mio. m³):

$$1.689 + 0,31 * 1.337 = 2.103$$

Der zentrale Wert für das technische Methanpotenzial aus der aktuellen Studie weicht um $3.026 - 2.823 = 203$ Mio. m³ oder rund 7 % nach oben vom entsprechenden Wert aus der „Bayernplan-Studie“ ab (Tab. 9: unterste Zeile). Zusätzlich sind beim technischen Potenzial die Schwankungsbereiche in den behandelten Szenarien angegeben. Hierbei ist zu bedenken, dass diese Szenarien erhebliche Unterschiede in der Konstruktion und im Zeitbezug aufweisen.

Um die Abweichungen zwischen den beiden Studien und die Einflussfaktoren auf das technische Biogaspotenzial besser verstehen zu können, werden im Folgenden die Ergebnisse nach Biomassekategorien differenziert betrachtet. Zur Frage der Ausdehnung oder Einschränkung der Biogaserzeugung aus Silomais wurden in der „Bayernplan-Studie“ verschiedene Szenarien mit mehr oder weniger strengen ökologischen Kriterien und Fruchtfolgerestriktionen berechnet. Das sich daraus ergebende maximale bzw. minimale technische Methanpotenzial ist gemäß der Nomenklatur der aktuellen Potenzialstudie der Biomassekategorie „Grünfütter, beschränkt“ zuzuordnen. Diese Werte sind in Abb. 14 mit der entsprechenden Schraffur als Ausdehnung bzw. Einschränkung des Silomaisanbaus separat ausgewiesen. Zum Vergleich werden beim technischen Potenzial 2030 die entsprechenden Werte für das Szenario „Hoch“ bzw. „Niedrig“ dargestellt.

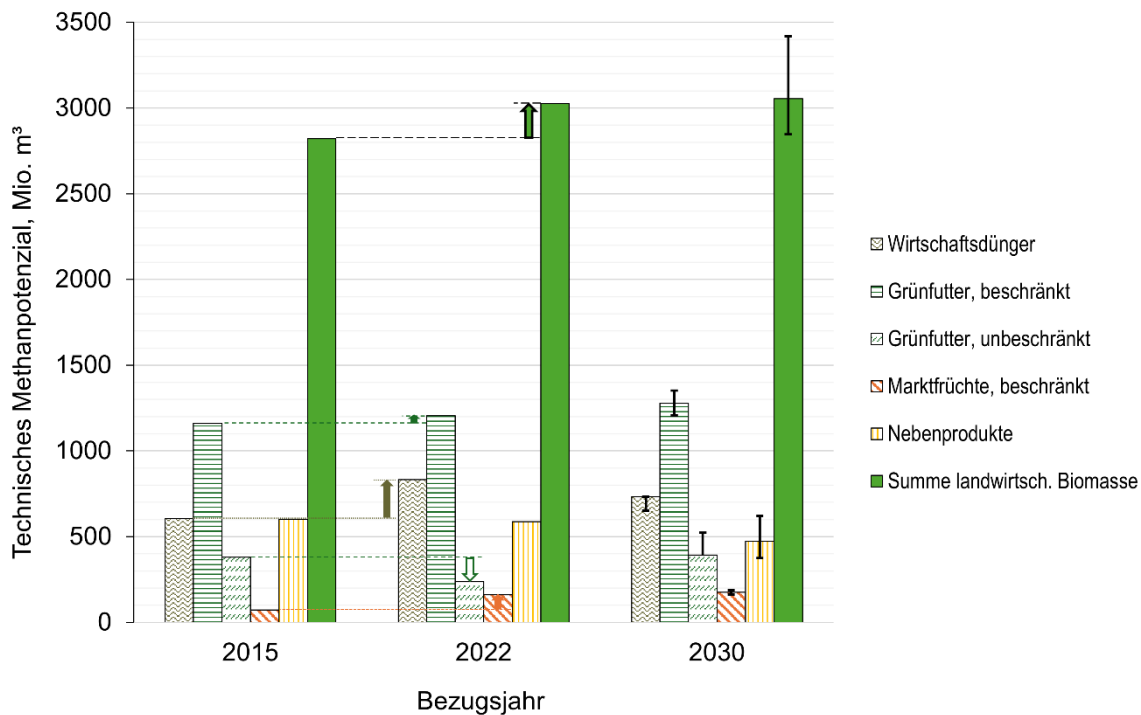


Abb. 14: Technisches Methanpotenzial aus Biogas in der „Bayernplan-Studie“ (2015) sowie in der aktuellen Studie (2022 und 2030), differenziert nach Biomassekategorien; für das Bezugsjahr 2030 stellen die Säulen das Szenario „Mittel“ dar, die Fehlerbalken den Wertebereich aller drei Szenarien; die Hilfslinien und Pfeile illustrieren den direkten Vergleich des technischen Potenzials 2015 vs. 2022.

Beim technischen Methanpotenzial aus „Grünfutter, beschränkt“ ist die Abweichung zwischen den zentralen Werten aus den beiden Studien sehr gering: ca. 4 % mehr in der aktuellen Studie. Die Berechnung des erschließbaren Potenzials in der „Bayernplan-Studie“ basiert hier auf den Maisanbauflächen, die durch rückläufige Tierbestände aus dem Futterbau freigesetzt werden, unter Annahme eines „Erschließungsfaktors“ von 50 %. In der aktuellen Studie entspricht das technische Potenzial von Biomasse dieser Kategorie dem Umfang der Nutzung. Demzufolge hat sich die zentrale Schätzung des erschließbaren Potenzials aus der Bayernplan-Studie hier als sehr treffsicher erwiesen. Die in der Bayernplan-Studie betrachteten extremen Szenarien zur Ausdehnung bzw. Einschränkung des Silomaisanbaus erscheinen hingegen im Vergleich zu den Szenarien in der aktuellen Studie als wenig realistisch.

Beim Dauergrünland / „Grünfutter, unbeschränkt“ fällt die deutliche Abweichung der aktuellen Schätzung des technischen Potenzials um 37 % nach unten gegenüber der Bayernplan-Studie auf; hingegen liegt der zentrale Wert im Szenario „Mittel“ für 2030 lediglich um 3 % höher (Abb. 14). Hauptsächliche Einflussfaktoren auf die Schätzung sind der prognostizierte Rückgang der Tierhaltung und der „Erschließungsfaktor“. Vergleicht man den Anteil an der Nutzung von Biogas aus dieser Biomassekategorie, fällt auf, dass dieser in der aktuellen Studie um 42 % geringer ist. In der Bayernplan-Studie wurde ein mittlerer Substratmix für alle Biogasanlagen auf Basis der Angaben zum Substrateinsatz für eine Stichprobe von 1.240 Anlagen (zum damaligen Zeitpunkt 52 % aller Anlagen) geschätzt. In der aktuellen Studie werden die Anlagen nach zwei Typen und vier Regionen unterschieden, und der jeweilige Substratmix auf Basis von Stichproben mit einem Gesamtumfang von 678 Anlagen

geschätzt (Vergleiche Abschnitt 4.1.3 bzw. Steindl et al. 2025). Worauf die deutlichen Unterschiede bei der Nutzung und dem kurzfristigen technischen Potenzial beruhen, kann hier nicht abschließend geklärt werden. Die langfristige Schätzung des technischen Biogaspotenzials aus Biomasse vom Dauergrünland erscheint im Vergleich der beiden Studien jedoch robust.

Die größten relativen Abweichungen zwischen den beiden Studien treten bei der Biomassekategorie Marktfrüchte auf (Abb. 14). In der Bayernplan-Studie fallen in diese Kategorie nur „Körner“ mit einem Anteil von 5 % am gesamten genutzten Methanpotenzial und für diese Biomasse wird kein zusätzliches erschließbares Potenzial ausgewiesen. In der aktuellen Studie wurden in dieser Kategorie erfasst (Anteil an der genutzten Frischmasse dieser Kategorie): Getreidekorn (44 %), Maiskorn (33 %), Zuckerrüben (21 %), Kartoffeln (1 %) sowie geringe Mengen an Korn von Sonnenblumen und Leguminosen. Kurzfristig wird keine Ausweitung der Nutzung dieser Biomasse zur Biogaserzeugung erlaubt, langfristig eine Zunahme um knapp 20 % aus dem Anbau auf Ackerflächen, die aus der Tierhaltung freigesetzt werden. Somit waren die diesbezüglichen Annahmen in der Bayernplan-Studie deutlich restriktiver als die realen Entwicklungen.

Der Biogaserzeugung aus Wirtschaftsdüngern wird im Hinblick auf den Klimaschutz große Bedeutung beigemessen, tatsächlich gelang es in den letzten Jahren jedoch nicht annähernd, die politischen Ziele zum Ausbau der Wirtschaftsdüngervergärung zu erreichen. Aus dem Vergleich der beiden Potenzialstudien berechnet sich zwar eine Zunahme der Biogaserzeugung aus Wirtschaftsdüngern um 49 %, jedoch werden aktuell lediglich 27 % des in der Bayernplan-Studie ausgewiesenen erschließbaren Potenzials ausgeschöpft. Das erschließbare Potenzial wurde in der aktuellen Studie um 37 % höher berechnet, wobei in der Bayernplan-Studie in der Rinder- und Schweinhaltung nur Tierbestände ab 50 GV bzw. in der Pferdehaltung ab 25 GV berücksichtigt wurden und zusätzlich ein „Mitmachfaktor“ von 50 % als Schätzwert für die Umsetzbarkeit angesetzt wurde. Aus heutiger Sicht scheint damit die konservative Schätzung gemäß Bayernplan-Studie dem umsetzbaren Potenzial näher zu kommen.

Bei den Ernte-Nebenprodukten schließlich liegt das gesamte technische Potenzial in den beiden Studien sehr nahe beieinander (Abb. 14). Die Parameter zur Berechnung des Strohanteils stimmen in beiden Studien im Wesentlichen überein. Das ausgewiesene Potenzial teilt sich allerdings unterschiedlich auf, mit einem laut aktueller Studie deutlich geringeren Anteil von Getreidestroh und einem deutlich höheren Anteil von Rapsstroh (Abb. 15). Da die Datenlage zur tatsächlichen Biogaserzeugung aus Ernte-Nebenprodukten im Vergleich zu den übrigen Biomassekategorien sehr schlecht ist, erlaubt die Zusammenschau der beiden Studien keine verlässlichen Aussagen dazu, welcher Anteil des entsprechenden technischen Potenzials realistischerweise erschlossen werden könnte.

Zusammengefasst erscheint die Abweichung zwischen den beiden, im Abstand von zehn Jahren erstellten Potenzialstudien angesichts der komplexen Berechnungen und methodischer Unterschiede moderat und plausibel: der zentrale Wert für das technische Methanpotenzial aus Biogas ist in der aktuellen Studie mit 3.026 Mio. m³ rund 7 % höher als in der Bayernplan-Studie (Vergleiche Tab. 9).

Man kann daraus schlussfolgern, dass die vorliegenden Berechnungen zum technischen Potenzial gut belastbar sind. Dies gilt insbesondere auch angesichts der zugrundeliegenden Randbedingung, dass keine Ausweitung der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen erfolgen soll: Hingegen wären gesonderte Untersuchungen erforderlich, um auf dieser Basis das erschließbare Potenzial in verlässlicher Weise abzuschätzen.

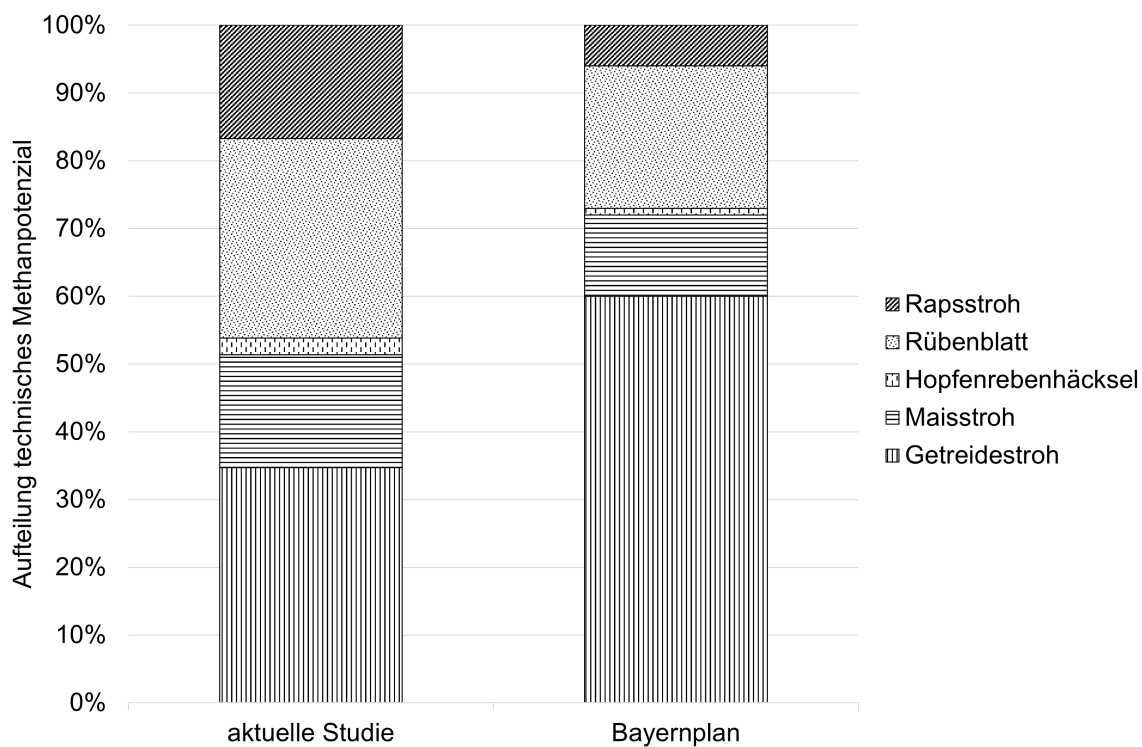


Abb. 15: Aufteilung des technischen Methanpotenzials aus Ernte-Nebenprodukten laut aktueller Studie bzw. Bayernplan-Studie.

Literaturverzeichnis

AGEB - Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (2025): Energiebilanz der Bundesrepublik 2023.

Agora Energiewende (2017a): Energiewende 2030: The Big Picture. Megatrends, Ziele, Strategien und eine 10-Punkte-Agenda für die zweite Phase der Energiewende. Agora Energiewende. Berlin. Online verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/Big_Picture/Agora_Big-Picture_WEB.pdf.

Agora Energiewende (2017b): Energiewende und Dezentralität. Zu den Grundlagen einer polarisierten Debatte. Analyse. Berlin.

Aschmann, Volker; Effenberger, Mathias; Graf, J.; Halama, M.; Keymer, Ulrich; Strobl, Martin; Winkler, J. (2013): Bayernplan: Einsatz von Biogas zum Ersatz von Gaskraftwerken. Arbeitsgruppe 1: „Potential, verfahrenstechnische und ökonomische Konsequenzen für die Biogaserzeugung“. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). München (LfL Schriftenreihe, 7/2013).

Bayerischer Oberster Rechnungshof (2021): Beratende Äußerung zur Renaturierung von Mooren. Beratung des Bayerischen Landtags gemäß Art. 88 Abs. 2 BayHO. Online verfügbar unter https://www.orh.bayern.de/berichte/beratende_aeusserungen/index.html, zuletzt geprüft am 03.12.2025.

Bayerisches Landesamt für Statistik: Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Pflanzliche Erzeugung (Erntestatistiken): C2102C Ernte der Feldfrüchte und des Grünlandes /Stichprobenerhebung. Online verfügbar unter https://www.statistik.bayern.de/statistik/wirtschaft_handel/landwirtschaft/index.html#link_4, zuletzt geprüft am 14.05.2025.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2024): Energie-Atlas Bayern – Mischpult „Energimix Bayern vor Ort“. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). Online verfügbar unter <https://www.karten.energieatlas.bayern.de/?comp=mischpult>, zuletzt geprüft am 03.12.2025.

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (2023): Merkblatt zur Erhaltung landwirtschaftlicher Flächen in gutem landwirtschaftlichem und ökologischem Zustand. Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms01/agrarpolitik/dateien/merkblatt_gl%C3%96z.pdf, zuletzt geprüft am 13.05.2025.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK); Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMU) (2022): Eckpunkte für eine Nationale Biomassestrategie (NABIS). Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Nachwachsende-Rohstoffe/eckpunkte-nationale-biomassestrategie-nabis.html, zuletzt geprüft am 11.04.2025.

Conference of the Parties (2015): Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Paris.

Dandikas, Vasilis; Herrmann, Christiane; Hülsemann, Benedikt; Jacobi, H. Fabian; Krakat, Niclas; Meißauer, Gabriele et al. (2021): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Potenziale, Erträge, Einflussfaktoren (KTBL-Schrift, 526).

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ): Ressourcendatenbank: DE-Biomassemonitor. Online verfügbar unter <https://data-lab.dbfz.de/resdb/potentials?lang=de>, zuletzt geprüft am 14.05.2025.

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina (2012): Bioenergie: Möglichkeiten und Grenzen / Bioenergy - chances and limits. Kurzfassung und Empfehlungen / Executive summary and recommendations. Halle (Saale). Online verfügbar unter <https://www.leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/bioenergie-moeglichkeiten-und-grenzen-2012/2013/>, zuletzt geprüft am 18.09.2025.

Deutsche Bundesregierung (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050 / Climate Action Programme 2030 - Measures to achieve the 2030 climate protection goals. Deutsche Bundesregierung. Berlin.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Abschlussbericht. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.dena.de/infocenter/dena-leitstudie-aufbruch-klimaneutralitaet-1/>.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2022): Marktmonitoring Bioenergie. Teil 2: Datenerhebungen, Einschätzungen und Prognosen zu Entwicklungen, Chancen und Herausforderungen des Bioenergiemarktes.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2023): Stand der Flexibilisierung von Biogasanlagen. Online verfügbar unter <https://biogas.fnr.de/biogas-nutzung/stromerzeugung/stand-der-flexibilisierung-von-biogasanlagen>, zuletzt geprüft am 26.03.2025.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2025): Anbauflächen nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Online verfügbar unter <https://statistik.fnr.de/anbauflaechen.php>, zuletzt geprüft am 26.03.2025.

Fachverband Biogas e.V. (2024): Flexible Biogasanlagen als Element der KWS. Positionspapier Kraftwerksstrategie. Freising. Online verfügbar unter <https://www.biogas.org/fileadmin/redaktion/dokumente/politik/2024-02-13-FvB-Flexible-Biogasanlagen-als-Element-der-KWS.pdf>, zuletzt geprüft am 26.03.2025.

Hahn, Henning; Krautkremer, Bernd; Hartmann, Kilian; Wachendorf, Michael (2014): Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation. In: *Renew Sustain Energy Rev* 29, S. 383–393. DOI:10.1016/j.rser.2013.08.085.

Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (2021): Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Kornatz, Peter; Barchmann, Tino; Daniel-Gromke, Jaqueline; Dotzauer, Martin; Rensberg, Nadja; Denysenko, Velina; Stinner, Walter (2023): Stand und Perspektiven der Güllevergärung in Deutschland. In: Zukunftsperspektiven der Güllevergärung in Deutschland. Online-Seminarreihe "Vergärung von Wirtschaftsdüngern". Online-Seminar, 28.06. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).

Krautkremer, B.; Kasten, J.; Steindl, M.; Effenberger, Mathias; Venus, T.; Richter, Felix; Kern, Michael (2024): Biogaspotenzial Bayern. Endbericht. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU); Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IEE); Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL); Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH. Online verfügbar unter

<https://www.energieatlas.bayern.de/neu/neu-zahlen-zum-biogaz-potenzial-bayern>, zuletzt geprüft am 18.09.2025.

LfL Agrarökologie: Basisdaten (Düngeberatung/Düngerecht). Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Online verfügbar unter <https://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/031245/index.php>, zuletzt geprüft am 18.09.2025.

LfL Agrarökologie: Tabelle 4c: Tägliche Einstreumenge und jährlicher Festmistanfall verschiedener Tierarten in t pro mittlerem Jahresbestand in Abhängigkeit von Leistung und Fütterung. Stand: November 2024. In: LfL Agrarökologie: Basisdaten (Düngeberatung/Düngerecht). Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/bas25_tabelle_4c_20241125.pdf, zuletzt geprüft am 16.04.2025.

Next Kraftwerke GmbH (2025): Was sind Dispatch, Redispatch & Redispatch 2.0? Online verfügbar unter <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/dispatch-redispatch#redispatch-20-erklrt>, zuletzt geprüft am 26.03.2025.

Nitsch, Joachim; Krewitt, Wolfram; Nast, Michael; Viebahn, Peter; Gärtner, Sven; Peht, Martin et al. (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (FKZ 901 41 803). Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung; Wuppertal-Institut. Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal.

Schmieder, Lisa; Scheer, Dirk; Gaiser, Johannes; Jendritzki, Ines; Kraus, Benjamin (2023): Municipalities as change agents? Reconsidering roles and policies in local energy sector-coupling. In: *Energy Res Soc Sci* 103 (1), Artikel 103210. DOI:10.1016/j.erss.2023.103210.

Steindl, Matthias; Venus, Thomas J.; Koch, Konrad (2025): A New Conceptual Framework for Assessing the Technical Biogas Potential: A Case Study from Germany. In: *Renew Sustain Energy Rev* (216), Artikel 115645. DOI:10.1016/j.rser.2025.115645.

Thrän, Daniela; Pfeiffer, Diana (Hg.) (2013): Methodenhandbuch Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte. Methoden zur Bestimmung von Technologie Kennwerten, Gesteungskosten und Klimagaseffekten von Vorhaben im Rahmen des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ). Leipzig (Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, Band 4).

Voigtländer, Christoph (2024): Energiedaten.Bayern – Schätzbilanz. Daten bis zum Jahr 2023. Leipziger Institut für Energie GmbH. Leipzig. Online verfügbar unter https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/publikationen/pdf/IE_2025-08-13_Energiedaten_Bayern_Endbericht.pdf, zuletzt geprüft am 03.12.2025.

Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik (WBA) (2007): Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung – Empfehlungen an die Politik –. Hg. v. Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik (WBA).

World Energy Council - Weltenergieatlas Deutschland (2024): Energie für Deutschland. Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext | 2024. Berlin. Online verfügbar

unter <https://www.weltenergieerat.de/energie-fuer-deutschland-2024/energie-in-der-welt-zahlen-und-fakten-2/?cn-reloaded=1>, zuletzt geprüft am 31.03.2025.