



LfL

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Vermeidung von Methanemissionen durch Vergärung tierischer Wirtschaftsdünger

Eine Potenzialanalyse für Bayern



Schriftenreihe

ISSN 1611-4159

1

2024

Impressum

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

Redaktion: Institut für Landtechnik und Tierhaltung
Vöttinger Straße 36, 85354 Freising
E-Mail: TierundTechnik@LfL.bayern.de
Telefon: 08161 8640-3450

1. Auflage: Januar 2024

Druck: Primus-Print.de, Dernbach

Schutzgebühr: 5,00 Euro

© LfL

**Vermeidung von Methanemissionen
durch Vergärung
tierischer Wirtschaftsdünger**

**Eine Potenzialanalyse für die Rinder-
und Schweinehaltung in Bayern**

**Mathias Effenberger
Thomas Venus**

Inhaltsverzeichnis

Seite

Kurzfassung	11
1 Einleitung und Zielsetzung	13
1.1 Bedeutung von Methan als Treibhausgas.....	15
1.2 Klimapolitische Einordnung der Landwirtschaft in Deutschland.....	18
1.3 Maßnahmen zur Minderung der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft in Deutschland	21
2 Beschreibung der Methodik.....	23
2.1 Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management im Nationalen Emissionsinventar	23
2.1.1 Berechnung des Emissionsfaktors	25
2.1.2 Konventionelle Verfahren für das Wirtschaftsdünger-Management	25
2.1.3 Wirtschaftsdünger-Vergärung	27
2.2 Nachbildung des Emissionsinventars für das Jahr 2021	31
2.3 Weitere Materialien und Methoden für die Potenzialanalyse auf Basis des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems.....	33
2.3.1 Tierkategorien bei Rindern.....	33
2.3.2 Sonderfall: sonstige Kühe.....	33
2.3.3 Tierkategorien bei Schweinen	35
2.3.4 Kategorisierung der Betriebsformen.....	36
3 Ergebnisse und Diskussion.....	37
3.1 Orientierende Szenarioanalyse	37
3.2 Abgleich der Tierplätze bzw. Tierzahlen	40
3.3 Neuberechnung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement in Bayern für das Jahr 2021	41
3.4 Zuordnung von Tierhaltungen und Biogasanlagen.....	43
3.5 Potenzialanalyse zur Minderung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement in Bayern	49
3.5.1 Berechnung der Methanemissionen auf einzelbetrieblicher Basis	50
3.5.2 Methanminderungspotenzial in Abhängigkeit von den Bestandszahlen..	51
3.5.3 Szenario für eine möglichst effektive Umsetzung der betrieblichen Wirtschaftsdüngervergärung.....	53
4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	57
Literaturverzeichnis	63

Abbildungsverzeichnis

Seite

- Abb. 1: Menge und Aufteilung der gesamten Methanemissionen in Deutschland auf Sektoren nach Bundesklimaschutzgesetz für die Jahre 1990, 2000, 2010 und 2021; in den Säulenabschnitten für die Rubrik Landwirtschaft ist der explizite Anteil angegeben (eigene Darstellung nach [1]). 13
- Abb. 2: Aggregierte Jahresmengen der CO₂-Äq-Emissionen im Sektor Landwirtschaft gemäß Nationalem Emissionsinventar für ausgewählte Jahre im Zeitraum von 1990 bis 2021; für Methan sind zusätzlich die jeweiligen Anteile der Tierhaltung angegeben (eigene Darstellung nach [2]). 14
- Abb. 4: Verteilungsdiagramm für den auf Ebene der bayerischen Landkreise aggregierten Anteil von „sonstigen Kühen“, das sind Mutter- und Ammenkühe, am gesamten Kuhbestand, differenziert nach vier Bestandsklassen (eigene Darstellung nach [22]). 35
- Abb. 5: Gegenüberstellung des nachgebildeten Inventars für die Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement im Status quo und in den drei betrachteten Szenarien. 37
- Abb. 6: Relative Methanemissionsfaktoren für die einzelnen Tierkategorien in den verschiedenen Szenarien gegenüber dem Status quo (Nachbildung NEI 2021). 39
- Abb. 7: Aufteilung des Potenzials zur Minderung der Methanemissionen gemäß Szenario 1 (Vergärung von 70 % der VS-Ausscheidungen in güllebasierten Systemen). 40
- Abb. 8: Histogramm der Biogasanlagen mit Vor-Ort-Verstromung aus dem MaStR nach installierter elektrischer Leistung und klassifiziert nach Zuordnung zu einem Tierhaltungsbetrieb; nicht dargestellt sind sechs Anlagen mit $P_{el} > 2.000$ MW. 45
- Abb. 9: Gegenüberstellung der Verteilung der Betriebe nach Bestandsgröße in GVE (Klassenbreite = 25), differenziert nach Betriebskategorie ohne BGA (links) vs. mit BGA (rechts); n: Anzahl der in die entsprechende Kategorie eingeordneten Betriebe; die (rot) gestrichelten senkrechten Linien markieren den angegebenen Mittelwert der betrieblichen Tierbestände in der jeweiligen Kategorie; nicht dargestellt sind 198 Betriebe mit einem Tierbestand > 300 GVE. 46
- Abb. 10: Darstellung der elektrischen Nennleistung, P_{el} , der zugeordneten BGA über dem Tierbestand der Betriebe, links: alle BGA, rechts: BGA mit $P_{el} \leq 150$ kW; nicht dargestellt sind 29 BGA auf Betrieben mit mehr als 500 GVE..... 47
- Abb. 11: Histogramm der in den Jahren 1993 bis 2021 in Bayern in Betrieb genommenen BGA, gruppiert nach der Inanspruchnahme einer Vergütungsregelung für die Vergärung von Gülle. 48
- Abb. 12: Aufteilung der kumulierten Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement in der Rinder- und Schweinehaltung in Bayern („Basis“) nach Bestandsgrößenklassen in GVE. 52
- Abb. 13: Verbliebene Methanemissionen und prozentuale Vermeidung gegenüber dem Basiswert für das Jahr 2021 für Szenarien der Vergärung der Wirtschaftsdünger aller Betriebe der Rinder- und Schweinehaltung in einer bestimmten Bestandsklasse. 53
- Abb. 14: Verlauf der verbliebenen jährlichen Methanemission aus dem Wirtschaftsdüngermanagement für das Szenario „Effekt“ mit schrittweiser Errichtung von BGA in der Reihenfolge abnehmender betrieblicher Emissionsmengen und -intensitäten; hervorgehoben wurde die Projektion für die in Bayern emittierte Methanmenge im Jahr 2030 bei Umsetzung des KSP; aus der

Analyse ausgeschlossen wurden 32.423 Betriebe mit einem Tierbestand von < 50 GVE.....	55
Abb. 15: Emissionen von Methan insgesamt im Jahr 1990 vs. 2021 mit Angabe des Anteils der Landwirtschaft bzw. (rechte Säule) Aufteilung der landwirtschaftlichen Emissionen im Jahr 2021 auf die Bundesländer mit Angabe des Anteils von Bayern (eigene Darstellung nach [1],[2]).....	57
Abb. 16: Gesamte emittierte Methanmenge aus dem Wirtschaftsdünger-Management von Rindern und Schweinen in Bayern im Jahr 2021: Status quo entsprechend NEI vs. Ergebnisse der orientierenden Szenarioanalyse zum Effekt der Vergärung (zur Erläuterung der Szenarien siehe Text).	58
Abb. 17: Gesamte emittierte Methanmenge aus dem Wirtschaftsdünger-Management von Rindern und Schweinen in Bayern im Jahr 2021: Originalwert nach NEI vs. Basiswert und Ergebnisse der Potenzialanalyse zur Emissionsminderung durch Vergärung für zwei Szenarien (zur Erläuterung siehe Text).....	60
Abb. 18: Aufteilung der Methanemissionen aus der bayerischen Landwirtschaft im Jahr 2021 und deren mögliche Minderung durch Wirtschaftsdünger-Vergärung entsprechend den untersuchten Szenarien (Werte nach [2] und eigenen Berechnungen).....	61

Tabellenverzeichnis

Seite

Tab. 1:	Aggregierte Jahresmengen der CO ₂ -Äq-Emissionen im Sektor Landwirtschaft gemäß Nationalem Emissionsinventar [2] für ausgewählte Jahre im Zeitraum von 1990 bis 2021 (Angaben in Tg).....	14
Tab. 2:	Emittierte Methanmengen (in Gg) aus der enterischen Fermentation und aus Wirtschaftsdüngern in der Schweine- und Rinderhaltung in Bayern bzw. Deutschland im Jahr 2021; für die Wirtschaftsdünger sind zusätzlich die prozentualen Anteile angegeben.....	15
Tab. 3:	Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in Deutschland und Bayern im Jahr 2021: Aufteilung auf verschiedene Nutztierarten (eigene Darstellung nach [2]).....	15
Tab. 4:	Werte der Strahlungseffizienz und des GWP (über einen Zeitraum von 20, 100 und 500 Jahren) für die drei wichtigsten Treibhausgase Kohlenstoffdioxid, Lachgas und Methan nach dem Vierten (AR4) bzw. Fünften (AR5) Sachstandsbericht des IPCC [6],[7].	16
Tab. 5:	Veränderung der jährlichen Methanemission aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung in Deutschland im Jahr 2021 gegenüber dem Jahr 1990 (eigene Darstellung nach [2]).....	17
Tab. 6:	Zulässige Jahresemissionsmengen an THG in Millionen t CO ₂ -Äquivalenten (GWP100) für das Jahr 2020 bzw. vorgegebene prozentuale Minderungen gegenüber 2020 für die Jahre 2022, 2025 und 2030 gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz Anlage 2 (zu §4).....	19
Tab. 7:	Vergleich zur Wirkung der Maßnahmen im KSP2030 gegenüber der Referenzentwicklung in den unterschiedlichen Sektoren nach Klimaschutzgesetz entsprechend der Szenarioanalyse: absolute CO ₂ -Äq-Emissionen in Tg bzw. prozentuale Abweichungen für das Kalenderjahr 2030 (eigene Darstellung nach [16]).....	20
Tab. 8:	Schätzwerte der möglichen Vermeidung von THG-Emissionen aus der Landwirtschaft im Jahr 2030 durch ausgewählte Maßnahmen; Angaben in Tg CO ₂ -Äq (GWP100) pro Jahr; Darstellung verändert nach [20].....	21
Tab. 9:	Umrechnung der Tierzahlen in der Rinderhaltung zwischen den Kategorien der Viehbestandserhebung und denjenigen des Emissionsinventars (Quelle: [21], Tabelle 4.1).....	24
Tab. 10:	Umrechnung der Tierzahlen in der Schweinehaltung zwischen den Kategorien der Viehbestandserhebung und denjenigen des Emissionsinventars (Quelle: [21], Tabelle 5.1).....	24
Tab. 11:	Werte für das Methanbildungspotenzial und die verfahrensspezifischen Methanumwandlungsfaktoren beim konventionellen Wirtschaftsdüngermanagement bzw. bei der Weide von Rindern (eigene Darstellung nach [21]).....	26
Tab. 12:	Werte für das Methanbildungspotenzial und die verfahrensspezifischen Methanumwandlungsfaktoren beim konventionellen Wirtschaftsdüngermanagement von Schweinen (eigene Darstellung nach [21]).....	26
Tab. 13:	Häufigkeit der verschiedenen Lagerverfahren für unbehandelte Gülle von Rindern und Schweinen im Jahr 2021 (eigene Darstellung nach [2]).....	27
Tab. 14:	Parameterwerte für die Berechnung der Methanemissionen aus der Wirtschaftsdünger-Vergärung bei Rindern und Schweinen (eigene Darstellung nach [21]).....	28

Tab. 15: Parameterwerte für Bayern gemäß NEI 2021 zur Berechnung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in der Rinderhaltung (eigene Darstellung nach [2]).	29
Tab. 16: Parameterwerte für Bayern gemäß NEI 2021 Berechnung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in der Schweinehaltung (eigene Darstellung nach [2]).	30
Tab. 17: Prozentuale Anteile der VS-Ausscheidungen in der Rinder- und Schweinehaltung, die im Jahr 2020 in Bayern bzw. Deutschland insgesamt einer Vergärung zugeführt wurden; zusätzlich angegeben sind die geringsten bzw. höchsten Werte auf Länderebene mit Angabe des jeweiligen Bundeslandes: HE = Hessen; MV = Mecklenburg-Vorpommern; SL = Saarland; TH = Thüringen (eigene Darstellung nach [2]).	30
Tab. 18: Vergleich der nachgerechneten Methan-Emission aus dem Wirtschaftsdünger-Management bei Rindern und Schweinen in Bayern mit den originalen Daten aus dem NEI für das Jahr 2021 ([2]: Tabellen EM1005.001 bis 007 bzw. 010 bis 013); Angaben zu den absoluten Emissionen in kg Methan.	31
Tab. 19: Nachgebildete Methan-Emissionsfaktoren für das Wirtschaftsdünger-Management in der Rinder- und Schweinehaltung in Bayern im Jahr 2021; Angaben in kg Methan je Tierplatz und Jahr.	32
Tab. 20: Umrechnung der Tierzahlen in der Rinderhaltung zwischen den Kategorien im IVKS und denjenigen des Emissionsinventars.	34
Tab. 21: Umrechnung der Tierzahlen in der Schweinehaltung zwischen den Kategorien im IVKS und denjenigen des Emissionsinventars.	35
Tab. 22: Verwendete Rubriken für die Summierung der betrieblichen Tierbestände nach EI-Kategorien.	36
Tab. 23: Regeln für die Kategorisierung nach „Betriebsform“ auf Basis der nach Tierarten und Rubriken aggregierten Tierplätze.	36
Tab. 24: Vergleich der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement für die betrachteten Szenarien gegenüber dem Status quo (Nachbildung NEI 2021); alle Werte in Gg / a, sofern nicht anders angegeben.	38
Tab. 25: Gegenüberstellung der Tierzahlen für die Rinder- und Schweinehaltung in Bayern gemäß NEI, amtlicher Viehzählung und IVKS für das Jahr 2021 (Quellen:[2],[22]).	40
Tab. 26: Vergleich der Zahlen von Rindern und Schweinen in Bayern für das Jahr 2021: wie im NEI verwendet (Tierplätze) bzw. wie aus dem IVKS in den Tierkategorien des NEI berechnet.	41
Tab. 27: Effektive Methan-Emissionsfaktoren für das Wirtschaftsdüngermanagement im Jahr 2021 aus der Nachbildung des EI bzw. zurückgerechnet aus dem EI.	42
Tab. 28: Gegenüberstellung der auf Basis einzelbetrieblicher Daten zu den Tierbeständen berechneten Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement mit den originalen Werten gemäß Emissionsinventar für das Jahr 2021; Werte in kg / a, sofern nicht anders angegeben.	43
Tab. 29: Anzahl der Betriebe mit Rinder- und Schweinehaltung sowie der vermuteten Betriebe mit Biogasanlage nach Abgleich von IVKS und MaStR.	44
Tab. 30: Statistische Kennwerte der Tierbestände in GVE für die Betriebe unterschiedlicher Kategorien mit und ohne BGA (Vergleiche Abb. 9).	46
Tab. 31: Aufteilung der BGA nach in Anspruch genommenen Vergütungsregelungen für die Vergärung von Gülle: Anlagen mit $P_{el} > 150$ kW bzw. bis 150 kW sowie zugeordnete Anlagen mit P_{el} bis 150 kW.	48

Tab. 32: Verwendete Methan-EF nach Tierkategorien, kg / (pl a), für die Berechnung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement ohne und mit BGA auf einzelbetrieblicher Basis.....	49
Tab. 33: Relative Methan-EF für das Wirtschaftsdüngermanagement nach Tierkategorien, kg / (pl a), für den einzelbetrieblichen Fall ohne bzw. mit Vergärung ceteris paribus im Verhältnis zum Status quo = NEI 2021.	50
Tab. 34: Vergleich der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement in Bayern für das Jahr 2021, berechnet auf dem Wege der einzelbetrieblichen Berücksichtigung der Vergärung („Basis“) vs. mit durchschnittlichen Werten gemäß NEI; Werte in kg / a, sofern nicht anders spezifiziert.....	51
Tab. 35: Verbreitung von BGA unter den Tierhaltungsbetrieben verschiedener Kategorien mit einem Tierbestand von mindestens 50 GVE.	54
Tab. 36: Charakterisierung der betrieblichen Tierbestände im Szenario „Effekt“ für eine möglichst effektive Verringerung der Methanemissionen durch Wirtschaftsdüngervergärung.....	56
Tab. 37: Kennwerte zur betrieblichen Vermeidung von Methanemissionen durch Wirtschaftsdüngervergärung für die ausgewählten Tierbestände im Szenario „Effekt“.....	56

Kurzfassung

Nachdem in Deutschland seit 1990 die Emissionen von Methan in der Energie- und Abfallwirtschaft um rund 90 % gesenkt wurden, bildet die Landwirtschaft nunmehr die mit Abstand größte Quelle für dieses Treibhausgas. Zugleich darf nicht vergessen werden, dass im genannten Zeitraum auch in der Landwirtschaft die Methanemissionen deutlich gesenkt werden konnten, nämlich um ein Viertel.

Die Möglichkeiten zur weiteren Senkung landwirtschaftlicher Methanemissionen, welche in Deutschland zu 96 % aus der Tierhaltung stammen, sind allerdings begrenzt – sofern man eine deutliche Verringerung des Tierbestandes ausschließt. Die Vergärung in Biogasanlagen stellt jedoch eine ausgereifte und vergleichsweise schlichte Technologie dar, um die Freisetzung von Methan aus dem Wirtschaftsdünger-Management weitgehend zu vermeiden. In der vorliegenden Arbeit wurde für die Tierhaltung in Bayern im Detail das entsprechende technische Potenzial zur Minderung der Methanemissionen aus der Rinder- und Schweinehaltung auf Ebene der einzelnen landwirtschaftlichen Betriebe berechnet. Hiermit sollte auch die Grundlage für eine realistische Analyse des ökonomischen Potenzials geschaffen werden.

Die vorliegenden Berechnungen der möglichen Minderung der Methanemissionen aus dem Management tierischer Wirtschaftsdünger basieren auf einer vereinfachten Nachbildung der entsprechenden Methodik des Nationalen Emissionsinventars (NEI) und deren Anwendung auf die Daten zu den einzelbetrieblichen Tierbeständen im Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem (IVKS) für das Jahr 2021. Der Referenzwert gemäß NEI für die emittierte Methanmenge aus dem Wirtschaftsdünger-Management in der Rinder- und Schweinehaltung in Bayern im Jahr 2021 beträgt 57,110 Gg. Ohne Vergärung wären aus dem Wirtschaftsdüngermanagement in Bayern ca. 5,1 Gg Methan mehr emittiert worden. Hierbei sind die Vergärungsquoten für Bayern mit knapp elf Prozent bei den Milchkühen, rund acht Prozent bei den Rindern ohne Milchkühe und rund zwölf Prozent bei den Schweinen deutlich geringer als im Durchschnitt für Deutschland, was im Wesentlichen an der vergleichsweise klein strukturierten Tierhaltung in Süddeutschland liegt. Mit der vereinfachten Methode wurde die aus dem Wirtschaftsdünger-Management emittierte Methanmenge zu 57,389 Gg berechnet, das entspricht einer Abweichung von lediglich einem halben Prozent gegenüber dem Referenzwert gemäß NEI.

Eine korrekte Berechnung der kumulierten Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management auf einzelbetrieblicher Basis war nicht möglich, da von den im Marktstammdatenregister erfassten 2.429 Einheiten mit „Hauptbrennstoff Biogas“ und Vor-Ort-Verstromung lediglich 1.300 Einheiten, das sind rund 54 %, eindeutig einem der insgesamt 50.097 Rinder-/Schweinehaltungsbetriebe in dem verwendeten Auszug aus dem IVKS zugeordnet werden konnten. Entsprechend ergab sich auf diesem Rechenweg eine emittierte Menge an Methan, die mit 59,797 Gg um 2,408 Gg oder 4,2 % über dem vorgenannten Wert liegt.

Der Großteil der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management entsteht in Bayern aus Tierbeständen mittlerer Größe von 50 bis unter 200 Großvieheinheiten (GVE): die kumulierten Methanemissionen dieser Betriebe betragen 40,451 Gg. Somit verursachte dieses knappe Drittel der Gesamtheit der Betriebe rund 68 % der Methanemissionen. Diesen Betrieben konnte auch die Mehrheit der bestehenden Biogasanlagen (BGA) zugeordnet werden. Das kumulierte Potenzial dieser 16.454 Betriebe zur Minderung der jährlichen

Methanemissionen durch Vergärung beträgt 32,429 Gg, das entspricht 54 % des Ausgangswerts von 59,797 Gg.

Wie mit der Vergärung der Wirtschaftsdünger einer möglichst geringen Anzahl von Betrieben der Tierhaltung die größtmögliche Menge an Methan vermieden werden könnte, wird mittels des Szenarios „Effekt“ illustriert. Hierfür wurden die Betriebe mit einem Tierbestand von mindestens 50 GVE zunächst nach absteigender Emissionsstärke und dann nach abnehmender Emissionsintensität sortiert. Als Zielwert für die Verringerung der CO₂-Äq-Emissionen wurde der bayerische Anteil an der erwarteten Minderungswirkung des Klimaschutzprogramms der Bundesregierung angesetzt. Demnach dürfte im Jahr 2030 noch eine Menge von 44,1 Gg Methan aus Wirtschaftsdüngern emittiert werden, das sind rund 26 % weniger als im Jahr 2021. Um dieses Ziel zu erreichen, müssten im Szenario „Effekt“ die Wirtschaftsdünger von mindestens 3.710 Betrieben einer Vergärung zugeführt werden: das sind etwa siebeneinhalb Prozent aller Tierhaltungsbetriebe in Bayern (ohne Berücksichtigung der zuordenbaren BGA). Wählt man die gesamte aus der Tierhaltung in Bayern emittierte Methanmenge in Höhe von 296,3 Gg als Bezugswert, so würde diese im Szenario „Effekt“ *ceteris paribus* um 4,4 % auf 283,3 Gg verringert.

Gemäß Bundesklimaschutzgesetz muss der Sektor Landwirtschaft die Gesamtemissionen von CO₂-Äq bis 2030 um weitere rund sieben Prozent im Vergleich zum Jahr 2022 verringern. Vor diesem Hintergrund sind die zunächst eventuell als recht gering erscheinenden Minderungseffekte einer ambitionierten Umsetzung der Vergärung von Wirtschaftsdüngern, wie sie in den vorgestellten Szenarien für Bayern untersucht wurden, durchaus als bedeutsam einzustufen.

Die Wirtschaftsdünger-Vergärung ist eine technisch ausgereifte und sofort wirksame Maßnahme zur Vermeidung von THG-Emissionen, die zudem weitere Vorteile wie die gesteigerte Fließfähigkeit und Düngewirkung sowie die verringerten Geruchsemissionen bei der Anwendung vergorener Wirtschaftsdünger mit sich bringt. Die zügige Ausweitung der Wirtschaftsdünger-Vergärung in Regionen mit eher „kleinstrukturierter“ Tierhaltung scheiterte bisher an der mangelnden betrieblichen Wirtschaftlichkeit bei kleinen bis mittleren Tierbeständen. Um hier möglichst rasch und kosteneffizient die Methanemissionen zu senken, müssen vorrangig für diejenigen Betriebe mit dem größten Potenzial zur Emissionsvermeidung die Hemmnisse zur Investition in güllebasierte Biogasanlagen beseitigt werden.

1 Einleitung und Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Ausstoß von Treibhausgasen in der Landwirtschaft, hier insbesondere von Methan, und den Möglichkeiten, diesen Ausstoß durch die Vergärung tierischer Wirtschaftsdünger zu reduzieren. Dazu wurde aufbauend auf der Methodik des Nationalen Emissionsinventars (Siehe Kap. 2) das theoretische Potenzial zur Vermeidung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in Bayern soweit möglich auf Ebene der einzelnen landwirtschaftlichen Betriebe berechnet.

Laut dem Nationalen Emissionsinventar beliefen sich die gesamten Methanemissionen im Jahr 2021 auf 45.688 Gg CO₂-Äq (GWP100) und nahmen damit einen Anteil von sechs Prozent an den gesamten CO₂-Äq-Emissionen in Deutschland ein [1]. Gegenüber dem Wert für 1990 von 132.606 Gg sanken demnach die gesamten CO₂-Äq-Emissionen aus Methan um knapp 66 %, in erster Linie in der Energiewirtschaft (-88 %) durch die sinkende Kohleförderung sowie in der Abfallwirtschaft (-90 %) durch Maßnahmen zur Vermeidung von Methanemissionen aus Deponien (Abb. 1).

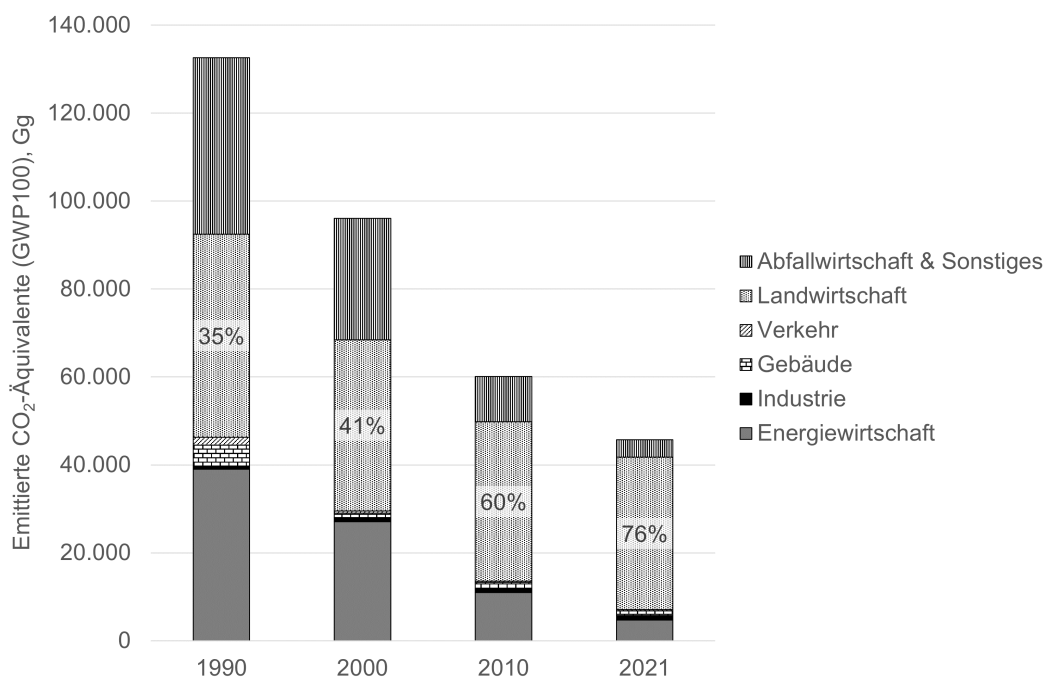


Abb. 1: Menge und Aufteilung der gesamten Methanemissionen in Deutschland auf Sektoren nach Bundesklimaschutzgesetz für die Jahre 1990, 2000, 2010 und 2021; in den Säulenabschnitten für die Rubrik Landwirtschaft ist der explizite Anteil angegeben (eigene Darstellung nach [1]).

Im selben Zeitraum nahm der Ausstoß von Methan in der Landwirtschaft von 46.160 auf 34.715 Gg CO₂-Äq zwar ebenfalls ab, allerdings in deutlich geringerem Maße, so dass die Landwirtschaft in Deutschland nunmehr die mit Abstand größte Quelle für Methanemissionen darstellt (Abb. 1). Innerhalb des Sektors Landwirtschaft wiederum ist die Tierhaltung die stärkste Quelle für Methanemissionen: rund 76 % aus der enterischen Fermentation plus rund 20 % aus dem Wirtschaftsdünger-Management; im Jahr 1990 war die Tierhaltung die einzige Methanquelle, da die Biogaserzeugung aus Energiepflanzen noch vernachlässigbar war (Tab. 1 und Abb. 2).

Tab. 1: Aggregierte Jahresmengen der CO₂-Äq-Emissionen im Sektor Landwirtschaft gemäß Nationalem Emissionsinventar [2] für ausgewählte Jahre im Zeitraum von 1990 bis 2021 (Angaben in Tg).

	1990	2000	2010	2020	2021
Kohlenstoffdioxid (direkt)	3,192	2,656	2,517	2,629	2,588
Lachgas	23,550	21,233	20,721	19,492	19,220
Methan aus...					
...enterischer Fermentation	37,141	30,699	28,203	26,709	26,141
...Wirtschaftsdüngern	8,748	8,111	6,993	7,222	6,884
...Biogaserzeugung aus Energiepflanzen	0,000	0,033	0,921	1,500	1,500
Summe	72,632	62,732	59,355	57,552	56,333

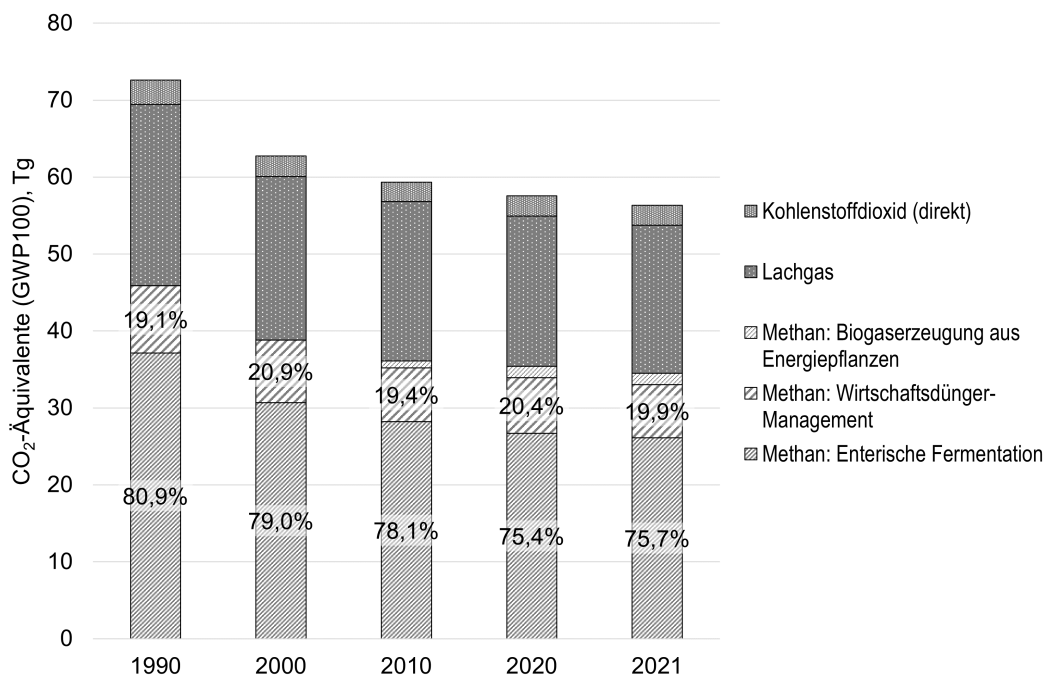


Abb. 2: Aggregierte Jahresmengen der CO₂-Äq-Emissionen im Sektor Landwirtschaft gemäß Nationalem Emissionsinventar für ausgewählte Jahre im Zeitraum von 1990 bis 2021; für Methan sind zusätzlich die jeweiligen Anteile der Tierhaltung angegeben (eigene Darstellung nach [2]).

In der Rinderhaltung entstammt Methan überwiegend der enterischen Fermentation, in der Schweinehaltung hingegen entsteht es vor allem beim Wirtschaftsdüngermanagement (Tab. 2).

Tab. 2: *Emittierte Methanmengen (in Gg) aus der enterischen Fermentation und aus Wirtschaftsdüngern in der Schweine- und Rinderhaltung in Bayern bzw. Deutschland im Jahr 2021; für die Wirtschaftsdünger sind zusätzlich die prozentualen Anteile angegeben.*

	Schweinehaltung		Rinderhaltung	
	Bayern	Deutschland	Bayern	Deutschland
Wirtschaftsdünger	10,926	93,638	46,184	144,380
anteilig:	80,1 %	79,9 %	16,6 %	14,0 %
Enterische Fermentation	2,718	23,504	232,330	890,322

Hauptverursacher von Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management sind die Nutztierarten Rinder und Schweine (Vergleiche Tab. 3): für Bayern ist der entsprechende Anteil mit in Summe 98,6 % so hoch, dass die übrigen Tierarten in der weiteren Betrachtung vernachlässigt werden. Die folgende Potenzialanalyse wird sich daher ausschließlich mit den Wirtschaftsdüngern aus der Rinder- und Schweinehaltung in Bayern befassen.

Tab. 3: *Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in Deutschland und Bayern im Jahr 2021: Aufteilung auf verschiedene Nutztierarten (eigene Darstellung nach [2]).*

Tierarten	Emittierte Methanmenge, Gg		Prozentualer Anteil	
	Deutschland	Bayern	Deutschland	Bayern
Rinder	144,380	46,184	58,7	79,7
Schweine	93,638	10,926	38,1	18,9
Schafe + Ziegen	0,530	0,101	0,2	0,2
Pferde	1,436	0,233	0,6	0,4
Geflügel	5,860	0,477	2,4	0,8
Alle	245,844	57,920	100	100

Durch die Wirtschaftsdünger-Vergärung werden auch Lachgasemissionen vermieden, sofern die Gärrestlagerung in einem gasdichten Behälter erfolgt. Im Hinblick auf die Verringerung der gesamten CO₂-Äq-Emissionen aus der Tierhaltung ist dieser Effekt allerdings von deutlich geringerer Bedeutung als bei den Methanemissionen. Die vorliegende Potenzialanalyse befasst sich daher nicht weiter mit den Lachgasemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management.

1.1 Bedeutung von Methan als Treibhausgas

Der Methanausstoß aus der Tierhaltung hängt im Wesentlichen von der Anzahl der Wiederkäuer und dem Management der anfallenden Wirtschaftsdünger ab, wie untenstehend näher erläutert wird. Um die Bedeutung der Vermeidung von Methanemissionen aus der Landwirtschaft besser einordnen zu können, werden zunächst einige grundlegende Sachverhalte zur Wirkung von Methan als THG und zur Klimaschutz-Politik erläutert.

Wenn eine reelle Chance gewahrt werden soll, die langfristige Zunahme der globalen Mitteltemperatur auf maximal zwei Grad über dem vorindustriellen Niveau (Referenzzeitraum: 1850 – 1900 [3]) zu begrenzen, sind ab Mitte des Jahrhunderts Netto-THG-Emissionen nahe null erforderlich. Um „Netto-Null-Emissionen“ zu erreichen, müssten unvermeidbare klimawirksame Emissionen durch natürliche oder technische Senken, im politischen Jargon auch als „Negativemissionstechnologien“ bezeichnet [4], egalisiert werden. Viele Länder ordnen in ihren sogenannten „Netto-Null-Szenarien“, die sie im Rahmen der Vereinbarung von Paris im Jahr 2015 erstellt haben, einen erheblichen bis überwiegenden Anteil der unvermeidbaren, auch als „residual“ bezeichneten, klimawirksamen Emissionen der Landwirtschaft zu [5].

„Netto-Null-Emissionen“ werden definiert, indem die unterschiedliche Wirkung der verschiedenen THG auf die Erwärmung mittels einer bestimmten Metrik in sogenannte Kohlenstoffdioxid-Äquivalente ($\text{CO}_2\text{-}\ddot{\text{A}}\text{q}$) umgerechnet werden. In der Klimapolitik hat man sich darauf geeinigt, für die Berechnung der $\text{CO}_2\text{-}\ddot{\text{A}}\text{q}$ der verschiedenen klimawirksamen Gase das sogenannte „Globale Erwärmungspotenzial“, engl. „Global Warming Potential“ (GWP), mit einem Zeithorizont von 100 Jahren (GWP100) zu verwenden¹. Vereinfacht ausgedrückt beschreibt das GWP eines Treibhausgases, wie stark es im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid über einen bestimmten Zeitraum zur Erderwärmung beiträgt². Die Werte dieser Klimametrik können sich in Abhängigkeit vom Stand der Forschung ändern, wie Tab. 4 am Beispiel des GWP100 zeigt.

Tab. 4: Werte der Strahlungseffizienz und des GWP (über einen Zeitraum von 20, 100 und 500 Jahren) für die drei wichtigsten Treibhausgase Kohlenstoffdioxid, Lachgas und Methan nach dem Vierten (AR4) bzw. Fünften (AR5) Sachstandsbericht des IPCC [6],[7].

Bezeichnung des Treibhausgases	Chemische Formel	GWP20 (AR4)	GWP100 (AR4)	GWP100 (AR5)	GWP500 (AR4)
Kohlenstoffdioxid	CO_2	1			
Lachgas	N_2O	289	298	265	153
Methan	CH_4	72	25	28	7,6

Aus physikalischer Sicht ist das GWP ungeeignet, den Erwärmungseffekt von Methan, das in der Atmosphäre eine Verweilzeit von lediglich zwölf Jahren hat, mit demjenigen von langlebigen Treibhausgasen wie Kohlenstoffdioxid oder Lachgas, die sich in der Atmosphäre anreichern, zu vergleichen. Man erkennt dies in Tab. 4 daran, dass die Werte für das GWP von Methan stark vom betrachteten Zeithorizont abhängig sind. Auf die wissenschaftliche Diskussion über alternative Maßzahlen, die einen aussagekräftigen Vergleich der Klimawirkung verschiedener THG ermöglichen, kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Wichtig für den vorliegenden Beitrag, der sich vor allem mit der Vermeidung von

¹ Dementsprechend beziehen sich alle Angaben zu $\text{CO}_2\text{-}\ddot{\text{A}}\text{q}$ im vorliegenden Bericht auf das GWP100, sofern nichts anderes vermerkt ist.

² Das GWP eines bestimmten Treibhausgases errechnet sich als Verhältniszahl des Integrals des Strahlungsantriebs über einen festzulegenden Zeitraum, der von einer stoßartigen Emission des THG's zum Zeitpunkt $t = 0$ verursacht wird, im Vergleich zu dem entsprechenden Strahlungsantrieb von Kohlenstoffdioxid; für Kohlenstoffdioxid gilt dementsprechend stets: $\text{GWP} = 1$. Der Strahlungsantrieb bezeichnet die Änderung der Nettoeinstrahlung an der Tropopause bzw. Oberfläche der Atmosphäre, z. B. durch die Änderung der atmosphärischen Konzentration eines THG's [26].

Methanemissionen befasst, ist jedoch folgender Sachverhalt: Im Gegensatz zu langlebigen THG, deren andauernder Erwärmungseffekt im Wesentlichen von der bisher emittierten Menge abhängt, wird der resultierende Erwärmungseffekt bei einem kurzlebigen THG wie Methan vom Produkt aus Emissionsrate und atmosphärischer Verweilzeit bestimmt [8].

Demnach könnte man wie folgt argumentieren (Vergleiche Tab. 5): Die jährlichen Methanemissionen aus der Tierhaltung in Deutschland waren im Jahr 2021 um 442,9 kt (das entspricht 12,40 Tg CO₂-Äq) geringer als im Jahr 1990; die Methanemissionsrate (auf Jahresbasis) ist demnach seit 1990 um ca. 27 % gesunken und entsprechend verursachen die Methanemissionen aus der Tierhaltung in Deutschland isoliert betrachtet heute keine stärkere, sondern eine geringere Erwärmung der Atmosphäre als im Jahr 1990.

Tab. 5: *Veränderung der jährlichen Methanemission aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung in Deutschland im Jahr 2021 gegenüber dem Jahr 1990 (eigene Darstellung nach [2]).*

Berichtsjahr	Emittierte Menge, kt	Emittierte CO ₂ -Äq, Mt	Absolute Veränderung CO ₂ -Äq, Mt	Relative Veränderung
1990	1.638,9	46,40	./.	./.
2021	1.196,0	33,49	-12,40	-27 %

Global gesehen hat jedoch im selben Zeitraum der Strahlungsantrieb durch Treibhausgase in der Atmosphäre dramatisch zugenommen: für Kohlenstoffdioxid um rund 65 %, für Lachgas um rund 63 % und für Methan um rund 15 % [9]. Hieraus resultiert eine positive Strahlungsbilanz der Erde, welche die globale Erwärmung antreibt und massive Veränderungsprozesse im Erdsystem auslöst, die auf unterschiedlichen Zeitskalen ablaufen [10]. Im Vergleich zur Referenzperiode 1850 – 1900, für die angenommen wird, dass es noch keinen signifikanten Einfluss der industriellen Tätigkeit des Menschen auf das Klima gab, war laut IPCC die globale Jahresmitteltemperatur der Oberflächentemperatur der Erde im Zeitraum 1995 – 2014 um 0,85 K gestiegen, im zurückliegenden Jahrzehnt 2011 – 2020 bereits um 1,09 K [11]. Der Großteil des anthropogen verursachten Wärmeüberschusses wurde allerdings von den Ozeanen aufgenommen, die sich seit den 1970er Jahren mit einer Rate erwärmt haben, die bisher nur aus dem letzten Interglazial vor 12.750 bis 11.550 Jahren bekannt war.

Für die Klima-Modellierung ist die sogenannte „Klimasensitivität im Gleichgewicht“, *engl.* „Equilibrium Climate Sensitivity“ (ECS) von sehr großer Bedeutung. Diese bezeichnet den zu erwartenden globalen Temperaturanstieg aufgrund einer Verdoppelung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre unter der idealisierenden Annahme, dass keine Veränderungen der Eisbedeckung und der Vegetation eintreten, welche „langsame Rückkopplungsprozesse“ darstellen, und dass zudem keine anderen langlebigen THG auftreten. Entsprechend dem jüngsten Sachstandsbericht des IPCC liegt die ECS wahrscheinlich (d. h. mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von einem Drittel) im Bereich von 2,5 bis 4,0 °C.

Der summierte Strahlungsantrieb aller THG im Jahr 2021 war in etwa äquivalent zu einer Verdoppelung der CO₂-Konzentration gegenüber dem vorindustriellen Niveau. Dies bedeutet, dass beim jetzigen Niveau des Strahlungsantriebs durch Treibhausgase eine weitere deutliche Erwärmung vorprogrammiert ist [12]. Inwieweit bereits „langsame“, jedoch unwiderrufliche Prozesse und Rückkopplungsmechanismen im Erdsystem in Gang gesetzt wurden – beispielsweise ein Abschmelzen der Eisschilde und demzufolge ein Anstieg des

Meeresspiegels um mehrere Meter im Laufe des Jahrhunderts – ist Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung.

Im Hinblick auf die oben erwähnten „Netto-Null-Szenarien“ gilt: Während jede emittierte Tonne eines kumulativen THG's durch die entsprechende Entnahme der gleichen Menge aus der Atmosphäre egalisiert werden muss, nimmt bei einer verringerten Emissionsrate von Methan der daraus resultierende Strahlungsantrieb tatsächlich ab. Solange sich also die Weltgemeinschaft mittelfristig unfähig sieht, die weltweiten Emissionen an fossilem CO₂ drastisch zu verringern, sollte jede plausible Möglichkeit genutzt werden, die Emissionsrate von Methan zu senken.

1.2 Klimapolitische Einordnung der Landwirtschaft in Deutschland

Die nationalen Ziele für den Klimaschutz in Deutschland hat die Bundesregierung im „Klimaschutzplan 2050“ festgeschrieben [13]. Daraus abgeleitete Zwischenziele für die zulässigen Jahresemissionsmengen an THG in den Jahren 2020 bis 2030 wurden im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) vom 12.12.2019 rechtsverbindlich vorgegeben. Im Klimaschutzprogramm 2030 (KSP_r2030) wurden die Maßnahmen zur THG-Minderung für die einzelnen Sektoren konkretisiert, um sicherzustellen, dass die Zwischenziele bis 2030 erreicht werden [14].

Das Klimaschutzgesetz gibt für den Sektor Landwirtschaft eine weitere Minderung der CO₂-Äq-Emissionen im Jahr 2030 um 20 % gegenüber dem Jahr 2020 vor, die deutlich geringer ausfällt als für die übrigen Sektoren (Tab. 6). Dies trägt der wissenschaftlichen Erkenntnis Rechnung, dass die Möglichkeiten zur Senkung der klimawirksamen Emissionen in Form von Methan und Lachgas prinzipiell begrenzt sind. Dementsprechend nennt die Europäische Kommission in ihrer Mitteilung zum „Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050“ vom 08.03.2011 für die relative Verringerung der Nicht-CO₂-Emissionen aus der Landwirtschaft gegenüber dem Jahr 1990 Etappenziele von 36 bis 37 % im Jahr 2030 und 42 bis 49 % im Jahr 2050, während die gesamten CO₂-Äq-Emissionen bis 2050 um 79 bis 82 % gesenkt werden sollen.

Tab. 6: Zulässige Jahresemissionsmengen an THG in Millionen t CO₂-Äquivalenten (GWP100) für das Jahr 2020 bzw. vorgegebene prozentuale Minderungen gegenüber 2020 für die Jahre 2022, 2025 und 2030 gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz Anlage 2 (zu §4).

Sektor ³	2020	2022	2025	2030
Energiewirtschaft	280	8 %	-	61 %
Industrie	186	5 %	16 %	37 %
Gebäude	118	8 %	22 %	43 %
Verkehr	150	7 %	18 %	43 %
Landwirtschaft	70	4 %	10 %	20 %
Abfallwirtschaft & Sonstiges	9	11 %	22 %	56 %

Um die im Rahmen der vorliegenden Arbeit analysierten Potenziale für die Vermeidung von Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in den Kontext der deutschen Klimaschutzpolitik einzuordnen, werden nachfolgend in knapper Form die Ergebnisse einer Szenarioanalyse zur Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des KSPr2030 dargestellt [15]. Hierbei wurde für die einzelnen Sektoren jeweils ein *Referenzszenario* (Projektion der Entwicklung der THG-Emissionen ohne weitere Klimaschutzmaßnahmen) mit einem „*Klimaschutzszenario*“ (Projektion mit Umsetzung des KSPr2030) verglichen. Im Sektor Landwirtschaft beruht das *Referenzszenario* auf der sogenannten „Baseline“ des Thünen Instituts [17], die von einer Beibehaltung der derzeitigen Agrarpolitik einschließlich der Umsetzung bereits beschlossener Politikänderungen ausgeht.

Die Berechnungen für das *Klimaschutzszenario* ergaben, dass die angestrebten Ziele zur Minderung der gesamten THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 voraussichtlich deutlich verfehlt werden; lediglich für den Sektor „Abfallwirtschaft und Sonstiges“ wurde eine knappe Übererfüllung der Emissionsminderung modelliert. Für den Sektor Landwirtschaft wurde im *Referenzszenario* eine Überschreitung der zulässigen Jahresemissionsmenge um 4,4 Tg CO₂-Äq im Jahr 2025 und um 9,8 Tg CO₂-Äq im Jahr 2030 berechnet. Durch das KSPr2030 kann diese Lücke in der Szenarioanalyse nur teilweise geschlossen werden: gegenüber dem Referenzszenario werden im Jahr 2025 1,3 Tg CO₂-Äq und im Jahr 2030 3,5 Tg CO₂-Äq vermieden.

Wie steht die Landwirtschaft bei diesen Projektionen im Vergleich zu anderen Sektoren da? – Die laut Szenarioanalyse für das KSPr2030 zu erwartende relative Überschreitung der Zielwerte der THG-Emissionen im Jahr 2030 fällt mit 11 % deutlich moderater aus als für die besonders problematischen Sektoren Verkehr und Gebäude (Siehe Tab. 7: Spalte „Abweichung KSPr2030 - Ziel“). Gleichzeitig ist die prognostizierte Wirkung des Klimaschutzprogramms im Sektor Landwirtschaft vergleichsweise schwach, da gegenüber dem Referenzszenario lediglich 38 % der Emissionslücke geschlossen werden können (Siehe Tab. 7: letzte Spalte). Dies lässt sich damit erklären, dass in der jüngeren Vergangenheit die THG-

³ Im Bundes-Klimaschutzgesetz gilt eine abweichende Sektoreinteilung gegenüber dem Emissionsinventar: dem Sektor Landwirtschaft werden hier auch die CO₂-Äq-Emissionen aus der Energienutzung in der Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft zugeschlagen.

Emissionen in der Landwirtschaft stärker zurückgingen als erwartet, und zwar durch eine Abstockung der Tierbestände: eine Entwicklung, die jedoch in diesem Umfang nicht als Maßnahme im Klimaschutzprogramm enthalten ist.

Tab. 7: Vergleich zur Wirkung der Maßnahmen im KSPr2030 gegenüber der Referenzentwicklung in den unterschiedlichen Sektoren nach Klimaschutzgesetz entsprechend der Szenarioanalyse: absolute CO₂-Äq-Emissionen in Tg bzw. prozentuale Abweichungen für das Kalenderjahr 2030 (eigene Darstellung nach [16]).

	Ziel	Referenz	Abweichung Ref. - Ziel	KSPr	Abweichung KSPr2030 - Ziel	Unterschied KSPr - Ref.
Energiewirtschaft	175,0	269,0	54%	186,1	6%	88%
Industrie	140,0	152,4	9%	143,4	2%	73%
Gebäude	70,0	91,2	30%	86,8	24%	21%
Verkehr	95,0	150,3	58%	128,4	35%	40%
Landwirtschaft	58,0	67,9	17%	64,1	11%	38%
Abfallwirtschaft und Sonstiges	5,0	5,8	16%	4,9	-2%	113%
Gesamt	543,0	736,5	36%	613,7	13%	63%

Zum Verständnis des Emissionsinventars für die landwirtschaftliche Produktion ist es wichtig zu berücksichtigen, dass die Massenströme von Methan und Lachgas nicht direkt gemessen werden können, sondern auf der Grundlage von Modellen berechnet werden müssen. (Vergleiche dazu die entsprechenden Abschnitte im Kapitel 2). Für die Berichterstattung im Jahr 2023 wurden die Werte für das GWP100 von Methan und Lachgas vom Wissensstand gemäß Viertem Sachstandsbericht des IPCC auf denjenigen des Fünften Sachstandsberichts umgestellt (Vergleiche Tab. 4). Durch diese Anpassung ergeben sich um rund drei Prozent höhere Werte für die Summe der CO₂-Äq-Emissionen aus Lachgas und Methan. Gleichzeitig wurde jedoch die Berechnung der direkten Lachgasemissionen an den neuesten Wissensstand angepasst, wodurch diese im Jahr 2020 um etwa 5 Mio. t CO₂-Äq niedriger ausfielen [18].

Im Ergebnis fallen die aktuellen Emissionsdaten für 2022 gegenüber der Szenarioanalyse aus dem Jahr 2020 mit einer Jahresemissionsmenge von 61,7 Tg CO₂-Äq für den Sektor Landwirtschaft deutlich günstiger aus und es ergibt sich eine Unterschreitung des entsprechenden Minderungsziels laut Klimaschutzgesetz um rund neun Prozent. Demzufolge würden die zukünftigen Minderungsziele für die Landwirtschaft etwas gelockert und es ergäbe sich für 2030 eine zulässige Jahresemissionsmenge von 57,3 Tg CO₂-Äq, das heißt die jährlichen CO₂-Äq-Emissionen aus der Landwirtschaft müssten im Jahr 2030 gegenüber dem Wert für 2022 um weitere 4,4 Tg oder rund 7 % gesenkt werden.

1.3 Maßnahmen zur Minderung der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft in Deutschland

Bereits im Jahr 2013 untersuchte das Thünen Institut, wie man die THG-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Produktion, die in Deutschland von günstigen klimatischen Bedingungen und einer hohen Intensität geprägt ist, am besten vermeiden kann [19]. Als besonders effektiv, kosteneffizient und im Einklang mit anderen umweltpolitischen Zielen stehend wurden die folgenden Maßnahmen benannt:

- Reduktion der Stickstoffüberschüsse und Verbesserung der Stickstoff-Produktivität,
- Minderung der Ammoniakemissionen,
- Schutz des Dauergrünlands vor Umbruch und Umwandlung in Ackerland,
- Erhalt des Grünlands auf Moorflächen sowie Wiedervernässung von Moorböden und Moorrestaurierung.

Eine weitere Maßnahme ist die Ausrichtung der Biogaserzeugung auf einen möglichst großen Beitrag zum Klimaschutz, namentlich durch die Nutzung von Wirtschaftsdüngern, die gasdichte Lagerung der Gärreste und die Verbesserung des energetischen Nutzungsgrades.

In einer Studie aus dem Jahr 2019 hat das Thünen Institut die Wirkung konkreter Maßnahmen zur Minderung der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft quantitativ geschätzt. Einen Auszug aus diesen Ergebnissen zeigt Tab. 8. Den größten direkten Effekt hätten demnach Maßnahmen zur Senkung der Stickstoffüberschüsse und der Freisetzung von Ammoniak mit in Summe ca. 3,5 Tg vermiedenen CO₂-Äq-Emissionen (als Lachgas) sowie die Vergärung und gasdichte Lagerung von Wirtschaftsdüngern aus der Tierhaltung mit 2,8 bis 4,4 Tg vermiedenen CO₂-Äq-Emissionen (ca. 70 % als Methan und 30 % als Lachgas).

Tab. 8: Schätzwerte der möglichen Vermeidung von THG-Emissionen aus der Landwirtschaft im Jahr 2030 durch ausgewählte Maßnahmen; Angaben in Tg CO₂-Äq (GWP100) pro Jahr; Darstellung verändert nach [20].

Maßnahme	Minimum	Maximum
Senkung der Stickstoffüberschüsse	2,7	2,7
Senkung der Ammoniakemissionen	0,8	0,8
Vergärung und gasdichte Lagerung von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft	2,8	4,4
davon als:		
Methan	1,9	3,1
Lachgas	0,9	1,3
Erhöhung des Flächenanteils des Ökologischen Landbaus (zusätzlich zum Effekt unter 1.)	0,4	1,2
Energieeinsparungen und Substitution fossiler Energieträger in der Landwirtschaft	0,7	1,1

Die gemäß Klimaschutzgesetz geforderte Senkung der jährlichen CO₂-Äq-Emissionen aus der Landwirtschaft um 4,4 Tg auf 51,3 Tg im Jahr 2030 könnte demnach mit den drei wichtigsten Maßnahmen laut Tab. 8 erreicht werden. Die erforderliche Minderung gleicht

zufällig dem geschätzten maximalen Potenzial zur Vermeidung der CO₂-Äq-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management. Hierfür müssten 70 % des gesamten Wirtschaftsdüngeraufkommens in Biogasanlagen mit gasdichten Gärrestlagern verwertet werden. (Gleichzeitig könnte so ein Teil der ausgewiesenen Vermeidung der Ammoniakemissionen realisiert werden.)

Einerseits verursacht also das Wirtschaftsdüngermanagement nur etwa ein Fünftel der Methanemissionen aus der Tierhaltung bzw. rund zwölf Prozent der CO₂-Äq-Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft, andererseits ist die Biogastechnik als Maßnahme zu deren weitgehender Vermeidung weit ausgereift und vergleichsweise schlicht. Deren technisches Potenzial wird im vorliegenden Bericht im Detail und mit dem Fokus auf Bayern ausgewertet. Eine separate Studie wird die ökonomischen Hemmnisse für die stärkere Verbreitung der Wirtschaftsdüngervergärung untersuchen.

2 Beschreibung der Methodik

Die Berechnung der möglichen Minderung der Methanemissionen aus dem Management tierischer Wirtschaftsdünger in der vorliegenden Studie basiert auf der Methodik des Nationalen Emissionsinventars (NEI): Dieses stellt eine wissenschaftliche Bestandsaufnahme über Quellen und Senken für Treibhausgase bzw. Luftschadstoffe dar und wird für den Bereich Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Landnutzung vom Thünen-Institut im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft erstellt. Grundidee für das Vorgehen bei der vorliegenden Potenzialanalyse war es, die Berechnungsmethode des NEI für den Bereich des Wirtschaftsdünger-Managements in vereinfachter Form nachzubilden, um diese anschließend auf die Daten zu den einzelbetrieblichen Tierbeständen im Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem (IVKS) anwenden zu können.

Im Abschnitt 2.1 werden zunächst die im entsprechenden Report des Thünen-Instituts [21] ausführlich erläuterten Berechnungsmethoden und Datengrundlagen in knapper Form wiedergegeben, soweit es für das Verständnis der Potenzialanalyse erforderlich ist. Abschnitt 2.2 skizziert die Nachbildung des NEI für die Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in der Rinder- und Schweinehaltung in Bayern unter MS®Excel. Weitere Materialien und Methoden für die Potenzialanalyse zur Verwendung von Daten zu den einzelbetrieblichen Tierbeständen werden im Abschnitt 2.3 beschrieben.

2.1 Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management im Nationalen Emissionsinventar

Die Berechnung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management (*engl.* „Manure management“ – MM) basiert auf der Menge (Trockenmasse – TM) des von den Tieren aufgenommenen Futters, welche mit dem Modell Py-GAS-EM unter der Annahme einer energiebedarfsdeckenden Fütterung aus den Energiegehalten der Futterkomponenten berechnet wird (Siehe [21], Abb. 3.3). Die Methanemission E je Tierkategorie i , $E_{CH_4,MM,i}$ ergibt sich durch Multiplikation der Anzahl der Tierplätze n_i mit dem entsprechenden Emissionsfaktor $EF_{CH_4,MM,i}$.

$$E_{CH_4,MM,i} = EF_{CH_4,MM,i} \cdot n_i \quad \{1\}$$

Die im Emissionsinventar verwendeten Tierkategorien weichen von denjenigen der Viehbestandserhebung in der deutschen Officialstatistik ab. Es muss daher eine Umrechnung vorgenommen werden, wie in Tab. 9 und Tab. 10 erläutert.

Das Emissionsinventar wird jährlich berechnet, weshalb Schwankungen im Tierbestand innerhalb eines Jahres laut der deutschen Officialstatistik zum Viehbestand nicht berücksichtigt werden. Daher geht die Inventarberechnung davon aus, dass die durch die Officialstatistik zweimal jährlich erhobene Anzahl besetzter Tierplätze (n_{op} für *engl.* „occupied places“) über den jeweiligen Halbjahreszeitraum gleich bleibt. Somit entspricht die Anzahl der Tierplätze n_{op} dem Jahresmittel der Tierzahl AAP (*engl.* „annual average population“).

Tab. 9: Umrechnung der Tierzahlen in der Rinderhaltung zwischen den Kategorien der Viehbestandserhebung und denjenigen des Emissionsinventars (Quelle: [21], Tabelle 4.1).

Emissionsinventar (EI)	Viehbestandserhebung (VB)
n_{EI} (Milchkühe)	= n_{VB} (Milchkühe)
n_{EI} (Mutterkühe)	= n_{VB} (Mutterkühe)
n_{EI} (Kälber ≤ 4 Monate)	= $4/8 * n_{VB}$ (männl. + weibl. Kälber ≤ 8 Mon.) bzw. = $4/6 * n_{VB}$ (männl. + weibl. Kälber ≤ 6 Mon.)
n_{EI} (Milchfärsen)	= n_{VB} (weibl. Jungrinder > 6 bzw. 8 Mon. bis 1 Jahr) + n_{VB} (weibl. Rinder > 1 Jahr bis unter 2 Jahre) + $(1 - 4/8) * n_{VB}$ (weibl. Kälber ≤ 8 Mon.) bzw. $(1 - 4/6) * n_{VB}$ (weibl. Kälber ≤ 6 Mon.)
n_{EI} (Weibl. Mastrinder)	= n_{VB} (weibl. Rinder 2 Jahre und älter)
n_{EI} (Männl. Mastrinder)	= n_{VB} (männl. Jungrinder > 6 bzw. 8 Mon. bis 1 Jahr) + n_{VB} (männl. Rinder > 1 Jahr bis unter 2 Jahre) + $(1 - 4/8) * n_{VB}$ (männl. Kälber ≤ 8 Mon.) bzw. $(1 - 4/6) * n_{VB}$ (männl. Kälber ≤ 6 Mon.)
n_{EI} (Männl. Rinder ≥ 2 Jahre)	= n_{VB} (männl. Rinder 2 Jahre und älter)

Tab. 10: Umrechnung der Tierzahlen in der Schweinehaltung zwischen den Kategorien der Viehbestandserhebung und denjenigen des Emissionsinventars (Quelle: [21], Tabelle 5.1).

Emissionsinventar (EI)	Viehbestandserhebung (VB)
n_{EI} („Weaners“ / Aufzuchtferkel)	= n_{VB} (Ferkel) – n_{VB} (Saugferkel) + n_{VB} (Ferkel erfasst als Anteil der Jungschweine < 50 kg) wobei: n_{VB} (Saugferkel) = $0,5771 * n_{VB}$ (Ferkel); n_{VB} (Ferkel erfasst als Anteil der Jungschweine < 50 kg) = n_{VB} (Jungschweine < 50 kg) * x_{pN} ; x_{pN} = (Endgewicht Aufzuchtferkel – 20 kg) / (50 kg – 20 kg); im Jahr 2020: x_{pN} = (29,8 kg – 20 kg) / (50 kg – 20 kg) = 0,3267
n_{EI} (Mastschweine)	= n_{VB} (Jungschweine < 50 kg) + n_{VB} (Mastschweine) - n_{VB} (Ferkel erfasst als Anteil der Jungschweine < 50 kg) = n_{VB} (Mastschweine) + $(1 - x_{pN}) * n_{VB}$ (Jungschweine < 50 kg); im Jahr 2020: = n_{VB} (Mastschweine) + $0,6733 * n_{VB}$ (Jungschweine < 50 kg)
n_{EI} (Eber)	= n_{VB} (Eber zur Zucht)
n_{EI} (Sauen)	= n_{VB} (Zuchtsauen ≥ 50 kg)

Bei Angaben, die sich auf den Tierplatz beziehen (wie z. B. Energiebedarf oder Emission), wird i. d. R. die Einheit „pl⁻¹“ verwendet (von *engl.* „(animal) place“ = Tierplatz). Bei Tieren, deren Produktionszyklen kürzer als ein Jahr sind (wie z. B. bei Mastschweinen oder Sauen in der Ferkelproduktion), werden die Berechnungen zunächst pro Tier bzw. Produktionszyklus ausgeführt und dann auf das Jahr umgerechnet. Die Angaben je Tier haben die Einheit „an⁻¹“ (von *engl.* „animal“ = Tier). Bei Größen, die pro Jahr angegeben werden (wie z. B. die Milchleistung), sind die Einheiten „pl⁻¹“ und „an⁻¹“ äquivalent.

Während das Inventar auf dem Konzept des mittleren, ganzjährig besetzten Tierplatzes beruht, ist ein Tierplatz in der Praxis („realer Tierplatz“) im Allgemeinen nur zeitweilig besetzt, unterbrochen durch Leerstandszeiten. Somit sind Eingangsdaten und Emissionen des Inventars mit dem Anteil der Tage im Jahr mit Leerstand zu multiplizieren, um mit der Praxis vergleichbare Eingangsdaten und Emissionen zu erhalten.

2.1.1 Berechnung des Emissionsfaktors

Der jeweilige effektive Emissionsfaktor $EF_{CH_4,MM,i}$ wird im NEI nach einem „Tier-2-Verfahren“ berechnet, d. h. auf Basis nationaler Daten anstelle von Standardfaktoren auf globaler Ebene. Entscheidend für den Emissionsfaktor (EF) ist die organische Trockensubstanz (*engl.* „Volatile Solids“ - VS) in den tierischen Ausscheidungen. Der EF nach Gleichung {1} ist eine Funktion der ausgeschiedenen täglichen VS-Menge je Tierkategorie, eines zeitlichen Umrechnungsfaktors α , der Methandichte $\rho(CH_4)$, der maximalen Methanbildungskapazität B_0 , abhängig von der Tierart, und des Methanumwandlungsfaktors MCF , der angibt, welcher Anteil von B_0 im jeweiligen System tatsächlich freigesetzt wird, multipliziert mit dem Anteil MS der Tierkategorie i , deren Wirtschaftsdünger im jeweiligen System j gehandhabt wird:

$$EF_{CH_4,MM,i} = VS_i \cdot \alpha \cdot B_{0,i} \cdot \rho_{CH_4} \cdot \sum_{jk} MCF_{i,j,k} \cdot MS_{i,j} \quad \{2\}$$

Die Methanemissionen aus der mit Einstreu ins Wirtschaftsdünger-Management gelangenden VS-Menge sowie die Methanemissionen aus Jauche werden nicht berücksichtigt.

2.1.2 Konventionelle Verfahren für das Wirtschaftsdünger-Management

Die Parameterwerte für die Modellierung des Wirtschaftsdünger-Managements im NEI werden tierartspezifisch für unterschiedliche Verfahren der Haltung und Wirtschaftsdünger-Lagerung nach dem jeweils aktuellen Stand des Wissens festgelegt. Eine Übersicht der entsprechenden Werte für das „konventionelle Wirtschaftsdünger-Management – d. h. Verfahren ohne Vergärung – wie sie in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden, zeigt Tab. 11 für Rinder bzw. Tab. 12 für Schweine.

Tab. 11: Werte für das Methanbildungspotenzial und die verfahrensspezifischen Methanumwandlungsfaktoren beim konventionellen Wirtschaftsdüngermanagement bzw. bei der Weide von Rindern (eigene Darstellung nach [21]).

Methanbildungspotenzial B_0 der organ. Trockensubstanz (VS), $\text{m}^3 (\text{kg})^{-1}$	0,23
Methanumwandlungsfaktor MCF, $\text{m}^3 (\text{m}^{-3})$	
Gülle (unbehandelt)...	
im offenen Güllelagerbehälter ohne natürl. Schwimmdecke	0,17
im Güllelagerbehälter mit...	
fester Abdeckung (inkl. Zeltdach)	0,17
natürlicher Schwimmdecke	0,10
schwimmender Abdeckung aus Strohhäcksel oder Folie	0,17
im Lager unter Spaltenboden (> 1 Monat Aufenthaltszeit)	0,17
Festmist/Misthaufen (Anbindehaltung oder Laufstall)	0,02
Festmist/Misthaufen (Tiefstreu oder Tretmist)	0,17
Weide	0,01

Tab. 12: Werte für das Methanbildungspotenzial und die verfahrensspezifischen Methanumwandlungsfaktoren beim konventionellen Wirtschaftsdüngermanagement von Schweinen (eigene Darstellung nach [21]).

Methanbildungspotenzial B_0 der organ. Trockensubstanz (VS), $\text{m}^3 (\text{kg})^{-1}$	0,30
Methanumwandlungsfaktor MCF, $\text{m}^3 (\text{m}^{-3})$	
Gülle (unbehandelt)...	
im offenen Güllelagerbehälter ohne natürl. Schwimmdecke	0,25
im Güllelagerbehälter mit...	
fester Abdeckung (inkl. Zeltdach)	0,25
natürlicher Schwimmdecke	0,15
schwimmender Abdeckung aus Strohhäcksel oder Folie	0,25
im Lager unter Spaltenboden (> 1 Monat Aufenthaltszeit)	0,25
Festmist/Misthaufen (Tiefstreu)	0,25
Festmist/Misthaufen (übrige Systeme)	0,03

Für die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Lagerverfahren für Gülle werden im NEI die durchschnittlichen Werte für Deutschland nach Tierarten ohne weitere Differenzierung nach Kategorien unterschieden. Die entsprechenden Werte für das Jahr 2020 für Gülle von Rindern bzw. Schweinen, wie sie der vorliegenden Arbeit zu Grund liegen, zeigt Tab. 13.

Bei den festen Wirtschaftsdüngern / beim Mist wird die Aufteilung in die Lagerung als Misthaufen, als Mistmatratze (Tiefstreu) oder ggf. als Tretmist (nur für männliche Mastrinder) zusätzlich nach Tierkategorien unterschieden (Siehe dazu [2]: Tabelle AI_1005FST.001).

Tab. 13: Häufigkeit der verschiedenen Lagerverfahren für unbehandelte Gülle von Rindern und Schweinen im Jahr 2021 (eigene Darstellung nach [2]).

	Rinder	Schweine
im offenen Güllelagerbehälter ohne natürl. Schwimmdecke	0,11	0,12
im Güllelagerbehälter mit...		
fester Abdeckung (inkl. Zeltdach)	0,21	0,17
natürlicher Schwimmdecke	0,34	0,20
schwimmender Abdeckung aus Folie	0,04	0,10
schwimmender Abdeckung aus Strohhäcksel	0,01	0,04
im Lager unter Spaltenboden (> 1 Monat Aufenthaltszeit)	0,29	0,38

2.1.3 Wirtschaftsdünger-Vergärung

Die Wirtschaftsdüngervergärung wird nach der Methode des NEI als alternatives Verfahren der Wirtschaftsdünger-Lagerung behandelt. Ausgangspunkt für die Berechnung des Methanumwandlungsfaktors (*engl.* „Methane conversion factor“ – MCF) für die CH₄-Emissionen aus der Wirtschaftsdüngervergärung (Kombination aus Gärbehälter(n) + Gärrestlager) im deutschen NEI (Stand: 2021 gemäß [21]) ist die folgende Formel gemäß [22]:

$$MCF = \frac{v_{CH_4,erz.} - v_{CH_4,nutzb.} - v_{CH_4,abgef.} + MCF_{Gärrest} \cdot (B_0 - v_{CH_4,erz.})}{B_0}; \quad \{2\}$$

mit:

$v_{CH_4,erz.}$ Brutto-Methanausbeute aus der zugeführten Masse an VS, m³ kg⁻¹

$v_{CH_4,nutzb.}$ Netto-Methanausbeute zur energetischen Verwertung, m³ kg⁻¹

$v_{CH_4,abgef.}$ spezifische abgefackelte Methanmenge, m³ kg⁻¹

$MCF_{Gärrest}$ Methanumwandlungsfaktor im Gärrestlager, m³ m⁻³.

Das Restgaspotential μ_{rg} bezeichnet die Differenz zwischen B_0 und der in der Praxis erreichten Methanausbeute $v_{CH_4,erz.}$:

$$\mu_{rg} = \frac{B_0 - v_{CH_4,erz.}}{B_0}; \quad \{3\}$$

Somit errechnet sich der effektive Methanumwandlungsfaktor für die Kombination aus Gärbehälter + Gärrestlager wie folgt:

$$MCF = (1 - \mu_{rg}) * L_{Gärbeh.} + \mu_{rg} * MCF_{Gärrest}; \quad \{4\}$$

mit:

$L_{Gärbeh.}$ Leckagerate des/der Gärbehälter(s) bezogen auf $v_{CH_4,erz.}$, $m^3 m^{-3}$ (mit $0 \leq \mu_{rg} \leq 1$).

Und bei Hinzunahme des Vorlagers (VL.) ergibt sich:

$$MCF = MCF_{VL.} + (1 - MCF_{VL.}) * [(1 - \mu_{rg}) * L_{Gärbeh.} + \mu_{rg} * MCF_{Gärrest}]. \quad \{5\}$$

Tab. 14: Parameterwerte für die Berechnung der Methanemissionen aus der Wirtschaftsdünger-Vergärung bei Rindern und Schweinen (eigene Darstellung nach [21]).

	Rinder	Schweine
Methanumwandlungsfaktor im Vorlager, $m^3 (m^{-3})$:		
güllebasierte Systeme	0,017	0,025
strohbasierter Systeme	0,002	0,002
Leckagerate Fermenter, $m^3 (m^{-3})$	0,01	
Relatives Restgaspotenzial, $m^3 (m^{-3})$	0,046	
Methanumwandlungsfaktor im Gärrestlager, $m^3 (m^{-3})$:		
offen	0,10	
an die Gaserfassung angeschlossen	0	

Der Anteil VS-Ausscheidungen, die der Vergärung zugeführt werden, wird im NEI je Bundesland und Tierkategorie berechnet. Bei der Lagerung der Gärreste werden zwei Fälle unterschieden: zur Atmosphäre hin offene oder gasdichte, an die Gaserfassung angeschlossene Lagerbehälter (Vergleiche Tab. 14). Für die Aufteilung auf die beiden Fälle werden durchschnittliche Werte für Deutschland verwendet, wobei nicht nach Tierarten differenziert wird.

Trotz der Verluste durch Leckagen und selbst bei Lagerung der Gärreste in offenen Behältern ist für Gülle der berechnete MCF der Kombination „Vorlager + Fermenter + Gärrestlager“ beträchtlich kleiner als der mittlere MCF der herkömmlichen Wirtschaftsdüngerlagerung, z. B. für Rinder (Vergleiche Tab. 14 vs. Tab. 11):

$$\begin{aligned} MCF_{Vergärung} &= 0,017 + (1 - 0,017) * [(1 - 0,046) * 0,01 + 0,046 * 0,10] \cong \\ &\cong 0,017 + 0,009 + 0,005 = 0,031 \end{aligned}$$

vs.

$$MCF_{off. Güllelag.} = 0,17$$

Im Beispiel für Rindergülle errechnet sich für die Vergärung mit offener Gärrestlagerung eine Minderung der Methanemission um rund 82 % gegenüber der offenen Lagerung der

unbehandelten Gülle. Anders verhält es sich für das Management von Festmist: Hier ergibt sich nur für den Fall von Systemen mit Tiefstreu eine deutliche Verminderung der Methanemissionen gegenüber der konventionellen Lagerung.

Als Referenz für die vorliegende Potenzialanalyse werden in den folgenden beiden Tabellen die Parameterwerte zur Aufteilung des anfallenden Wirtschaftsdüngers aus der Rinder- und Schweinehaltung auf die verschiedenen Systeme zur Haltung der Tiere und zum Management des Wirtschaftsdüngers aus dem NEI für das Jahr 2021 zusammengefasst.

Tab. 15: Parameterwerte für Bayern gemäß NEI 2021 zur Berechnung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in der Rinderhaltung (eigene Darstellung nach [2]).

	Kälber	Männl. Mastrinder	Männl. Rinder > 2 Jahre	Milchfärsen	Milchkühe	Mutterkühe	Weibl. Mastrinder
Anteil der in güllebasierten Systemen aufgestellten Tiere, %	0	70,0	38,0	67,2	89,7	32,5	67,2
Anteil der in strohbasierten Systemen aufgestellten Tiere, %	100	30,0	62,0	32,8	10,3	67,5	32,8
durchschnittlicher Anteil der Weidezeit im Jahr, %	0	4,24	34,3	7,5	4,10	34,3	7,52
VS-Ausscheidungen, kg (pl a) ⁻¹	141	592	1457	539	1455	1012	685
Anteil der VS-Ausscheidungen aus güllebasierten Systemen, %	0	59,4	22,1	55,1	76,3	19,0	55,1
Anteil der VS-Ausscheidungen aus strohbasierten Systeme, %	0	2,86	19,5	15,1	6,99	20,5	15,1
Anteil der VS-Ausscheidungen als Tiefstreu, %	95,5	24,6	19,3	13,9	2,40	21,8	13,9
Anteil der VS-Ausscheidungen beim Weidegang, %	0	4,24	34,5	7,52	4,10	34,3	7,52
Anteil der einer Vergärung zugeführten VS-Ausscheidungen, %	4,52	8,87	4,65	8,39	10,2	4,42	8,39

Tab. 16: Parameterwerte für Bayern gemäß NEI 2021 Berechnung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in der Schweinehaltung (eigene Darstellung nach [2]).

	Aufzuchtferkel	Eber	Mastschweine	Sauen
Anteil der in güllebasierten Systemen aufgestellten Tiere, %	93,9	89,5	93,9	89,5
Anteil der in strohbasierten Systemen aufgestellten Tiere, %	6,07	10,5	6,07	10,5
VS-Ausscheidungen, kg (pl a) ⁻¹	34,9	129	133	220
Anteil der VS-Ausscheidungen aus güllebasierten Systemen, %	83,0	79,2	83,0	79,2
Anteil der VS-Ausscheidungen aus strohbasierten Systeme, %	3,75	10,5	3,75	20,9
Anteil der VS-Ausscheidungen als Tiefstreu, %	2,32	0	2,32	0
Anteil der einer Vergärung zugeführten VS-Ausscheidungen, %	10,9	10,4	10,9	10,4

Die Anteile an den tierischen Ausscheidungen (aus Basis der organischen Trockensubstanz), die einer Vergärung zugeführt werden, sind für Bayern mit rund 4 bis 10 % bei den Rindern und rund 10 bis 11 % bei den Schweinen deutlich geringer als im Durchschnitt für Deutschland: Hier liegen diese Anteile bei rund 11 % für Rinder (ohne Milchkühe), 23 % für Milchkühe, 20 % für Sauen bzw. 14 % für Mastschweine (Vergleiche Tab. 17). Ein wesentlicher Grund dafür kann in der vergleichsweise klein strukturierten Tierhaltung in Bayern gefunden werden. Die mit Abstand höchsten Vergärungsanteile werden in der Rinderhaltung in Thüringen bzw. in der Schweinehaltung in Mecklenburg-Vorpommern erreicht.

Tab. 17: Prozentuale Anteile der VS-Ausscheidungen in der Rinder- und Schweinehaltung, die im Jahr 2020 in Bayern bzw. Deutschland insgesamt einer Vergärung zugeführt wurden; zusätzlich angegeben sind die geringsten bzw. höchsten Werte auf Länderebene mit Angabe des jeweiligen Bundeslandes: HE = Hessen; MV = Mecklenburg-Vorpommern; SL = Saarland; TH = Thüringen (eigene Darstellung nach [2]).

	Bayern	Deutschland	niedrigster Wert (Land)	höchster Wert (Land)
Milchkühe	10,3	23,1	5,6 (SL)	81,8 (TH)
Rinder (ohne Milchkühe)	8,1	10,7	2,4 (SL)	22,5 (TH)
Sauen	11,1	20,3	5,4 (HE)	67,1 (MV)
Mastschweine	11,7	14,2	5,8 (HE)	69,7 (MV)

2.2 Nachbildung des Emissionsinventars für das Jahr 2021

Für die Gegenüberstellung der originalen und der vereinfacht nachgerechneten Emissionsdaten wurde das Jahr 2021 gewählt. Nach Formel {1} (Abschnitt 2.1.1) werden für die Berechnung des Emissionsfaktors für Methan beim Wirtschaftsdünger-Management je Tierkategorie im Prinzip folgende Daten benötigt: (1) die Gesamtmasse der Ausscheidungen an organischer Trockensubstanz (VS), (2) die Aufteilung dieser Ausscheidungen auf die verschiedenen Verfahren des Wirtschaftsdünger-Managements und (3) die Methanumwandlungsfaktoren (MCF) dieser Verfahren.

Die entsprechenden Daten zu (1) und (2) wurden der originalen Datenveröffentlichung zum NEI entnommen [2] und unter MS®Excel mittels Pivot-Tabellen nach Tierkategorien sortiert (Vergleiche Tab. 15 und Tab. 16). Für die Methanumwandlungsfaktoren wird auf Tab. 11 und Tab. 12 für das konventionelle Wirtschaftsdünger-Management bzw. auf Tab. 14 für die Wirtschaftsdünger-Vergärung verwiesen. Hieraus wurden entsprechend Formel {2} die effektiven Methan-Emissionsfaktoren für die einzelnen Tierkategorien bei Rindern und Schweinen und schließlich nach Formel {1} die Methanemissionen je Tierkategorie berechnet. Das Ergebnis dieser Berechnung wird in Tab. 18 den entsprechenden originalen Werten aus [2] gegenüber gestellt.

Tab. 18: Vergleich der nachgerechneten Methan-Emission aus dem Wirtschaftsdünger-Management bei Rindern und Schweinen in Bayern mit den originalen Daten aus dem NEI für das Jahr 2021 ([2]: Tabellen EM1005.001 bis 007 bzw. 010 bis 013); Angaben zu den absoluten Emissionen in kg Methan.

Tierkategorie	Original: NEI	Nachbildung	Differenz Nachbildung zu NEI	
			absolut	%
Kälber	994.258,04	1.003.645,87	9.388	0,94
Männliche Mastrinder	5.107.229,3	5.083.238,1	-23.991	-0,47
Männliche Rinder > 2 Jahre	268.264,27	259.560,63	-8.704	-3,2
Milchfärsen	7.964.702,3	7.898.760,7	-65.942	-0,83
Milchkühe	29.505.035	29.384.834	-120.201	-0,41
Mutterkühe	769.407,46	744.152,62	-25.255	-3,3
Weibliche Mastrinder	1.574.739,8	1.561.702,2	-13.038	-0,83
Rinderhaltung insgesamt	46.183.636,6	45.935.894,3	-247.742	-0,54
Aufzuchtferkel	672.239,9	671.509,6	-730	-0,11
Eber	18.898,97	18.865,70	-33	-0,18
Mastschweine	8.768.588,6	8.759.062,5	-9.526	-0,11
Sauen	1.466.564,3	1.463.982,3	-2.582	-0,18
Schweinehaltung insgesamt	10.926.291,8	10.913.420,1	-12.872	-0,12
Rinder- & Schweinehaltung	57.109.928,4	56.849.314,5	-260.614	-0,46

Die gesamten Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in der Rinder- bzw. Schweinehaltung weichen in der Nachbildung um -0,54 % bzw. -0,12 % von den Werten im NEI ab, wobei in den einzelnen Tierkategorien die höchsten relativen Abweichungen bei den Männlichen Rindern > 2 Jahre und bei den Mutterkühen auftreten (Vergleiche Tab. 18, letzte Spalte). Da mit identischen Tierzahlen gerechnet wurde, beruhen die Abweichungen auf numerischen Ungenauigkeiten und möglicherweise unentdeckten Fehlern in der Tabellenkalkulation.

Die relative Unsicherheit der Methan-Emissionsfaktoren für das Wirtschaftsdünger-Management im NEI wird für die betrachteten Tierarten mit 20 % angegeben (als halbes 95 %-Konfidenzintervall bei Annahme einer Normalverteilung; vergleiche [2]: Tabelle UNC.01). Die Ungenauigkeiten in der Nachbildung können damit im Vergleich zur relativen Unsicherheit des THG-Inventars als sehr gering eingestuft werden. Die gewählte Vorgehensweise einer Tabellenkalkulation wurde somit als grundsätzlich geeignet erachtet und die nachgebildeten Methan-Emissionsfaktoren gemäß Tab. 19 wurden für die Berechnung des Ausgangszustands (Abschnitt 3.3) und für die Potenzialanalyse auf Basis der Tierzahlen aus IVKS (Abschnitt 3.5) verwendet.

Tab. 19: Nachgebildete Methan-Emissionsfaktoren für das Wirtschaftsdünger-Management in der Rinder- und Schweinehaltung in Bayern im Jahr 2021; Angaben in kg Methan je Tierplatz und Jahr.

Tierkategorie	konv. Management <i>EF_{CH4,konv.}</i>	Weide <i>EF_{CH4,Weide}</i>	Vergärung <i>EF_{CH4,Vergär.}</i>
Kälber	3,5201419	0,0	0,01379760
Männliche Mastrinder	11,893100	0,00164813	0,20209328
Männliche Rinder > 2 Jahre	15,483700	0,26621641	0,20733344
Milchfärsen	8,8572656	0,00466695	0,16872301
Milchkühe	26,412312	0,00377434	0,63656635
Mutterkühe	10,753752	0,18392589	0,13124479
Weibliche Mastrinder	11,168664	0,00588483	0,21275309
Aufzuchtferkel	1,3630105	-	0,03095940
Eber	4,6127104	-	0,10371452
Mastschweine	5,2154835	-	0,11846440
Sauen	7,9235708	-	0,17815759

Um einen Eindruck davon zu bekommen, welchen Beitrag die Vergärung von Wirtschaftsdüngern zur Emissionsminderung bereits leistet bzw. leisten könnte, wurden basierend auf der Tabellenkalkulation zur Nachbildung des NEI für das Jahr 2021 zusätzlich die Methanemissionen für folgende drei Szenarien berechnet: 1.) Erfassung von 70 % der VS-Ausscheidungen in güllebasierten Systemen für die Wirtschaftsdüngervergärung bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen; 2.) Erfassung von 50 % der VS-Ausscheidungen in strohbasierten Systemen für die Wirtschaftsdüngervergärung bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen; 3.) keinerlei Wirtschaftsdüngervergärung.

2.3 Weitere Materialien und Methoden für die Potenzialanalyse auf Basis des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems

Die im NEI verwendeten Tierzahlen basieren auf den Daten der Viehbestandserhebung des Statistischen Bundesamtes, die zweimal jährlich (im Frühjahr und im Herbst) durchgeführt wird. Für das NEI werden die Zahlen des Herbsttermins verwendet.

Die vorliegende Potenzialanalyse sollte sich möglichst auf Daten auf einzelbetrieblicher Ebene stützen und verwendet daher Tierzahlen aus dem Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem (IVKS), welche generell nicht öffentlich zugänglich sind. Für die hier spezifizierten wissenschaftlichen Zwecke wurde den Autoren ein Datenbankauszug aus dem Jahr 2022 zur Verfügung gestellt.

Die weiteren Berechnungen für die Potenzialanalyse wurden unter Verwendung von RStudio Version 1.2.5033 vorgenommen. Bei vertieftem Interesse an den Rechenwegen können die verwendeten Skripte bei den Autoren angefordert werden. Die grundlegenden Schritte bei der Datenauswertung waren die folgenden:

- Einlesen des IVKS-Datenbankauszuges und Herausfiltern der Einträge zu Betrieben mit Rinder- und/oder Schweinehaltung
- Umrechnung der betrieblichen Tierzahlen von den Kategorien des IVKS in diejenigen des NEI (getrennt nach Rindern und Schweinen; siehe Abschnitte 2.3.1 bis 2.3.3)
- Abgleich der gesamten Tierzahlen zwischen IVKS und NEI für das Jahr 2021
- Berechnung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management auf Basis der aus dem IVKS abgeleiteten einzelbetrieblichen Tierplätze und der effektiven Emissionsfaktoren gemäß NEI
- Versuch der Identifikation derjenigen Tierhaltungsbetriebe, die bereits eine Biogasanlage (BGA) betreiben, durch Abgleich mit dem Marktstammdatenregister (MaStR)
- Auswertung der Verteilung der Betriebe nach Bestandsgröße, Tierart und Vorhandensein einer BGA
- Erneute Berechnung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management unter Berücksichtigung des Vorhandenseins einer BGA auf einzelbetrieblicher Ebene
- Potenzialanalyse zur Vermeidung von Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management durch Vergärung auf einzelbetrieblicher Ebene in Abhängigkeit von Bestandsgröße und Betriebsform (vergleiche Abschnitt 2.3.4)

2.3.1 Tierkategorien bei Rindern

Da im IVKS wiederum andere Tierkategorien als in der Viehbestandserhebung (VB) verwendet werden, war eine erneute Umrechnung erforderlich, um die Berechnungsmethodik des NEI auf die Tierzahlen aus dem IVKS anwenden zu können wie im Folgenden erläutert (Siehe dazu Tab. 20 für die Rinder bzw. Tab. 21 für die Schweine).

Bei den Rindern werden „Kälber (Zucht/Mast) bis 6 Monate“ nicht getrennt nach Geschlecht gezählt. Die Aufteilung der Jungrinder im Alter von 4 bis 6 Monaten nach Geschlecht wurde daher auf Basis des Geschlechterverhältnisses in der Viehbestandserhebung (vom Mai 2020: [22]) vorgenommen.

2.3.2 Sonderfall: sonstige Kühe

Das IVKS kennt des Weiteren nur eine zusammenfassende Kategorie „Kühe (Milch-, Mutter- und Ammenkühe)“. Die Aufteilung in die für das NEI benötigten Kategorien „Milchkühe“ und „Mutterkühe“ konnte daher nicht direkt vorgenommen werden, sondern erfolgte

auf Basis der Verhältniszahlen von Milchkühen und „sonstigen Kühen“, d. h. Mutter- und Ammenkühen, in der Viehbestandserhebung [22]. Diese Aufteilung ist erforderlich, da im NEI Milchkühe einen wesentlich höheren Methan-Emissionsfaktor aufweisen als Mutterkühe: 25,24 kg Methan pro Tierplatz und Jahr für Milchkühe vs. 10,15 kg Methan pro Tierplatz und Jahr für Mutterkühe (Werte für das Jahr 2020).

Der Anteil der Bestände an „sonstigen Kühen“ am gesamten Kuhbestand ist in der Viehbestandserhebung auf Ebene der Landkreise verfügbar und variiert zwischen den Landkreisen sowie in Abhängigkeit der Bestandsgröße erheblich. Das Verhältnis von „sonstigen Kühen“ und Milchkühen wurde im Durchschnitt für die einzelnen Landkreise berechnet, differenziert nach vier Bestandsklassen (Siehe Abb. 3). Betriebe mit ausschließlicher Mutterkuhhaltung in der Klasse mit mehr als 99 Tieren gibt es in Bayern keine.

Die resultierende Matrix wurde verwendet, um jedem Betrieb mit Haltung von Kühen nach der Kategorisierung im IVKS einen nominalen Bestand von Milchkühen einerseits und Mutterkühen andererseits zuzuordnen. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass in der Summe über alle Betriebe in einem Landkreis die Methanemission mit dem NEI im Einklang steht; die entsprechende Methanemission aus dem Wirtschaftsdüngermanagement einzelner Betriebe kann auf Basis der Daten im IVKS hingegen nicht berechnet werden.

Tab. 20: Umrechnung der Tierzahlen in der Rinderhaltung zwischen den Kategorien im IVKS und denjenigen des Emissionsinventars.

Emissionsinventar (EI)	IVKS
n_{EI} (Milchkühe)	$= n(\text{Kühe}) * n_{VB}(\text{Milchkühe}) / (n_{VB}(\text{sonstige Kühe}) + n_{VB}(\text{Milchkühe}))$ Im Mittel für Bayern: $n_{VB}(\text{Milchkühe}) / (n_{VB}(\text{sonstige Kühe}^*) + n_{VB}(\text{Milchkühe})) = 0,942430$
n_{EI} (Mutterkühe)	$= n(\text{Kühe}) * n_{VB}(\text{sonstige Kühe}) / (n_{VB}(\text{sonstige Kühe}) + n_{VB}(\text{Milchkühe}))$ Im Mittel für Bayern: $(n_{VB}(\text{sonstige Kühe}) / (n_{VB}(\text{sonstige Kühe}) + n_{VB}(\text{Milchkühe}))) = 0,057570$
n_{EI} (Kälber ≤ 4 Monate)	$= 4/6 * n(\text{Kälber (Zucht/Mast) bis 6 Monate})$
n_{EI} (Milchfärsen)	$= (1 - 4/6) * x_{weibl.} * n(\text{Kälber (Zucht/Mast) bis 6 Monate})$ $+ n(\text{Weibl. Rinder 6 Mo. bis 1 Jahr})$ $+ n(\text{Weibl. Rinder 1 bis 2 Jahre})$ Wobei: $x_{weibl.}$: Anteil der weibl. Kälber in der Viehbestandserhebung (dort: Kälber ≤ 8 Monate).
n_{EI} (Weibl. Mastrinder)	$= n(\text{Andere weibl. Rinder ü. 2 Jahre})$
n_{EI} (Männl. Mastrinder)	$= (1 - 4/6) * (1 - x_{weibl.}) * n(\text{Kälber (Zucht/Mast) bis 6 Monate})$ $+ n(\text{Männl. Rinder über 6 Monate bis 1 Jahr})$ $+ n(\text{Männl. Rinder über 1 Jahr bis 2 Jahre})$
n_{EI} (Männl. Rinder ≥ 2 Jahre)	$= n(\text{Männl. Rinder über 2 Jahre, Zuchtbullen})$

*) Sonstige Kühe = Mutter- und Ammenkühe

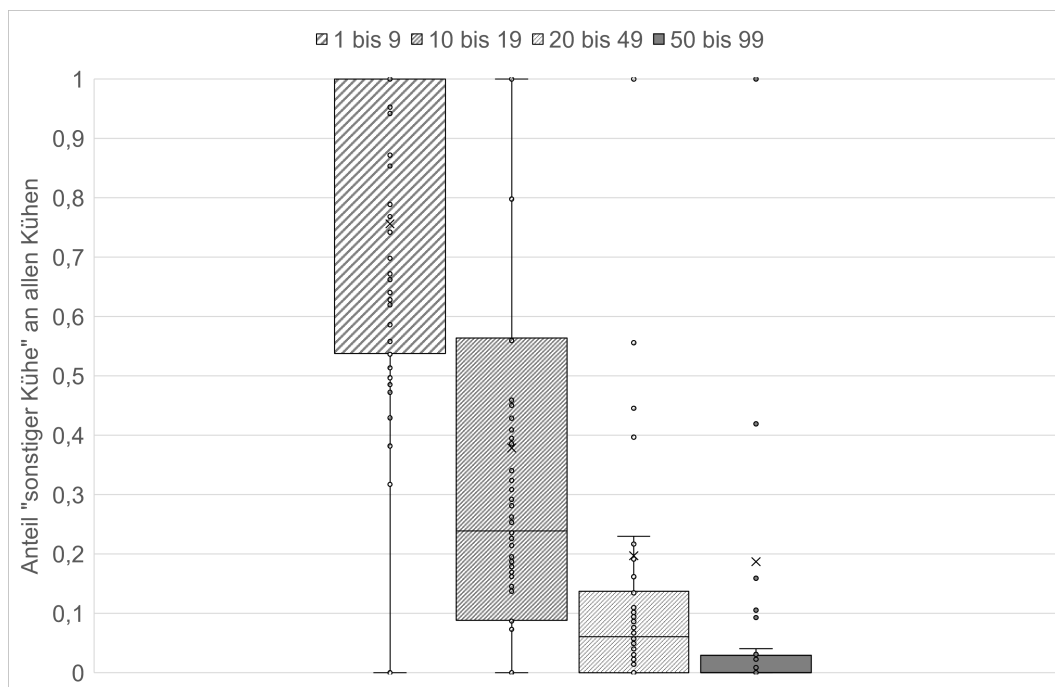


Abb. 3: Verteilungsdiagramm für den auf Ebene der bayerischen Landkreise aggregierten Anteil von „sonstigen Kühen“, das sind Mutter- und Ammenkühe, am gesamten Kuhbestand, differenziert nach vier Bestandsklassen (eigene Darstellung nach [22]).

2.3.3 Tierkategorien bei Schweinen

Wie die Tierzahlen bei Schweinen nach den Kategorien des NEI aus Zahlen im IVKS berechnet wurden, fasst Tab. 21 zusammen. In der Schweinehaltung verwendet das IVKS keine getrennte Kategorie für Eber, sondern diese sind in der Kategorie „Mastschweine (einschl. Eber) ab 50 kg“ enthalten. Für die Eber wurde daher keine getrennte Berechnung vorgenommen. Da im NEI ein Teil der in der Kategorie M der Viehbestandserhebung (das sind „Ferkel unter 20 kg“; vergleiche [21]: Tabelle 5.1, S. 200) gezählten Ferkel als Saugferkel in der Inventarkategorie Sauen berücksichtigt werden, ist die im Inventar verwendete Gesamtzahl aller Schweine kleiner als die Gesamtzahl nach der amtlichen Tierzählung.

Tab. 21: Umrechnung der Tierzahlen in der Schweinehaltung zwischen den Kategorien im IVKS und denjenigen des Emissionsinventars.

Emissionsinventar (EI)	IVKS
n_{EI} („Weaners“ / Aufzuchtferkel)	$\cong n$ (Ferkel bis unter 30 kg); da Endgewicht Aufzuchtferkel im Jahr 2020 = 29,8 kg
n_{EI} (Mastschweine)	$\cong n$ (Jungschweine 30 bis unter 50 kg) + n (Mastschweine (einschl. Eber) ab 50 kg); im Jahr 2020 in Bayern: n_{VB} (Eber) / n_{VB} (Mastschweine) = 1,5 / 1.420,1 = 0,00106
n_{EI} (Eber)	nicht getrennt ausgewiesen.
n_{EI} (Sauen)	= n (Zuchtsauen ab 1. Abferk./Jungs. trächti) + n (Andere Zuchtschweine (o. Eber) ab 50 kg

2.3.4 Kategorisierung der Betriebsformen

Um das Potenzial für die Minderung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement durch die Errichtung betrieblicher Biogasanlagen (BGA) weiter differenzieren und eingrenzen zu können, wurden die Tierhaltungsbetriebe in Bayern nicht nur anhand des Tierbestandes, sondern zusätzlich anhand der Betriebsform grob klassifiziert. Hierzu wurden die betrieblichen Tierzahlen für das Jahr 2021 gemäß IVKS (= „Bestand Vorjahr“ im IVKS-Auszug für das Jahr 2022) nach der Umrechnung in Tierplätze gemäß NEI nach der Tierart Rinder oder Schweine sowie nach fünf Rubriken aggregiert: „Milchvieh“, „Mutterkuhhaltung“, „Rindermast“, „Zuchtsauen“ und „Schweinemast“ (Vergleiche Tab. 22, zweite Spalte). Die so aggregierten betrieblichen Tierplatzzahlen wurden entsprechend den in Tab. 23 beschriebenen Regeln nach Tierart und Rubrik ausgewertet, und dementsprechend wurde jeder Betrieb einer von sieben „Betriebsformen“ zugeordnet.

Tab. 22: *Verwendete Rubriken für die Summierung der betrieblichen Tierbestände nach EI-Kategorien.*

Tierkategorien	Summenbildung der Rubrik	Tierplätze (EI) über: Tierart
Milchkühe Milchfärsen	„Milchvieh“	„Rinder“
Kälber	„Mutterkuhhaltung“	
Mutterkühe		
Männliche Mastrinder Männliche Rinder > 2 Jahre Weibliche Mastrinder	„Rindermast“	
Aufzuchtferkel Eber Sauen	„Zuchtsauen“	„Schweine“
Mastschweine	„Schweinemast“	

Tab. 23: *Regeln für die Kategorisierung nach „Betriebsform“ auf Basis der nach Tierarten und Rubriken aggregierten Tierplätze.*

Tierplätze nach Tierart	Tierplätze nach Rubrik	Zugeordnete Betriebsform
x („Rinder“) > 0 UND x („Schweine“) = 0 x („Rinder“) = 0 UND x („Schweine“) > 0 x („Rinder“) > 0 UND x („Schweine“) > 0 x („Rinder“) = 0 UND x („Schweine“) = 0	Max. in „Milchvieh“ ODER „Mutterkuhhaltung“ ODER „Rindermast“ Max. in „Zuchtsauen“ ODER „Schweinemast“	„Milchviehhaltung“ ODER „Mutterkuhhaltung“ ODER „Rindermast“ „Zuchtsauenhaltung“ ODER „Mastschweinehaltung“
	-	„Verbund“
	-	„keine Tierhaltung mehr“

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Orientierende Szenarioanalyse

Die Nachbildung des Inventars für die Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement in der Rinder- und Schweinehaltung im Jahr 2021 dient als Ausgangsbasis / Status quo für die orientierende Szenariobetrachtung und die nachfolgende Potenzialanalyse. Aus Abb. 4 geht zunächst deutlich hervor, dass in Bayern die Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in der Milchviehhaltung und der Schweinemast dominiert werden.

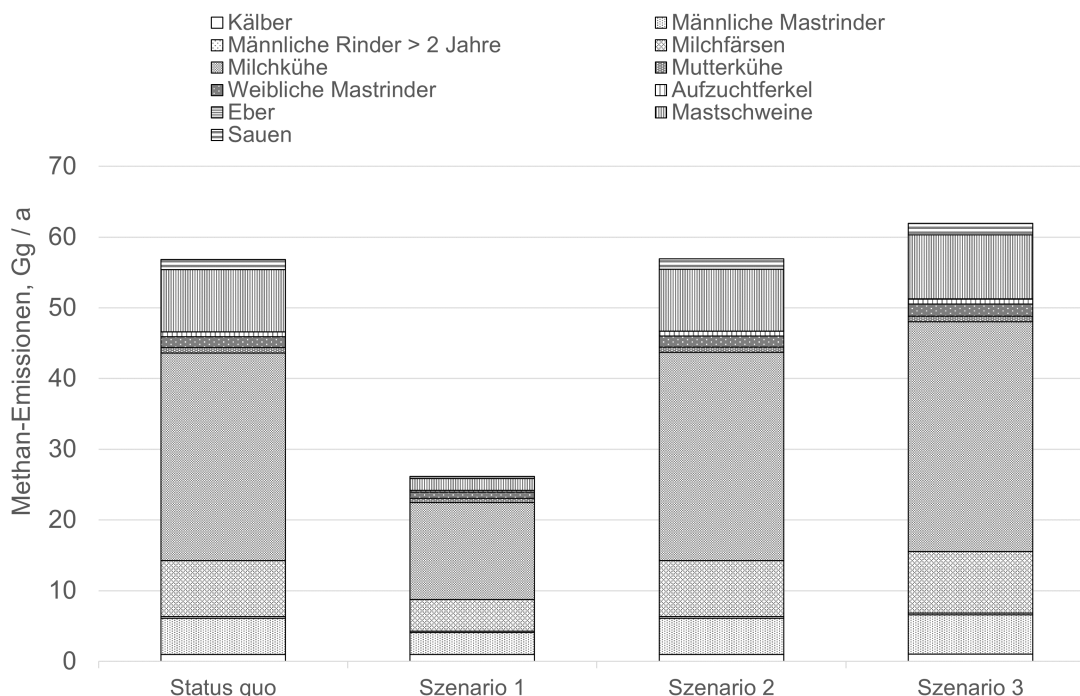


Abb. 4: Gegenüberstellung des nachgebildeten Inventars für die Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement im Status quo und in den drei betrachteten Szenarien.

Für das Szenario 1 (Vergärung von 70 % der VS-Ausscheidungen in güllebasierten Systemen) ergibt sich gegenüber dem Status quo eine Minderung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement um rund 48 % in der Rinderhaltung und um rund 80 % in der Schweinehaltung; für die Summe der Methanemissionen aus der Rinder- und Schweinehaltung ergibt dies eine Minderung von rund 54 % (Vergleiche Tab. 24, drittletzte Spalte sowie Abb. 5).

Tab. 24: Vergleich der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement für die betrachteten Szenarien gegenüber dem Status quo (Nachbildung NEI 2021); alle Werte in Gg / a, sofern nicht anders angegeben.

Tierkategorie	Status quo	Szen. 1	Szen. 2	Szen. 3	Differenz zu Status quo, %		
					Szen. 1	Szen. 2	Szen. 3
Kälber	1,0036	1,0036	1,0036	1,0490	-	-	4,52
Männliche Mastrinder	5,0832	3,1089	5,0854	5,5224	-38,8	0,042	8,64
Männliche Rinder > 2 Jahre	0,25956	0,18759	0,25925	0,28216	-27,7	-0,118	5,18
Milchfärsen	7,8988	4,4653	7,9177	8,6780	-43,5	0,239	9,87
Milchkühe	29,385	13,720	29,445	32,497	-53,3	0,204	10,6
Mutterkühe	0,74415	0,56538	0,74237	0,80627	-24,0	-0,240	8,35
Weibliche Mastrinder	1,5617	0,88285	1,5654	1,7158	-43,5	0,239	9,87
Rinderhaltung insgesamt	45,936	23,934	46,019	50,551	<u>-47,9</u>	<u>0,180</u>	<u>10,0</u>
Aufzuchtferkel	0,67151	0,24612	0,67181	0,69481	-63,3	0,044	3,5
Eber	0,01887	0,00376	0,01889	0,02094	-80,1	0,104	11,0
Mastschweine	8,7591	1,7021	8,7629	9,0629	-80,6	0,044	3,5
Sauen	1,4640	0,2837	1,4655	1,6251	-80,6	0,104	11,0
Schweinehaltung insgesamt	10,913	2,2357	10,919	11,404	<u>-79,5</u>	<u>0,052</u>	<u>4,49</u>
Rinder- & Schweinehaltung	56,849	26,169	56,938	61,954	<u>-54,0</u>	<u>0,155</u>	<u>8,98</u>

Im Szenario 2 (Vergärung von 50 % der VS-Ausscheidungen in strohbasierenden Systemen) ergäbe sich praktisch keine Emissionsminderung, da durch den Transfer von Festmist aus strohbasierenden Systemen (nicht Tiefstreu!) in die Vergärung dort jeweils in etwa die gleiche Menge an Methan zusätzlich freigesetzt würde, welche zuvor gegenüber einem güllebasierenden System vermieden wurde (Vergleiche Tab. 24, vorletzte Spalte sowie Abb. 5).

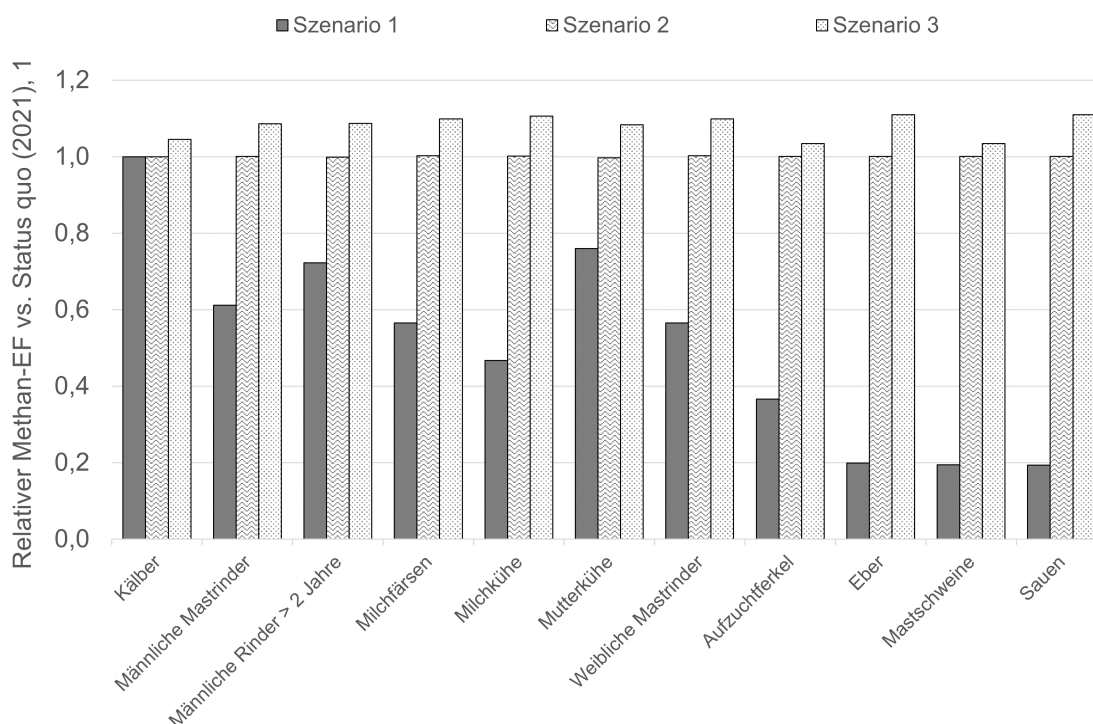


Abb. 5: Relative Methanemissionsfaktoren für die einzelnen Tierkategorien in den verschiedenen Szenarien gegenüber dem Status quo (Nachbildung NEI 2021).

Wie oben bereits aufgeführt, wurden in Bayern im Jahr 2021 (in Klammern: Werte für das Jahr 2020 und 2010) folgende Anteile an den VS-Ausscheidungen der Vergärung zugeführt: bei den Milchkühen 10,6 % (10,3 %; 7,3 %), bei den übrigen Rindern 8,3 % (8,0 %; 5,6 %) und bei den Schweinen insgesamt 12,4 % (11,6 %; 7,5 %). Für ein Szenario gänzlich ohne Wirtschaftsdüngervergärung (entspricht Szenario 3) wären die Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement in der Rinderhaltung um zehn Prozent und in der Schweinehaltung um viereinhalb Prozent höher (Vergleiche Tab. 24: letzte Spalte). Für die Summe der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement in der Rinder- und Schweinehaltung bewirkten die im Jahr 2021 erzielten Vergärungsquoten bei Anwendung auf Bayern eine Minderung um rund acht Prozent.

Aus dieser orientierenden Szenarioanalyse wird erkennbar, dass sich das größte Potenzial zur Vermeidung von Methanemissionen durch Wirtschaftsdüngervergärung für diejenigen Tiere ergibt, die aktuell in großer Zahl und weitaus überwiegend in güllebasierten Systemen gehalten werden (sofern eine durchgreifende Umstellung der Haltungssysteme ausgeschlossen wird). Dies betrifft die gesamte Schweinehaltung und in der Rinderhaltung vor allem die Milchkühe, die Milchfärsen sowie die männlichen Mastrinder: diese stehen für knapp 92 % des Minderungspotenzials in Szenario 1 (Vergleiche Abb. 6).

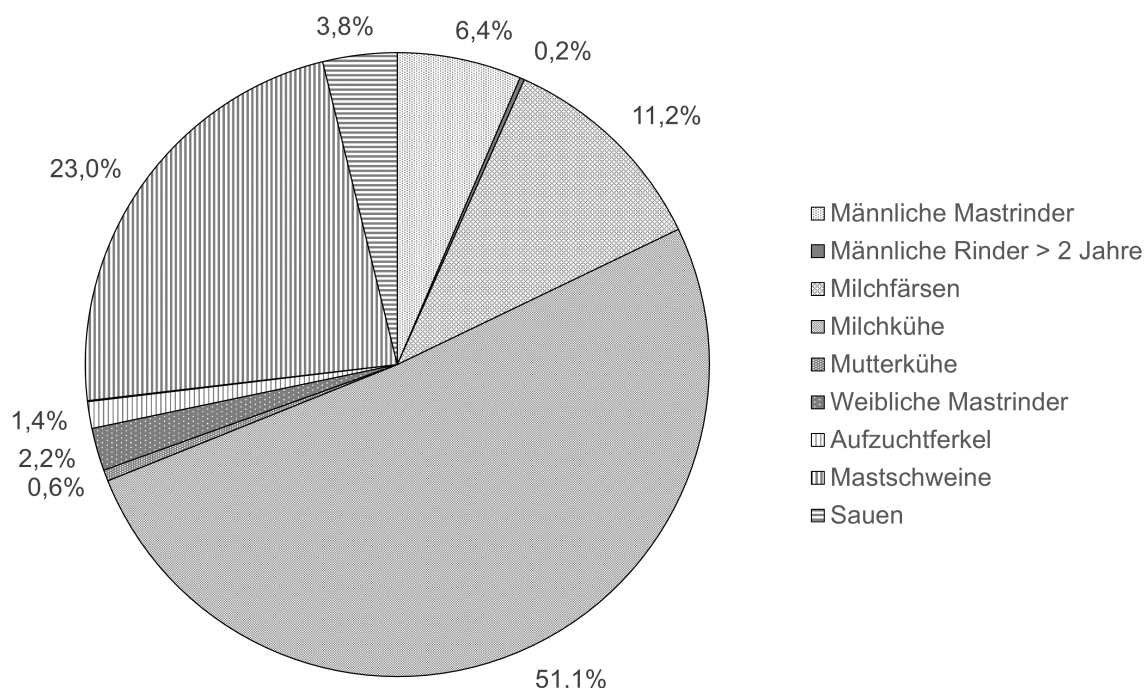


Abb. 6: Aufteilung des Potenzials zur Minderung der Methanemissionen gemäß Szenario 1 (Vergärung von 70 % der VS-Ausscheidungen in güllebasierten Systemen).

3.2 Abgleich der Tierplätze bzw. Tierzahlen

Um das Potenzial zur Minderung der Methanemissionen auf Ebene einzelner Betriebe der Tierhaltung in Bayern analysieren zu können, werden die Tierzahlen auf Betriebsebene aus dem IVKS verwendet, nachdem diese in die Tierkategorien gemäß NEI umgerechnet wurden (Siehe Abschnitte 2.3.1 bis 2.3.3). Tab. 25 zeigt zunächst den Vergleich der Rinder- und Schweinebestände in Bayern für das Jahr 2021 gemäß NEI, den Daten des Bayerischen Landesamtes für Statistik zur amtlichen Viehzählung (inkl. gewerbliche Tierhaltung) sowie IVKS (ohne gewerbliche Tierhaltung).

Tab. 25: Gegenüberstellung der Tierzahlen für die Rinder- und Schweinehaltung in Bayern gemäß NEI, amtlicher Viehzählung und IVKS für das Jahr 2021 (Quellen: [2], [22]).

	Rinder gesamt	Schweine gesamt
NEI, Mittelung der Viehzähl. im Mai und November 2021	2.885.723	2.308.560
BayLfStat, Viehzähl. im Mai 2021	2.912.351	2.898.700
IVKS, 2021	2.908.532	2.587.651

Den Vergleich der in die Kategorien des NEI umgerechneten Tierzahlen aus dem IVKS mit den Tierplätzen laut NEI für das Jahr 2021 zeigt Tab. 26. In der Rinderhaltung werden im IVKS insgesamt 22.431 Tiere oder rund 0,8 % mehr im Vergleich zum NEI angegeben. Für die einzelnen Tierkategorien ergeben sich zwischen IVKS und NEI variable und umrechnungsbedingt teilweise sehr große Abweichungen, von rund 55 % mehr bei den weiblichen

Mastrindern bis ca. acht Prozent weniger bei den Mutterkühen (Vergleiche Tab. 26, letzte Spalte).

Tab. 26: Vergleich der Zahlen von Rindern und Schweinen in Bayern für das Jahr 2021: wie im NEI verwendet (Tierplätze) bzw. wie aus dem IVKS in den Tierkategorien des NEI berechnet.

Tierkategorien nach NEI	NEI	IVKS	Differenz IVKS – Viehzählung	
			absolut	%
Kälber	284.002	295.485	11.483	4,0
Männliche Mastrinder	420.212	395.722	-24.490	-5,8
Männliche Rinder > 2 Jahre	16.266	17.925	1.659	10,2
Milchfärsen	874.661	852.821	-21.840	-2,5
Milchkühe	1.086.209	1.071.607	-14.602	-1,3
Mutterkühe	67.229	62.868	-4.543	-6,8
Weibliche Mastrinder	137.144	211.906	74.762	54,5
Rinderhaltung insgesamt	2.885.723	2.908.152	22.431	0,78
Aufzuchtferkel	481.725	719.518	237.793	49,4
Eber	4.000	-	-	-
Mastschweine	1.642.135	1.685.388	43.253	2,6
Sauen	180.700	182.745	2.045	1,1
Schweinehaltung insgesamt	2.308.560	2.587.651	283.091	12,3

In der Schweinehaltung wurden im IVKS (2021) insgesamt 283.091 Tiere oder 12,3 Prozent mehr als im NEI angegeben. Grund dafür ist der deutliche Rückgang des Schweinebestandes in der zweiten Jahreshälfte: während im Jahr 2021 bei der Viehzählung im Mai insgesamt 3,9 % weniger Tiere als ein Jahr zuvor gezählt wurden, waren es bei der Viehzählung im November 9,4 % weniger Tiere als im November des Vorjahres [22],[23]. Somit ergibt sich bei Verwendung der Tierzahlen aus IVKS für das Jahr 2021 eine deutliche Überschätzung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in der Schweinehaltung.

3.3 Neuberechnung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in Bayern für das Jahr 2021

Im nächsten Schritt wurden die Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in Bayern für das Jahr 2021 auf Basis der einzelbetrieblichen Tierzahlen gemäß IVKS berechnet. Hierzu wurden je Tierkategorie die umgerechneten Tierplätze mit den effektiven Emissionsfaktoren (EF) multipliziert, welche sich nach Formel {1} durch Division der emittierten Methanmenge gemäß Nachbildung des NEI mit der Anzahl der Tierplätze ergaben. Die sich hieraus ergebenden EF sind den originalen aus dem NEI zurückgerechneten Methan-Emissionsfaktoren in Tab. 27 gegenübergestellt.

Tab. 27: Effektive Methan-Emissionsfaktoren für das Wirtschaftsdüngermanagement im Jahr 2021 aus der Nachbildung des EI bzw. zurückgerechnet aus dem EI.

Tierkategorie	$EF_{(CH_4,MM),\text{ Nachbildung}}$	$EF_{(CH_4,MM),\text{ original}}$
Kälber	3,5339395	3,5008839
Männliche Mastrinder	12,096842	12,153935
Männliche Rinder > 2 Jahre	15,957250	16,492332
Milchfärsen	9,0306556	9,1060467
Milchkühe	27,052652	27,163313
Mutterkühe	11,068923	11,444577
Weibliche Mastrinder	11,387302	11,482367
Aufzuchtferkel	1,3939699	1,3954860
Eber	4,7164249	4,7247432
Mastschweine	5,3339479	5,3397489
Sauen	8,1017284	8,1160173

Abweichend von der orientierenden Szenarioanalyse in Abschnitt 3.1 wird das Ergebnis aus der Berechnung mit den Tierplätzen aus dem IVKS nun den originalen Daten gemäß NEI [2] gegenübergestellt: Tab. 28. Für die Rinderhaltung insgesamt ergeben sich auf Basis des IVKS Methanemissionen von 45,916 Gg, das sind gegenüber dem Wert von 46,184 Gg im NEI 2021 ca. 0,6 % weniger; für die Schweinehaltung wurden Methanemissionen in Höhe von 11,473 Gg berechnet, das sind gegenüber dem Wert von 10,926 Gg im NEI rund fünf Prozent mehr. In der Summe aus Rinder- und Schweinehaltung ergibt die gewählte Berechnungsmethode eine Mehremission von rund einem halben Prozent gegenüber dem NEI.

Tab. 28: Gegenüberstellung der auf Basis einzelbetrieblicher Daten zu den Tierbeständen berechneten Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement mit den originalen Werten gemäß Emissionsinventar für das Jahr 2021; Werte in kg / a, sofern nicht anders angegeben.

Tierkategorie	NEI	Berechnung mit IVKS und $EF_{(CH_4,MM), Nachbild.}$	Differenz Berechnung zu Emissionsinventar	
			absolut	%
Kälber	994.258,04	1.044.226,8	49.968,72	5,03
Männliche Mastrinder	5.107.229,3	4.786.981,1	-320.248,2	-6,27
Männliche Rinder > 2 Jahre	268.264,27	286.038,17	17.773,90	6,63
Milchfärsen	7.964.702,3	7.701.534,4	-263.167,9	-3,30
Milchkühe	29.505.035,4	28.989.821,3	-515.214,2	-1,75
Mutterkühe	769.407,46	693.870,91	-75.536,54	-9,82
Weibliche Mastrinder	1.574.739,8	2.413.038,2	838.298,4	53,2
Rinderhaltung insgesamt	46.183.636,6	45.915.510,8	-268.125,8	-0,581
Aufzuchtferkel	672.239,9	1.002.986,5	330.746,6	49,2
Eber	18.898,97	-	-	-
Mastschweine	8.768.588,6	8.989.770,9	221.182,3	2,52
Sauen	1.466.564,3	1.480.549,9	13.985,5	0,954
Schweinehaltung insgesamt	10.926.291,8	11.473.307,2	547.015,4	5,01
Rinder- & Schweinehaltung	57.109.928,4	57.388.818,0	278.889,6	0,488

3.4 Zuordnung von Tierhaltungen und Biogasanlagen

Ziel der vorliegenden Potenzialanalyse ist es, möglichst bis hinunter auf die Ebene der einzelnen Tierbestände bzw. landwirtschaftlichen Betriebe zu beschreiben, welche Mengen an Wirtschaftsdüngern einer Vergärung in Biogasanlagen zugeführt werden können und welche Minderung der Methanemissionen hierdurch erzielt werden kann. Da jedoch im IVKS keine Angaben zum Wirtschaftsdünger-Management enthalten sind, muss aus anderen Datenquellen erschlossen werden, welche Betriebe bereits eine Biogasanlage zur Vergärung des Wirtschaftsdüngers besitzen oder den Wirtschaftsdünger zur Biogasanlage eines anderen Betreibers liefern. Zu diesem Zweck wurde mittels zweier alternativer Adressindizes ausgewertet, welche Betriebsadressen im IVKS bzw. im Marktstammdatenregister⁴ (MaStR) [24] einander zugeordnet werden konnten. Im Ergebnis fanden sich 1.378 Betriebe mit Tierhaltung, denen eine Biogasanlage (mit Vor-Ort-Verstromung) zugeordnet werden konnte, davon 1.300 Betriebe mit Rinder- und/oder Schweinehaltung und Angaben zur Leistung und Inbetriebnahme der in Betrieb befindlichen BGA (Tab. 29).

⁴ Die Datenbasis bildete ein Auszug aus dem MaStR vom 13.06.2022 (17:08 Uhr), gefiltert nach Einheiten mit dem Schlagwort „Biogas“ im Feld „Hauptbrennstoff der Einheit“.

Tab. 29: Anzahl der Betriebe mit Rinder- und Schweinehaltung sowie der vermuteten Betriebe mit Biogasanlage nach Abgleich von IVKS und MaStR.

IVKS:	
Betriebe mit Rinderhaltung	43.385
Betriebe mit Rinderhaltung, GVE (2021) > 0	42.963
Betriebe ausschließlich mit Rindern	<u>36.876</u>
Betriebe mit Schweinehaltung	13.221
Betriebe mit Schweinehaltung, GVE (2021) > 0	10.375
Betriebe ausschließlich mit Schweinen	<u>6.712</u>
Betriebe mit Rinder- UND Schweinehaltung	<u>6.509</u>
Betriebe mit Rinder- UND Schweinehaltung, GVE (2021) > 0	4.554
Gesamtzahl der Betriebe	<u>50.097</u>
MaStR:	
Einheiten <u>in Betrieb</u> mit Hauptbrennstoff „Biogas (Vor Ort verstromt)“	5.645
Einheiten <u>in Betrieb</u> mit unterscheidbarer Adresse	2.429
IVKS x MaStR:	
Alle Betriebe mit vermuteter BGA in Betrieb (adressabgleich_alle)	<u>1.378</u>
Rinder-/Schweinehaltungsbetriebe mit vermuteter BGA (adressabgleich)	1.300
~ davon in Betrieb	<u>1.300</u>

Von den identifizierten Betrieben wurde für die weitere Analyse angenommen, dass die tierischen Exkrememente bereits (komplett) in der eigenen BGA verwertet werden, und diese wurden in der Gesamtliste der Betriebe entsprechend gekennzeichnet. Aus den Angaben in Tab. 29 lässt sich ableiten, dass von insgesamt 2.429 in Betrieb befindlichen Biogasanlagen in Bayern anhand der Adresse 1.300 BGA eindeutig einem Betrieb mit Rinder-/Schweinehaltung im IVKS zugeordnet werden konnten, was einem Anteil von rund 54 % entspricht.

Die Verteilung der BGA nach installierter elektrischer Nennleistung und unterschieden nach möglicher Zuordnung zu einem Tierhaltungsbetrieb zeigt Abb. 7. Die zuordenbaren BGA sind demnach im Bereich mittlerer elektrischer Leistung ($150 \text{ kW} < P_{el} \leq 450 \text{ kW}$) überrepräsentiert, im Leistungsbereich bis 150 kW hingegen deutlich unterrepräsentiert.

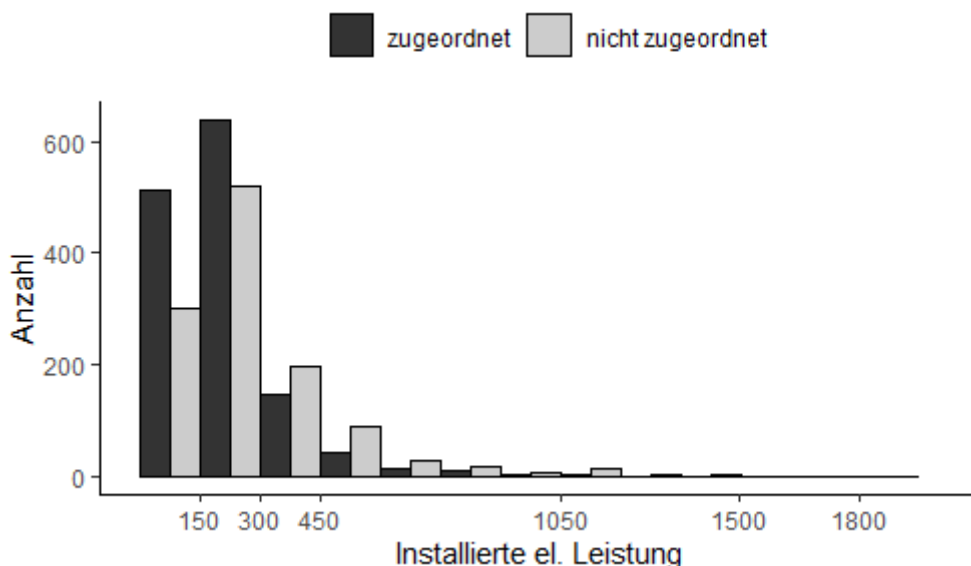


Abb. 7: Histogramm der Biogasanlagen mit Vor-Ort-Verstromung aus dem MaStR nach installierter elektrischer Leistung und klassifiziert nach Zuordnung zu einem Tierhaltungsbetrieb; nicht dargestellt sind sechs Anlagen mit $P_{el} > 2.000$ MW.

Die Verteilungen der Betriebe mit zugeordneter BGA vs. ohne BGA nach Bestandsgröße in Großvieheinheiten (GVE) sowie unterschieden nach Betriebsformen (Siehe Abschnitt 2.3.4) zeigt Abb. 8. Der Anteil der Betriebe, denen eine BGA zugeordnet werden konnte, an der Gesamtzahl der Betriebe beträgt nach der vorliegenden Auswertung in der Rinderhaltung 2,8 %, in der Schweinehaltung 1,9 % und bei den Verbundbetrieben 3,0 %. Rund 91 % der zuordenbaren BGA befinden sich auf Betrieben mit Rinderhaltung.

Von den 1.300 Tierhaltungsbetrieben, denen eine in Betrieb befindliche BGA zugeordnet werden konnte (Vergleiche Tab. 29), fallen 1.047 (das entspricht ca. 80 %) in eine Kategorie der Rinderhaltung und hiervon 826 (das entspricht knapp 79 %) in die Kategorie Milchviehhaltung. Der Anteil der Betriebe mit (zuordenbarer) BGA an der Gesamtzahl der Betriebe liegt für alle hier verwendeten Kategorien im Bereich weniger Prozentpunkte: am höchsten mit rund 3 % für die Rindermast- und Verbundbetriebe, am niedrigsten mit eineinhalb Prozent für die Zuchtsauenbetriebe (Tab. 30).

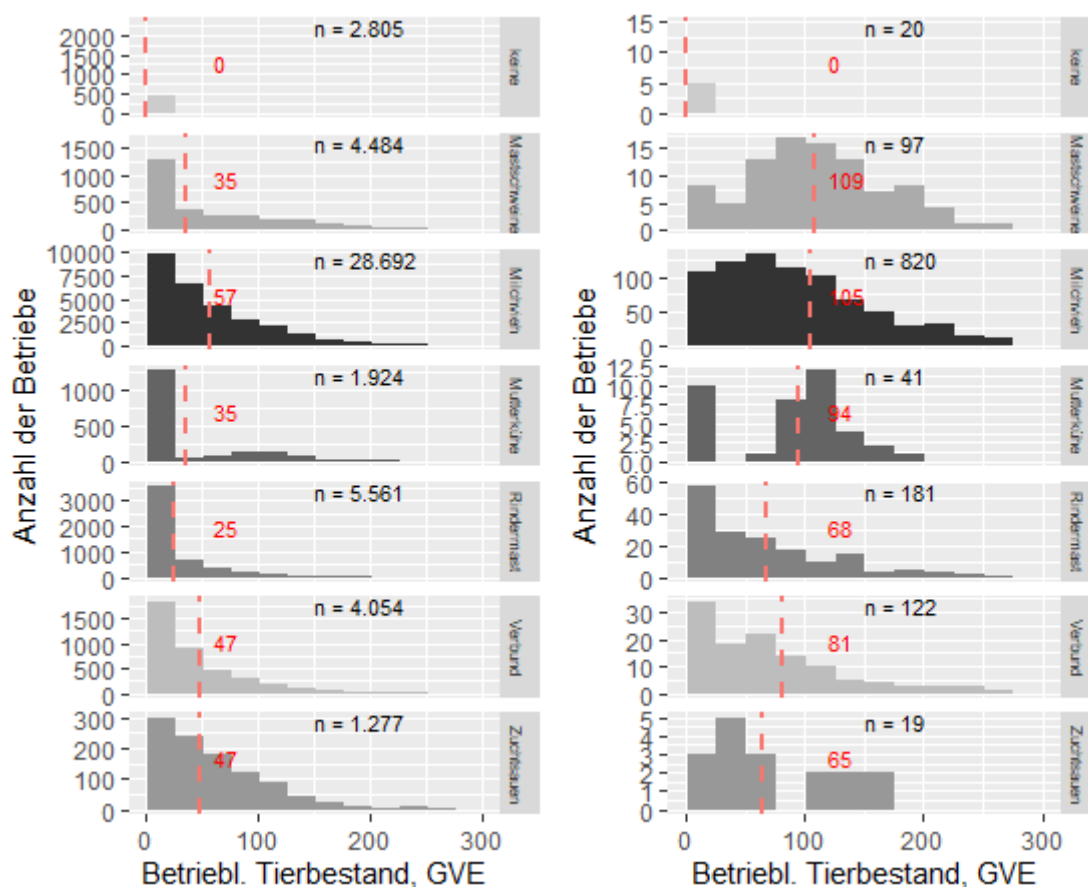


Abb. 8: Gegenüberstellung der Verteilung der Betriebe nach Bestandsgröße in GVE (Klassenbreite = 25), differenziert nach Betriebskategorie ohne BGA (links) vs. mit BGA (rechts); n: Anzahl der in die entsprechende Kategorie eingeordneten Betriebe; die (rot) gestrichelten senkrechten Linien markieren den angegebenen Mittelwert der betrieblichen Tierbestände in der jeweiligen Kategorie; nicht dargestellt sind 198 Betriebe mit einem Tierbestand > 300 GVE.

Tab. 30: Statistische Kennwerte der Tierbestände in GVE für die Betriebe unterschiedlicher Kategorien mit und ohne BGA (Vergleiche Abb. 8).

Betriebskategorie	Alle Betriebe ohne BGA		Alle Betriebe mit BGA		
	n	Mittelwert Tierbestand	n	Mittelwert Tierbestand	Anteilige Verteilung, %
Milchvieh	28.692	57	820	105	2,8
Mutterkühe	1.924	35	41	94	2,1
Rindermast	5.561	25	181	68	3,2
Zuchtsauen	1.277	47	19	65	1,5
Mastschweine	4.484	35	97	109	2,1
Verbund	4.054	47	122	81	2,9
keine Tiere mehr	2.805	0	20	0	0,71

Die Betriebe mit (zuordenbarer) BGA weisen im Mittel die deutlich größeren Tierbestände auf, besonders in der Mutterkuh- und der Mastschweinehaltung (Tab. 30). Als Wirtschaftlichkeitsschwelle für den Betrieb einer BGA mit überwiegendem Einsatz tierischer Wirtschaftsdünger wird häufig ein Tierbestand von rund 100 GVE genannt, in der vorliegenden Stichprobe liegt allerdings der Tierbestand bei der Mehrheit der Betriebe unter dieser Schwelle. Es muss also davon ausgegangen werden, dass diese Biogasbetriebe in erheblichem Umfang andere Einsatzstoffe und/oder Wirtschaftsdünger von anderen Betrieben verarbeiten.

Eine Korrelation des betrieblichen Tierbestandes und der elektrischen Nennleistung der BGA ist nicht erkennbar (Abb. 9, links) – auch nicht für das knappe Viertel der Biogasanlagen mit einer elektrischen Nennleistung bis zu 150 kW (Abb. 9, rechts). Für letztere Betriebe lassen sich allerdings zwei klare Schwerpunkte bei Anlagen mit 75 und mit 100 kW installierter elektrischer Leistung ausmachen.

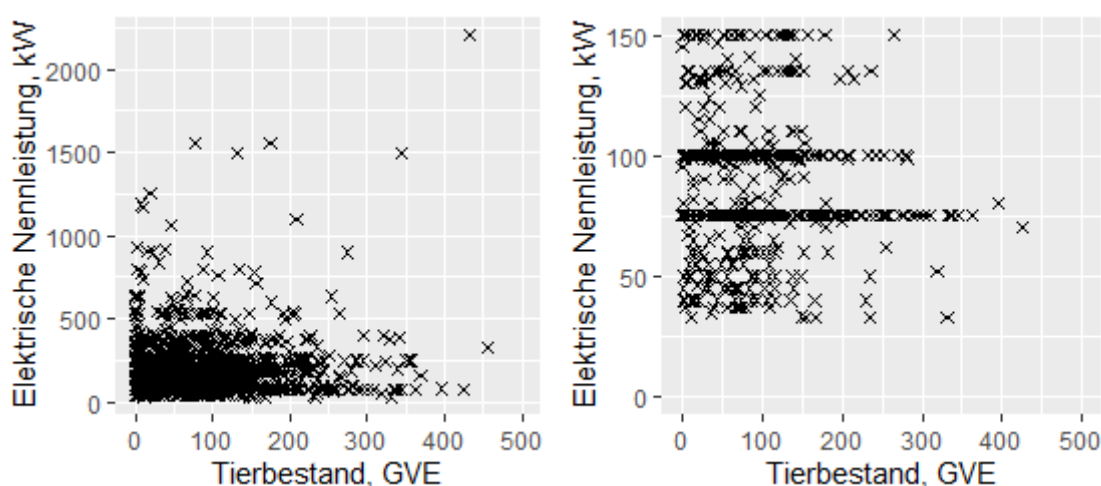


Abb. 9: Darstellung der elektrischen Nennleistung, P_{el} , der zugeordneten BGA über dem Tierbestand der Betriebe, links: alle BGA, rechts: BGA mit $P_{el} \leq 150$ kW; nicht dargestellt sind 29 BGA auf Betrieben mit mehr als 500 GVE.

Im Zuge der mehrfachen Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) wurden auch die Vergütungsregelungen für die Stromerzeugung aus Biogas, das durch Vergärung von Gülle erzeugt wird, wiederholt angepasst. Die für die vorliegende Betrachtung besonders relevante Sonderversgütungsklasse für „Güllekleinanlagen“ mit einem Gülleanteil von mindestens 80 Masse-% im Jahresdurchschnitt wurde mit dem EEG 2012 eingeführt und blieb im Grundsatz in den EEG-Novellen 2014, 2017, 2021 und 2023 erhalten. Für Anlagen, welche unter dem EEG 2021 die Sonderversgütung für Strom aus der „Vergärung von Gülle“ realisieren wollten, waren zwei weitere Leistungsschwellen maßgeblich: (1) Die Sonderversgütung war beschränkt auf Anlagen mit einer installierten elektrischen Nennleistung bis maximal 150 kW; (2) ab einer P_{el} von 100 kW erfolgte die Berechnung der Einspeisevergütung auf Basis der sogenannten Höchstbemessungsleistung, die höchstens der Hälfte der installierten elektrischen Nennleistung entspricht, und eine Direktvermarktung des erzeugten Stroms ist vorgeschrieben. Diese gesetzlich verpflichtende „doppelte Überbauung“ wurde mit dem zusätzlichen Anspruch auf einen Flexibilitätszuschlag in Höhe von 65 €/kW abgegolten.

Um zu ermitteln, welche BGA im MaStR tatsächlich als Güllekleinanlage (GKA) eingestuft sind bzw. einen Bonus für die Vergärung von Gülle erhalten, wurden zusätzlich die Daten der Übertragungsnetzbetreiber zur EEG-Jahresabrechnung, zu den Anlagenstammdaten und

zu den EEG-Vergütungskategorien für das Jahr 2021 ausgewertet [25] und in Abb. 10 dargestellt.

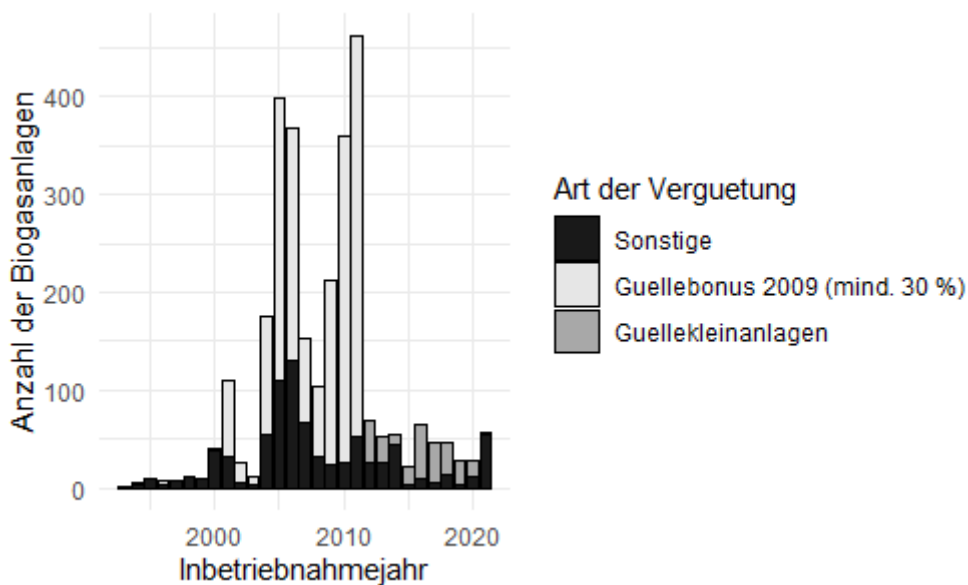


Abb. 10: Histogramm der in den Jahren 1993 bis 2021 in Bayern in Betrieb genommenen BGA, gruppiert nach der Inanspruchnahme einer Vergütungsregelung für die Vergärung von Gülle.

Entsprechend der in Tab. 31 gezeigten Auswertung realisierte rund ein Viertel aller in Betrieb befindlichen BGA in Bayern mit $P_{el} < 150$ kW im Jahr 2021 keine spezielle Vergütung für die Vergärung von Gülle, während bei den zuordenbaren Biogasbetrieben derselben Leistungsklasse dieser Anteil knapp 18 % betrug. Bei den einem Betrieb zuordenbaren BGA sind Anlagen, die den Güllebonus realisierten, deutlich überrepräsentiert und Güllekleinanlagen leicht unterrepräsentiert.

Tab. 31: Aufteilung der BGA nach in Anspruch genommenen Vergütungsregelungen für die Vergärung von Gülle: Anlagen mit $P_{el} > 150$ kW bzw. bis 150 kW sowie zugeordnete Anlagen mit P_{el} bis 150 kW.

Vergütungsregelung für Güllevergärung	Alle BGA mit $P_{el} > 150$ kW	Alle BGA bis $P_{el} = 150$ kW	Aufteilung, %	Zugeordnete BGA bis $P_{el} = 150$ kW	Aufteilung, %
keine	477	192	25,1	90	17,7
Güllekleinanlage	-	190	24,8	124	24,4
Bonus nach EEG 2009	1.187	383	50,1	294	57,9
Gesamtanzahl	1.664	765		508	

3.5 Potenzialanalyse zur Minderung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement in Bayern

Um bei der Berechnung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement die Vergärung auf einzelbetrieblicher Ebene berücksichtigen zu können, wurden mittels der Nachbildung des NEI die Methan-EF für die beiden Fälle „ohne BGA“ und „mit BGA“ berechnet (Tab. 32). Der Fall „ohne BGA“ entspricht hierbei dem Szenario 3 in Abschnitt 3.1. Für den Fall „mit BGA“ wurde für alle Tierkategorien der Parameter „VS-Ausscheidungen, Wirtschaftsdüngervergärung, in % der Gesamt-VS-Ausscheidungen“ gleich 100 gesetzt; alle übrigen Parameter wurden unverändert aus dem EI für Bayern übernommen, da hierzu keine Informationen auf einzelbetrieblicher Ebene verfügbar sind.

Tab. 32: *Verwendete Methan-EF nach Tierkategorien, kg / (pl a), für die Berechnung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement ohne und mit BGA auf einzelbetrieblicher Basis.*

Tierkategorie	ohne BGA	mit BGA
Kälber	3,6937770	0,2935192
Männliche Mastrinder	13,141999	2,1937930
Männliche Rinder > 2 Jahre	17,346839	4,2972094
Milchfärsen	9,9215631	1,9360449
Milchkühe	29,917819	6,0296621
Mutterkühe	11,992914	2,8601672
Weibliche Mastrinder	12,510702	2,4412767
Aufzuchtferkel	1,4423298	0,2472872
Mastschweine	5,5189942	0,9462305
Sauen	8,9935248	1,4929918

3.5.1 Berechnung der Methanemissionen auf einzelbetrieblicher Basis

In Tab. 33 sind die verwendeten EF je Tierkategorie für die Berechnung der Methanemissionen auf einzelbetrieblicher Basis dem Status quo laut NEI 2021 gegenübergestellt. Zusätzlich ist in der Spalte ganz rechts angegeben, wie sich der Methan-EF gegenüber dem Status quo prozentual verändert, wenn die Wirtschaftsdünger vergoren werden.

Tab. 33: Relative Methan-EF für das Wirtschaftsdüngermanagement nach Tierkategorien, kg / (pl a), für den einzelbetrieblichen Fall ohne bzw. mit Vergärung ceteris paribus im Verhältnis zum Status quo = NEI 2021.

Tierkategorie	ohne Vergärung	mit Vergärung	mit vs. ohne Vergärung, %
Kälber	1,045	0,083	-92,1
Männliche Mastrinder	1,086	0,181	-83,3
Männliche Rinder > 2 Jahre	1,087	0,269	-75,2
Milchfärsen	1,099	0,214	-80,5
Milchkühe	1,106	0,223	-79,8
Mutterkühe	1,083	0,258	-76,2
Weibliche Mastrinder	1,099	0,214	-80,5
Aufzuchtferkel	1,035	0,177	-82,9
Eber	1,110	0,184	-83,4
Mastschweine	1,035	0,177	-82,9
Sauen	1,110	0,184	-83,4

Tab. 34 zeigt den Vergleich der berechneten Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement, wenn die Informationen zur Wirtschaftsdüngervergärung auf Betriebsebene berücksichtigt werden, mit den Werten entsprechend der Nachbildung des EI, wo die entsprechenden Informationen im Durchschnitt für Bayern einfließen. Mit der einzelbetrieblichen Berücksichtigung der Wirtschaftsdüngervergärung berechnen sich in der Rinderhaltung um 5,4 % höhere und in der Schweinehaltung um rund ein halbes Prozent geringere Methanemissionen, in der Summe für die Rinder- und Schweinehaltung ergibt sich somit eine positive Abweichung um 4,2 %. Diese Überschätzung der Methanemissionen lässt sich damit erklären, dass nur etwas weniger als die Hälfte der in Bayern registrierten BGA einem Tierhaltungsbetrieb zugeordnet werden konnten (Siehe Abschnitt 3.4).

Tab. 34: Vergleich der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement in Bayern für das Jahr 2021, berechnet auf dem Wege der einzelbetrieblichen Berücksichtigung der Vergärung („Basis“) vs. mit durchschnittlichen Werten gemäß NEI; Werte in kg / a, sofern nicht anders spezifiziert.

Tierkategorie	Berücksichtigung der Vergärung im Durchschnitt für Bayern	Einzelbetriebliche Berücksichtigung der Vergärung („Basis“)	Differenz	
			absolut	%
Kälber	1.044.226,8	1.033.067,6	-11.159,1	-1,07
Männliche Mastrinder	4.786.981,1	4.861.674,6	74.693,5	1,56
Männl. Rinder > 2 Jahre	286.038,17	301.435,33	15.397,2	5,38
Milchfärsen	7.701.534,4	8.110.216,0	408.681,6	5,31
Milchkühe	28.989.821	30.791.712	1.801.891,1	6,22
Mutterkühe	693.870,91	726.973,84	33.102,9	4,77
Weibliche Mastrinder	2.413.038,2	2.553.049,0	140.010,7	5,80
Rinderhaltung	45.915.510,8	48.378.128,7	2.462.617,9	5,36
Aufzuchtferkel	1.002.986,5	1.008.969,9	5.983,4	0,60
Mastschweine	8.989.770,9	8.805.649,1	-184.121,7	-2,05
Sauen	1.480.549,9	1.603.806,2	123.256,3	8,33
Schweinehaltung	11.473.307,2	11.418.425,2	-54.882,0	-0,48
Insgesamt	57.388.818,0	59.796.554,0	2.407.735,9	4,20

3.5.2 Methanminderungspotenzial in Abhängigkeit von den Bestandszahlen

Der weitaus überwiegende Anteil der Methanemissionen entsteht in den Betrieben mittlerer Bestandsgrößen, d. h. mit einem Tierbestand von 50 bis unter 200 GVE (Vergleiche Abb. 11): Die kumulierten Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement auf den einzelnen Betrieben dieser Größenklassen betragen 40,451 Gg Methan, was knapp 68 % der gesamten Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement entspricht. In diesen Bereich der Bestandszahlen fällt auch die Mehrheit der Betriebe mit BGA (Vergleiche Abb. 8), obgleich nur ein Bruchteil der Tierhaltungsbetriebe eine solche betreibt.

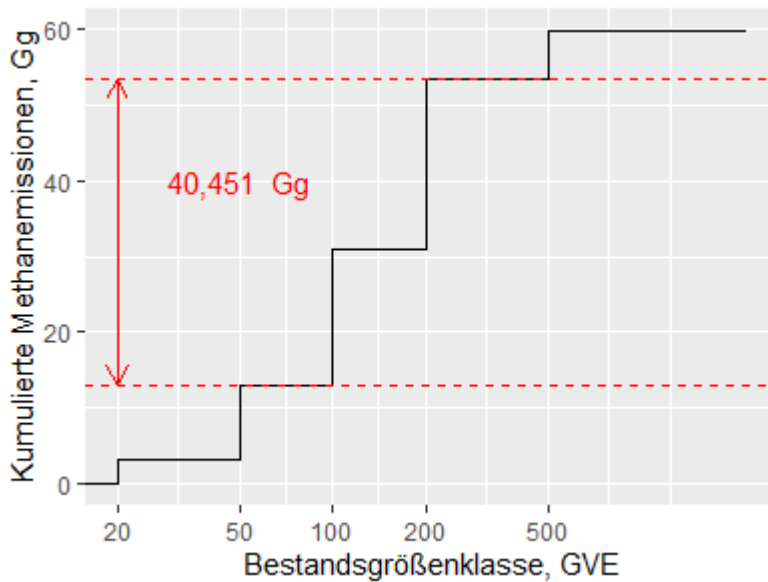


Abb. 11: Aufteilung der kumulierten Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement in der Rinder- und Schweinehaltung in Bayern („Basis“) nach Bestandsgrößenklassen in GVE.

In einer einfachen summarischen Betrachtung, d. h. ohne weitere Differenzierung der Betriebe nach den gehaltenen Tierarten und -kategorien, wurde zunächst berechnet, welche Mengen an Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement gegenüber dem Basisfall vermieden werden könnten, wenn auf allen Betrieben einer bestimmten Bestandsklasse die Wirtschaftsdünger vollständig einer Vergärung zugeführt würden. Entsprechend ergeben sich die größten Potenziale zur Minderung der jährlichen Methanemissionen für die Betriebe mit Tierbeständen in den Klassen 100 bis unter 200 GVE mit 17,895 Gg (knapp 30 % gegenüber dem Basiswert für das Jahr 2021; vergleiche Abb. 12: Szenario „gve_100_200_baut_bga“), 50 bis unter 100 GVE mit 14,534 Gg (rund 24 %) und 20 bis unter 50 GVE mit 7,799 Gg (rund 13 %).

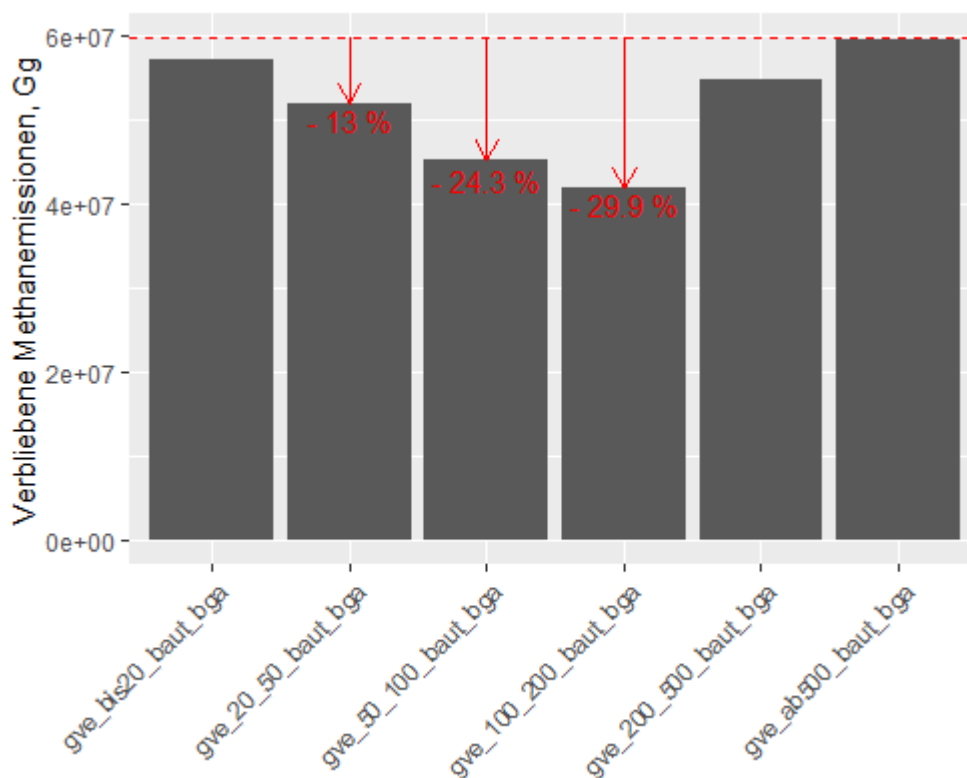


Abb. 12: Verbliebene Methanemissionen und prozentuale Vermeidung gegenüber dem Basiswert für das Jahr 2021 für Szenarien der Vergärung der Wirtschaftsdünger aller Betriebe der Rinder- und Schweinehaltung in einer bestimmten Bestandsklasse.

Demnach könnte von den 40,451 Gg Methan aus den betrachteten Betrieben mit einem Tierbestand von 50 bis unter 200 GVE ein Methanfluss von jährlich 32,429 Gg vermieden werden, wenn alle Wirtschaftsdünger einer Vergärung zugeführt würden. Dies entspricht einer Vermeidungsrate von 80,2 %.

3.5.3 Szenario für eine möglichst effektive Umsetzung der betrieblichen Wirtschaftsdüngervergärung

Für die Betriebe mit einem Tierbestand von mindestens 50 GVE wurde ein Szenario gesucht, wie mit der Errichtung einer möglichst geringen Anzahl betrieblicher BGA die größtmögliche Menge an Methan vermieden werden kann. In Betrieben mit solchen Bestandsgrößen sind BGA immerhin deutlich häufiger, wobei in der Rinder- bzw. Schweinemast die größte Verbreitung von BGA festzustellen ist (Vergleiche Tab. 30 und Tab. 35 letzte Spalte).

Tab. 35: Verbreitung von BGA unter den Tierhaltungsbetrieben verschiedener Kategorien mit einem Tierbestand von mindestens 50 GVE.

Betriebskategorie	Betriebe mit mind. 50 GVE ohne BGA		Betriebe mit mindestens 50 GVE mit BGA		
	n	Medianwert Tierbestand	n	Medianwert Tierbestand	Anteilige Verbreitung von BGA, %
Milchvieh	12.256	89	594	109	4,6
Mutterkühe	519	107	30	115	5,5
Rindermast	886	84	88	100	9,0
Zuchtsauen	500	86	9	121	1,8
Mastschweine	1.158	107	82	118	6,6
Verbund	1.318	88	70	94	5,0
Summe	16.637	-	873	-	5,2

Das Szenario, bezeichnet mit „Effekt“, wurde wie folgt berechnet:

1. Berechnung der auf den einzelnen Betrieben vermiedenen Methanmenge $\Delta m_b(CH_4)$, wenn jeweils der Wirtschaftsdünger des gesamten Tierbestandes $x_b(GVE)$ einer Vergärung zugeführt wird;
2. Berechnung der je GVE vermiedenen Methanmenge für die einzelnen Betriebe: $\delta m(CH_4) = \Delta m_b(CH_4) / x_b(GVE)$;
3. Absteigende Sortierung der Betriebe zunächst nach $\Delta m_b(CH_4)$, dann nach $\delta m(CH_4)$;
4. Berechnung der kumulierten vermiedenen Methanmenge nach schrittweiser Errichtung von betrieblichen BGA entsprechend der Sortierung nach 3.

Den aus dem Szenario „Effekt“ resultierenden stufenförmigen Verlauf der verbliebenen kumulierten Methanemissionen zeigt die rote (untere) Linie in Abb. 13. In der im Abschnitt 1.2 erwähnten Szenarioanalyse zur Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms der Deutschen Bundesregierung werden bei einer angenommenen Vergärungsquote von 40 % die CO₂-Äq-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management im Jahr 2030 auf 7,5 Tg geschätzt. Das entspräche bei einer angenommenen Aufteilung zu 70 % auf Methan und zu 30 % auf Lachgas einer Methanmenge von 187,5 Gg bei Umrechnung mit GWP100(Methan) = 28.

Der Anteil Bayerns am gesamten landwirtschaftlichen Emissionsinventar betrug im Jahr 2020 rund 23,5 % (bei den Methanemissionen mit 25 % etwas höher). Gemäß einer einfachen Proportionalrechnung ergäbe dies eine Methanmenge aus dem Wirtschaftsdünger-Management in der bayerischen Landwirtschaft von ca. 44,1 Gg im Jahr 2030. Um diesen Menge zu unterschreiten, müssten mindestens die Wirtschaftsdünger von 3.705 Betrieben mit einem Tierbestand von 50 GVE oder mehr einer Vergärung zugeführt werden (Vergleiche Abb. 13: senkrechte rot gestrichelte Linie), das entspricht rund 22 % der

Tierhaltungsbetriebe in diesen Bestandsklassen (ohne zuordenbare Biogasanlage). Zum Vergleich wurde in Abb. 13 der Verlauf der verbliebenen kumulierten Methanemissionen für zwei weitere Szenarien dargestellt: die blaue (mittlere) Linie ergibt sich für das Szenario „GVE“, in welchem die Betriebe lediglich absteigend nach Bestandsgröße sortiert werden; die grüne (obere) Linie resultiert aus dem Szenario „GKA“, in welchem die Betriebe aufsteigend nach Bestandsgröße (d. h. beginnend in der Bestandsklasse 50 bis unter 100 GVE) und absteigend nach $\delta m(CH_4)$ sortiert werden. Während im Szenario „GVE“ die Wirtschaftsdünger von lediglich rund 350 Betrieben mehr als im Szenario „Effekt“ für die Vergärung erschlossen werden müssten, um die gleiche Menge an Methanemissionen zu vermeiden, ergäbe sich im Szenario „GKA“ rund die 2,7-fache Anzahl an Betrieben.

Von den im Szenario „Effekt“ identifizierten Betrieben, deren Wirtschaftsdünger prioritär einer Vergärung zugeführt werden sollten, wurden 2.087 Betriebe der Kategorie „Milchvieh“ zugeordnet (Tab. 36), deren Tierbestand in GVE knapp 63 % des kumulierten Bestandes der ausgewählten Betriebe umfasst.

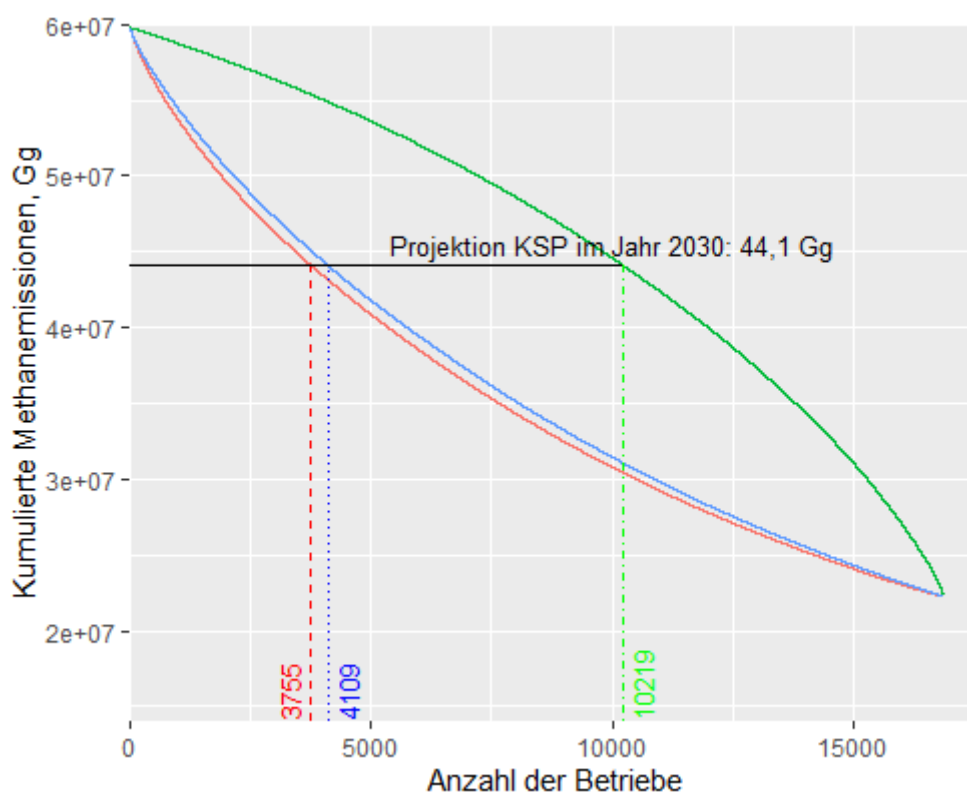


Abb. 13: Abnahme der verbliebenen jährlichen Methanemission aus dem Wirtschaftsdüngermanagement für das Szenario „Effekt“ und zwei alternative Szenarien (siehe Text), wenn schrittweise die Wirtschaftsdünger einzelner Betriebe der Vergärung zugeführt werden; hervorgehoben wurde die Projektion für die in Bayern emittierte Methanmenge im Jahr 2030 bei Umsetzung des KSP; aus der Analyse ausgeschlossen wurden 32.423 Betriebe mit einem Tierbestand von < 50 GVE.

Tab. 36: Charakterisierung der betrieblichen Tierbestände im Szenario „Effekt“ für eine möglichst effektive Verringerung der Methanemissionen durch Wirtschaftsdüngervergärung.

Betriebskategorie	Anzahl Betriebe in Kategorie	Gesamter Tierbestand in GVE	Median der betrieblichen Tierbestände in GVE
Milchvieh	2.087	408.297	175
Mutterkühe	8	2.203	269
Rindermast	129	27.180	189
Zuchtsauen	290	35.303	112
Mastschweine	896	120.931	126
Verbund	345	59.257	162
Summe	3.755	653.170	-

Knapp 52 % des jährlich vermiedenen Methanflusses von 15,697 Gg werden auf Betrieben der Kategorie Milchvieh verursacht, an zweiter Stelle folgt die Kategorie Mastschweine mit einem Anteil von rund 28 % und an dritter Stelle die Kategorie der Verbundbetriebe mit rund neun Prozent (Tab. 37). Gegenüber der auf Tierplätze bezogenen Betrachtung gemäß Emissionsinventar ergeben sich in der vorliegenden Auswertung je Großvieheinheit (GVE) für die Schweinehaltung deutlich höhere Werte der spezifischen Methanvermeidung als für die Rinderhaltung (Tab. 37: letzte Spalte).

Tab. 37: Kennwerte zur betrieblichen Vermeidung von Methanemissionen durch Wirtschaftsdüngervergärung für die ausgewählten Tierbestände im Szenario „Effekt“.

Betriebskategorie	Gesamte vermiedene Methanemissionen, Gg / a	Anteil an den vermiedenen Methanemissionen, %	Mittlere betrieblich vermiedene Methanmenge, t / a	Mittlere vermiedene Methanmenge je GVE, kg / a
Milchvieh	8,113	51,7	3.888	19,9
Mutterkühe	0,025	0,2	3.103	11,3
Rindermast	0,489	3,1	3.794	18,1
Zuchtsauen	1,241	7,9	4.278	35,4
Mastschweine	4,405	28,1	4.916	36,7
Verbund	1,424	9,1	4.128	26,2
Summe	15,697	100	-	-

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit war zu untersuchen, in welchem Umfang die Methanemissionen aus der Tierhaltung in Bayern durch Vergärung der anfallenden Wirtschaftsdünger verringert werden könnten. Hierbei sollte das technische Potenzial zur Methanminderung möglichst auf Ebene der einzelnen landwirtschaftlichen Betriebe berechnet werden, um die Grundlage für eine realistische Analyse des ökonomischen Potenzials zu schaffen.

Als Basis hierfür diente das Nationale Emissionsinventar (NEI) für das Berichtsjahr 2021. Dieses weist für die Landwirtschaft eine Methanemission in Höhe von 34.715 Gg CO₂-Äq aus, das entspricht 1.240 Gg Methan (GWP100 = 28). Die im Jahr 2021 insgesamt emittierte Methanmenge (ohne LULUCF) betrug 1.632 Gg. Somit verursachte die Landwirtschaft rund 76 % der Methanemissionen in Deutschland, davon rund ein Viertel in Bayern (Vergleiche Abb. 14).

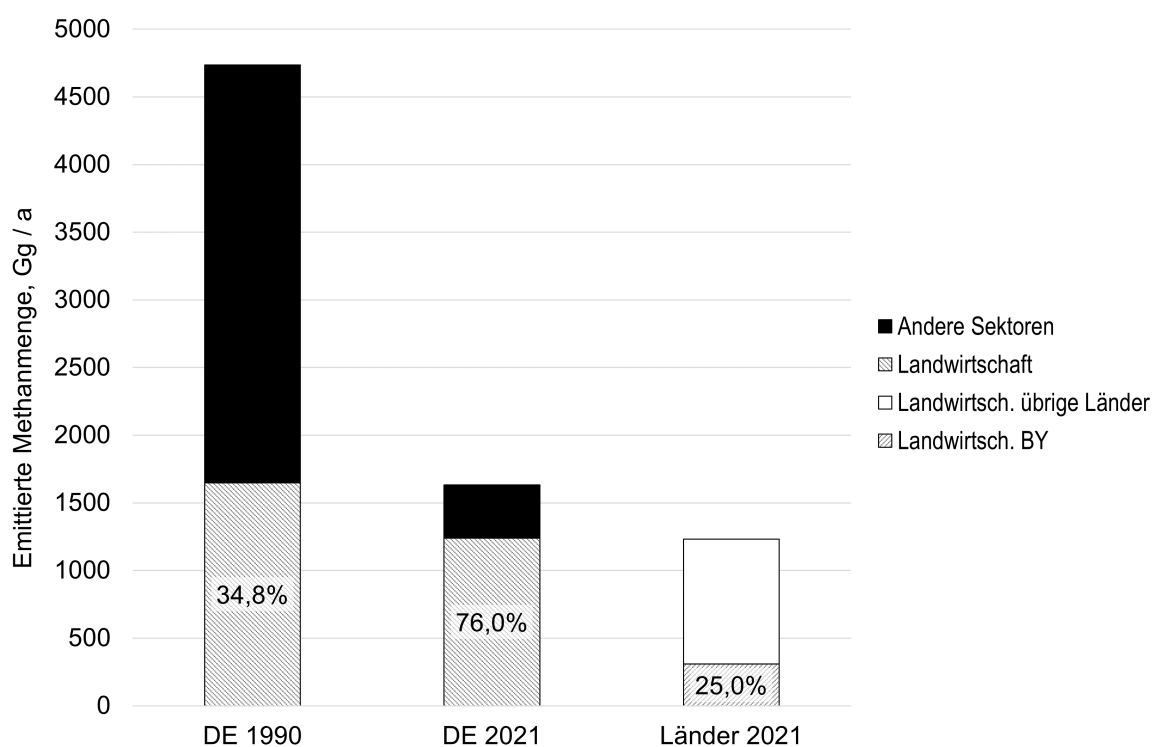


Abb. 14: Emissionen von Methan insgesamt im Jahr 1990 vs. 2021 mit Angabe des Anteils der Landwirtschaft bzw. (rechte Säule) Aufteilung der landwirtschaftlichen Emissionen im Jahr 2021 auf die Bundesländer mit Angabe des Anteils von Bayern (eigene Darstellung nach [1],[2]).

Rund ein Fünftel der gesamten landwirtschaftlichen Methanemissionen entstammten den Wirtschaftsdüngern der Nutztiere, das waren im Jahr 2021 in Gesamtdeutschland 245,844 Gg bzw. in Bayern 57,920 Gg. Hierbei war die Haltung von Rindern und Schweinen in Bayern für die Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management so dominant, dass die weiteren Berechnungen auf diese Tierarten beschränkt wurden: die entsprechende Methanmenge laut NEI für das Jahr 2021 beträgt 57,110 Gg und bildet den Ausgangswert (*Status quo*) für die vorliegende Potenzialanalyse.

Für die Zwecke der Potenzialanalyse, speziell die Ermittlung der zu verwendenden Methan-Emissionsfaktoren (EF), wurde die entsprechende Methodik des NEI in vereinfachter Form als Tabellenkalkulation nachgebildet. Um den Effekt der Vergärung von Wirtschaftsdüngern auf die Methanemissionen zu demonstrieren, wurden vorab mittels dieser Tabellenkalkulation die folgenden drei Szenarien analysiert:

- **Szenario 1:**
Erfassung von 70 % der VS-Ausscheidungen in güllebasierten Systemen für die Wirtschaftsdüngervergärung bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen;
- **Szenario 2:**
Erfassung von 50 % der VS-Ausscheidungen in strohbasierten Systemen für die Wirtschaftsdüngervergärung bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen;
- **Szenario 3:**
Keinerlei Wirtschaftsdüngervergärung.

Für das Szenario 1 ergibt sich gegenüber dem *Status quo* eine Minderung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement um rund 54 % (Vergleiche Abb. 15: zweite Säule von links), wobei diese in der Schweinehaltung, wo güllebasierte Systeme stark dominieren, deutlich höher ausfällt als in der Rinderhaltung. Im Szenario 2 ergibt sich keine signifikante Emissionsminderung, da durch den Transfer von Festmist aus strohbasierten Systemen (nicht Tiefstreu!) in die Vergärung dort jeweils in etwa die gleiche Menge an Methan zusätzlich freigesetzt würde, welche zuvor gegenüber einem güllebasierten System vermieden wurde.

Aus dem Ergebnis für Szenario 3 geht hervor, dass die im Jahr 2021 erzielten Vergärungsquoten laut NEI eine Minderung der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement in Bayern um ca. 5,1 Gg oder rund acht Prozent bewirkten (Abb. 15: Säule ganz rechts). Dies entspricht einer Verringerung der gesamten Methanemissionen aus der Rinder- und Schweinehaltung in Bayern um rund zwei Prozent.

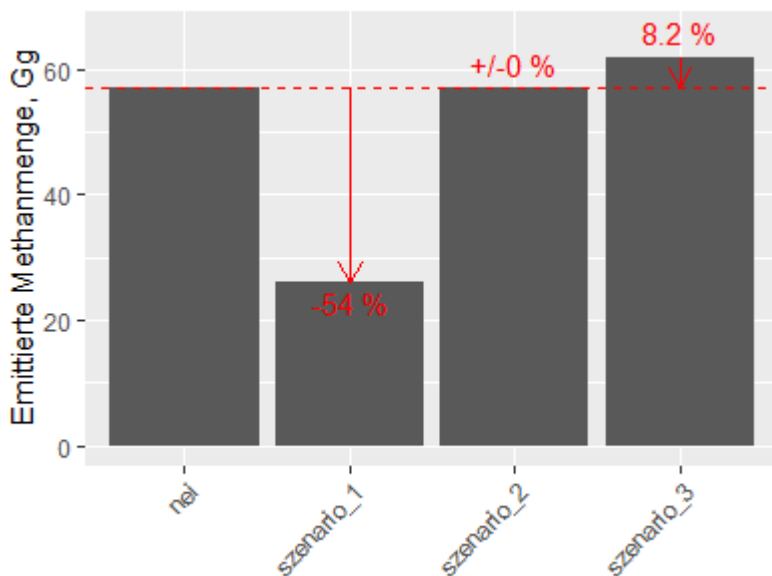


Abb. 15: Gesamte emittierte Methanmenge aus dem Wirtschaftsdünger-Management von Rindern und Schweinen in Bayern im Jahr 2021: Status quo entsprechend NEI vs. Ergebnisse der orientierenden Szenarioanalyse zum Effekt der Vergärung (zur Erläuterung der Szenarien siehe Text).

Im NEI werden die Tierbestände aus der amtlichen Viehzählung und deren emissionsrelevante Parameter prinzipiell auf Kreisebene ausgewertet und anschließend auf Ebene der Bundesländer aggregiert. Die hierbei verwendete Einteilung in Tierkategorien orientiert sich am Emissionsverhalten und weicht von den in der amtlichen Viehstatistik üblichen Nutzungskategorien ab. Daten zu einzelbetrieblichen Tierbeständen werden im Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem (IVKS) erfasst, welches wiederum abweichende Nutzungskategorien verwendet. Das IVKS ist generell nicht öffentlich zugänglich, für die Zwecke der vorliegenden Potenzialanalyse stand den Autoren jedoch ein Datenbankauszug aus dem Jahr 2022 zur Verfügung.

Um für die Potenzialanalyse Zahlen zum einzelbetrieblichen Tierbestand verwenden zu können, wurden zunächst die Tierzahlen nach den Nutzungskategorien im IVKS in Tierplätze nach den Tierkategorien gemäß NEI umgerechnet. Anschließend wurden die Tierplätze für ganz Bayern je Tierkategorie aufsummiert und mit den effektiven Methan-EF, welche die durchschnittlichen Vergärungsquoten abbilden, multipliziert, um die Methan-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management für das Jahr 2021 zu berechnen: es ergibt sich eine gesamte emittierte Methan-Menge von 57,389 Gg. Die Abweichung gegenüber dem Referenzwert 57,110 Gg gemäß NEI (Vergleiche Tab. 18 bzw. Abb. 16, Datenpunkt „nei“) beträgt knapp ein halbes Prozent und ist damit im Vergleich zur prinzipiellen Unsicherheit des Emissionsinventars vernachlässigbar.

Im nächsten Schritt wurden die Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management kumulativ aus der Betrachtung der einzelnen Betriebe berechnet, indem die zwei Fälle „vollständige Vergärung“ und „keine Vergärung“ der betrieblichen Wirtschaftsdünger unterschieden wurden. Die spezifischen Methan-EF für diese beiden Fälle wurden aus der Nachbildung des NEI ermittelt, wobei für die Verteilung der Haltungssysteme wiederum Durchschnittswerte angenommen werden musste, da diesbezügliche Informationen auf einzelbetrieblicher Ebene nicht zur Verfügung stehen. Außerdem wurde für den Anteil offener Gärrestlager der durchschnittliche Wert für Deutschland gemäß NEI angesetzt. Hieraus ergibt sich für die einzelnen Tierkategorien eine Minderung des jeweiligen Methan-EF bei Anwendung der Vergärung um 75 % (männliche Rinder > 2 Jahre) bis 92 % (Kälber).

Um die einzelnen Betriebe den beiden Fällen mit bzw. ohne Vergärung zuzuordnen, wurden die Adressdaten aus dem IVKS und dem Marktstammdatenregister (MaStR) miteinander verschnitten. In dem verwendeten Auszug aus dem MaStR vom Juni 2022 konnten anhand der Adresse 2.429 Einheiten mit „Hauptbrennstoff Biogas“ und „Vor-Ort-Verstromung“ unterschieden werden. Von diesen konnten mittels der Adressdaten 1.300 Einheiten, das sind rund 54 % der BGA, eindeutig einem der insgesamt 50.097 Rinder-/Schweinehaltungsbetrieb im IVKS zugeordnet werden. Entsprechend ergibt sich auf diesem Rechenweg ein Basiswert der emittierten Methan-Menge für die anschließende Potenzialanalyse, der um 2,408 Gg oder 4,2 % über dem Referenzwert liegt (Vergleiche Abb. 16: Datenpunkt „einzelbetriebe“ vs. „nei“).

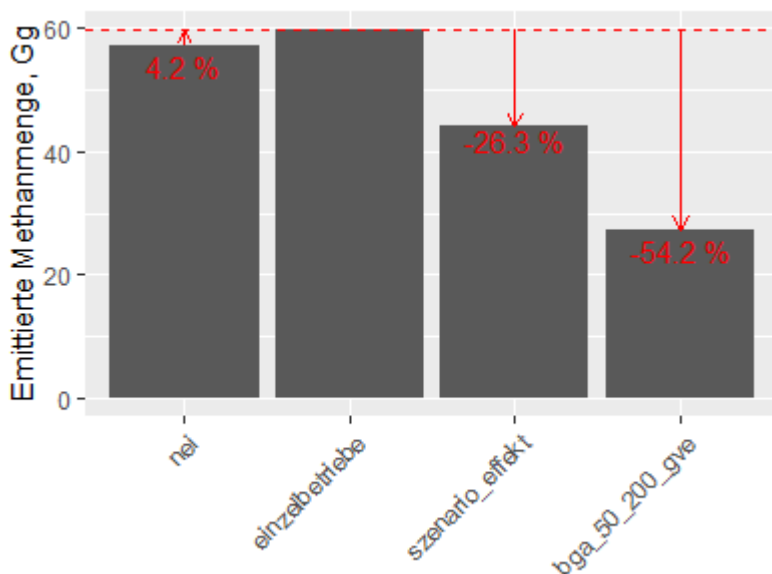


Abb. 16: Gesamte emittierte Methanmenge aus dem Wirtschaftsdünger-Management von Rindern und Schweinen in Bayern im Jahr 2021: Originalwert nach NEI vs. Basiswert und Ergebnisse der Potenzialanalyse zur Emissionsminderung durch Vergärung für zwei Szenarien (zur Erläuterung siehe Text).

Der Großteil der Methanemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management entsteht in Bayern auf den Betrieben mit mittleren Bestandsgrößen von 50 bis unter 200 GVE: die kumulierten Methanemissionen dieser 16.454 Betriebe betragen 40,451 Gg. Somit verursacht dieses knappe Drittel der Gesamtheit der Betriebe rund 68 % der Methanemissionen. Diesen Betrieben konnte auch die Mehrheit der Biogasanlagen zugeordnet werden. Das kumulierte Potenzial zur Minderung der jährlichen Methanemissionen durch Vergärung der Wirtschaftsdünger von diesen Betrieben beträgt 32,429 Gg: eine Vermeidungsrate von 80,2 %. Damit würden in diesem Szenario die gesamten Methanemissionen aller Betriebe um rund 54 % gegenüber dem Ausgangswert verringert werden (Vergleiche Abb. 16: Datenpunkt „bga_50_200_gve“).

Um eine Möglichkeit aufzuzeigen, wie mit der Vergärung der Wirtschaftsdünger von einer möglichst geringen Anzahl an Tierhaltungsbetrieben die höchstmögliche Menge an Methan vermieden werden könnte, wurde ein Szenario namens „Effekt“ betrachtet, hierfür wurden die Betriebe mit einem Tierbestand von mindestens 50 GVE zunächst nach absteigender Emissionsstärke (= jährlich zu vermeidender Methanausstoß aus dem Wirtschaftsdünger-Management) und dann nach abnehmender Emissionsintensität (= Emissionsstärke dividiert durch den betrieblichen Tierbestand in GVE) sortiert. Nun wurde ausgewertet, von welcher Anzahl an Betrieben die Wirtschaftsdünger einer Vergärung zugeführt werden müssten, um die erwartete Minderungswirkung des Klimaschutzprogramms der Bundesregierung zu erreichen. Demnach dürften im Jahr 2030 die verbliebenen CO₂-Äq-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in Deutschland insgesamt 7,5 Tg (GWP100) betragen, davon 70 % oder 187,5 Gg als Methan.

Gemäß einer einfachen Proportionalrechnung entspräche der bayerische Anteil daran einer Menge von 44,1 Gg Methan, was einer Minderung um rund 26 % gegenüber dem in der vorliegenden Potenzialanalyse verwendeten Basiswert für Bayern im Jahr 2021 entspricht (Vergleiche Abb. 16: Datenpunkt „szenario_effekt“). Um dies zu erreichen, müssten gemäß dem Szenario „Effekt“ die Wirtschaftsdünger von mindestens 3.755 Betrieben einer

Vergärung zugeführt werden, das entspricht rund 22 % der Tierhaltungsbetriebe in diesen Bestandsklassen (ohne Berücksichtigung der zuordenbaren BGA).

Abschließend sollen die Ergebnisse zur potenziellen Minderung der Methanemissionen durch Wirtschaftsdüngervergärung in das Gesamtbild des landwirtschaftlichen Emissionsinventars für Bayern eingeordnet werden. Wählt man die Summe der jährlichen Methanemissionen aus der Tierhaltung in Bayern in Höhe von 296,3 Gg als Bezugswert, so wird diese im Szenario „Effekt“ *ceteris paribus* um 4,4 % auf 283,3 Gg verringert (Vergleiche Abb. 17: zweite vs. dritte Säule von links). Im Szenario der Vergärung aller Wirtschaftsdünger von Betrieben der Rinder-/Schweinehaltung mit Bestandsgrößen von mindestens 50 GVE sinkt die gesamte jährlich emittierte Methanmenge um 11,8 % auf 261,2 Gg (Abb. 17: Säule ganz rechts).

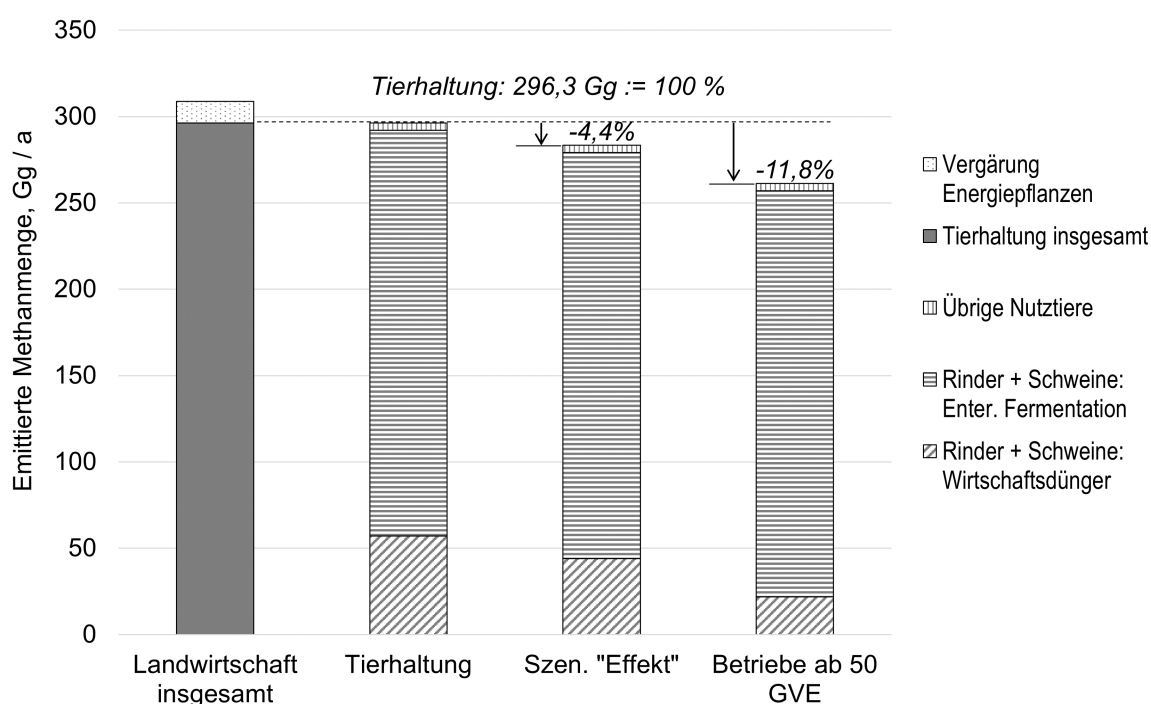


Abb. 17: Aufteilung der Methanemissionen aus der bayerischen Landwirtschaft im Jahr 2021 und deren mögliche Minderung durch Wirtschaftsdünger-Vergärung entsprechend den untersuchten Szenarien (Werte nach [2] und eigenen Berechnungen).

In Deutschland insgesamt wurde im Jahr 2022 die nach Bundesklimaschutzgesetz zulässige Jahresemissionsmenge an Treibhausgasen im Sektor Landwirtschaft um rund neun Prozent unterschritten, d. h. das Minderungsziel wurde deutlich übererfüllt. Bis 2030 muss der Sektor nach aktuellem Stand die Gesamtemissionsmenge um weitere rund sieben Prozent verringern. Vor diesem Hintergrund sind die zunächst eventuell als recht gering erscheinenden Minderungseffekte einer ambitionierten Umsetzung der Vergärung von Wirtschaftsdüngern, wie sie in den vorgestellten Szenarien für Bayern untersucht wurden, durchaus als bedeutsam einzustufen.

Die Wirtschaftsdünger-Vergärung ist eine technisch ausgereifte und sofort wirksame Maßnahme zur Vermeidung von THG-Emissionen; als weitere Vorteile sind insbesondere die

gesteigerte Fließfähigkeit und Düngewirkung sowie die verringerten Geruchsemissionen bei der Anwendung vergorener Wirtschaftsdünger zu nennen. Gleichzeitig ist zu bedenken, dass der große Beitrag der Vergärung zum Klimaschutz vor allem an die Emissionsintensität güllebasierter Haltungssysteme gekoppelt ist (Vergleiche Abschnitt 2.1.3 und 3.5.1). Man kann daher im Hinblick auf den Klimaschutz konstatieren, dass solche Haltungssysteme nur in Verbindung mit einer Biogasanlage akzeptabel sind.

Die zügige Ausweitung der Wirtschaftsdünger-Vergärung in Regionen mit eher „kleinstrukturierter“ Tierhaltung scheiterte bisher an der mangelnden betrieblichen Wirtschaftlichkeit bei kleinen bis mittleren Tierbeständen. Um möglichst rasch und kosteneffizient die Methanemissionen zu senken, müssen vorrangig für diejenigen Betriebe mit dem größten Potenzial zur Emissionsvermeidung die Hemmnisse zur Investition in güllebasierte Biogasanlagen beseitigt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt (UBA) (2023): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2023. Dessau-Roßlau (Climate Change, 28/2023). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-8>, zuletzt aktualisiert am 07.07.2023.000Z, zuletzt geprüft am 17.07.2023.
- [2] Rösemann, Claus; Vos, Cora; Haenel, Hans-Dieter; Dämmgen, Ulrich; Döring, Ulrike; Wulf, Sebastian et al. (2023): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2021: Input data and emission results. Thünen-Institut für Agrarklimaschutz. Online verfügbar unter https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00085974, zuletzt geprüft am 04.04.2023.
- [3] Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pörtner, H.-O.; Roberts, D.; Skea, J.; et al. (Hg.) (2018): Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/sr15/>, zuletzt geprüft am 13.04.2023.
- [4] Markus, Till; Schaller, Romina; Gawel, Erik; Korte, Klaas (2021): Negativemissionstechnologien als neues Instrument der Klimapolitik: Charakteristiken und klimapolitische Hintergründe. In: *Natur und Recht* 43 (2), S. 90–99. DOI: 10.1007/s10357-021-3804-8.
- [5] Buck, Holly Jean; Carton, Wim; Lund, Jens Friis; Markusson, Nils (2023): Why residual emissions matter right now. In: *Nature Climate Change* 13 (4), S. 351–358. DOI: 10.1038/s41558-022-01592-2.
- [6] Solomon, Susan; Qin, Dahe; Manning, Z.; Chen, Zhuo; Marquis, M.; Averyt, K. B. et al. (Hg.) (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge UK, New York: Cambridge University Press. Online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>, zuletzt geprüft am 24.03.2023.773Z.
- [7] Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S. K.; Boschung, J. et al. (Hg.) (2014): *Climate change 2013. The physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- [8] Allen, M. R.; Fuglestvedt, J. S.; Shine, K. P.; Reisinger, A.; Pierrehumbert, R. T.; Forster, P. M. (2016): New use of global warming potentials to compare cumulative and short-lived climate pollutants. In: *Nature Climate Change* 6, S. 773–776. DOI: 10.1038/nclimate2998.
- [9] NOAA Global Monitoring Laboratory (2023.000Z): THE NOAA ANNUAL GREENHOUSE GAS INDEX (AGGI). Updated Spring 2022. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Online verfügbar unter

- <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>, zuletzt aktualisiert am 14.04.2023.000Z, zuletzt geprüft am 14.04.2023.321Z.
- [10] Hansen, James; Nazarenko, Larissa; Ruedy, Reto; Sato, Makiko; Willis, Josh; Del Genio, Anthony *et al.* (2005): Earth's energy imbalance: confirmation and implications. In: *Science* 308 (5727), S. 1431–1435. DOI: 10.1126/science.1110252.
- [11] Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A.; Connors, S. L.; Péan, C.; Berger, S. *et al.* (Hg.) (2021): AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Final Government Distribution - subject to final editing. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change: Cambridge University Press. Online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>, zuletzt geprüft am 10.08.2021.
- [12] Hansen, James E.; Sato, Makiko; Simons, Leon; Nazarenko, Larissa S.; Schuckmann, Karina von; Loeb, Norman G. *et al.* (2022): Global warming in the pipeline. Cornell University. Online verfügbar unter <https://arxiv.org/pdf/2212.04474>, zuletzt aktualisiert am 2022, zuletzt geprüft am 19.04.2023.
- [13] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2019): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. 2. Aufl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).
- [14] 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.
- [15] Harthan, Ralph O.; Repenning, Julia; Blanck, Ruth; Böttcher, Hannes; Bürger, Veit; Cook, Vanessa *et al.* (2020): Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung. Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politikszenerien IX“)“. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau (Climate Change, 33/2020). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-03-19_cc_33-2020_klimaschutzprogramm_2030_der_bundesregierung.pdf.
- [16] Umweltbundesamt (UBA) (2023): Emissionsübersichten nach Sektoren des Bundesklimaschutzgesetzes 1990 - 2022. Stand: 15.03.2023. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2023_03_15_em_entwicklung_in_d_ksg-sektoren_pm.xlsx, zuletzt geprüft am 26.07.2023.
- [17] Haß, Marlen; Deblitz, Claus; Freund, Florian; Kreins, Peter; Laquai, Verena; Offermann, Frank *et al.* (2022): Thünen-Baseline 2022 – 2032: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen Report, 100). Online verfügbar unter <https://d-nb.info/1274225728/>.
- [18] Harthan, Ralph O.; Förster, Hannah; Borkowski, Kerstin; Böttcher, Hannes; Braungardt, Sibylle *et al.* (2023): Projektionsbericht 2023 für Deutschland. Gemäß Artikel 18 der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie §10 (2) des Bundes-

- Klimaschutzgesetzes. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau (Climate Change, 39/2023).
- [19] Osterburg, Bernhard; Rüter, Sebastian; Freibauer, Annette; de Witte, Thomas; Elsasser, Peter; Kätsch, Stephanie *et al.* (2013): Handlungsoptionen für den Klimaschutz in der deutschen Agrar- und Forstwirtschaft. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Report, 11). Online verfügbar unter http://www.ti.bund.de/fileadmin/dam_uploads/vTI/Publikationen/Thuenen%20Report/Th%C3%BCnen-Report_11_Osterburg%20et%20al_Internet_neu.pdf.
- [20] Osterburg, Bernhard; Heidecke, Claudia; Bolte, Andreas; Braun, Julian; Dieter, Matthias; Dunger, Karsten *et al.* (2019): Folgenabschätzung für Maßnahmenoptionen im Bereich Landwirtschaft und landwirtschaftliche Landnutzung, Forstwirtschaft und Holznutzung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig (Thünen Working Paper, 137). Online verfügbar unter <https://www.econstor.eu/handle/10419/213021>.
- [21] Rösemann, Claus; Haenel, Hans-Dieter; Vos, Cora; Dämmgen, Ulrich; Döring, Ulrike; Wulf, S. *et al.* (2021): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture / Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990–2019. Report zu Methoden und Daten (RMD) Berichterstattung 2021. Thünen-Institut. Braunschweig, Germany (Thünen-Report). Online verfügbar unter <https://d-nb.info/1230486038/>.
- [22] Bayerisches Landesamt für Statistik (2021): Viehbestände in Bayern 2021. Viehzählung im Mai. Bayerisches Landesamt für Statistik (Statistische Berichte, C III 1-2 j 2021). Online verfügbar unter https://www.statistik.bayern.de/mam/produkte/veroeffentlichungen/statistische_berichte/c3122c_202100.pdf, zuletzt geprüft am 20.09.2022.
- [23] Bayerisches Landesamt für Statistik (2022): Viehbestände in Bayern 2021. Viehzählung im November. Bayerisches Landesamt für Statistik (Statistische Berichte, C III 1-3 j 2021). Online verfügbar unter https://www.statistik.bayern.de/mam/produkte/veroeffentlichungen/statistische_berichte/c3122c_202100.pdf, zuletzt geprüft am 19.05.2023.
- [24] Bundesnetzagentur (2021): Marktstammdatenregister: Erweiterte Einheitenübersicht. Online verfügbar unter <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Einheit/Einheiten/ErweiterteOeffentlicheEinheitenuebersicht>, zuletzt aktualisiert am 04.02.2021, zuletzt geprüft am 04.02.2021.
- [25] 50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TransnetBW GmbH; TenneT TSO GmbH (2023.000Z): Netztransparenz. Informationsplattform der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Online verfügbar unter <https://www.netztransparenz.de/>, zuletzt aktualisiert am 22.05.2023.000Z, zuletzt geprüft am 22.05.2023.116Z.
- [26] Deutscher Wetterdienst (2023.000Z): Wetter- und Klimalexikon. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=102248&lv3=744508>, zuletzt aktualisiert am 16.08.2023.000Z, zuletzt geprüft am 16.08.2023.920Z.