

POSITION // AUGUST 2022

# Unterschätztes Treibhausgas Methan Quellen, Wirkungen, Minderungsoptionen

Für Mensch & Umwelt

Umwelt   
Bundesamt

# Impressum

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
buergerservice@uba.de  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

**Autorinnen und Autoren:**

Johanna Appelhans, Christian Böttcher, Kai Keßler,  
Christian Mielke, Anja Nowack, Katja Purr, Anja Schwetje,  
Diana Sorg, Jens Tambke

**Redaktion:**

Patrick Gniffke (Fachgebiet V 1.6)  
Diana Sorg (Fachgebiet II 2.2)  
Yaman Tarakji (Fachgebiet V 1.6)

**Satz und Layout:**

Atelier Hauer + Dörfler GmbH

**Publikationen als pdf:**

[www.umweltbundesamt.de/publikationen](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen)

Stand: August 2022

ISSN 1862-4804

**POSITION // AUGUST 2022**

**Unterschätztes  
Treibhausgas Methan**  
Quellen, Wirkungen,  
Minderungsoptionen



---

# Inhalt

<b>Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Politische Empfehlungen des UBA</b> .....	<b>7</b>
<b>2 Relevanz von Methan</b> .....	<b>9</b>
2.1 Klimawirkung und GWP .....	9
2.2 Rolle in der Luftreinhaltung .....	9
2.3 Methanquellen und -senken .....	9
<b>3 Minderungsstrategien</b> .....	<b>20</b>
3.1 Ziele zur Methanminderung .....	20
3.2 Maßnahmen zur Minderung von Methan .....	20
<b>4 Erfassung und transparente Berichterstattung von Methanemissionen</b> .....	<b>28</b>
4.1 Bisherige Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention und dem Kyoto-Protokoll .....	28
4.2 Detektion von Methan mit Hilfe von Satelliten .....	28
4.3 Harmonisierung der Berichterstattung .....	29
<b>Literatur</b> .....	<b>30</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>33</b>

## Einleitung



Methan ( $\text{CH}_4$ ) ist nach Kohlendioxid das zweitwichtigste Treibhausgas. Insgesamt leistet das vom Menschen verursachte Methan in der Atmosphäre heute einen Beitrag zur Brutto-Temperaturerhöhung von etwa 0,5 Grad Celsius (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2021). Daneben ist Methan ein wichtiger Vorläuferstoff für die Bildung von bodennahem Ozon ( $\text{O}_3$ ). Ozon ist mit negativen Gesundheitseffekten verbunden und schädigt Ökosysteme und Nutzpflanzen. Eine Minderung der Methanemissionen trägt also sowohl zum Klimaschutz als auch zum Schutz der menschlichen Gesundheit und zum Schutz von Ökosystemen bei.

Seit einigen Jahren gibt es sowohl auf internationaler als auch auf europäischer Ebene Bestrebungen, die Methanemissionen deutlich zu senken und konkrete Minderungsziele festzulegen, denn aufgrund der relativ kurzen mittleren Verweildauer von Methan in der Atmosphäre (etwa 9 bis 12 Jahre) kann die Minderung von  $\text{CH}_4$  einen wichtigen Beitrag zur Eindämmung der globalen Erwärmung in kurzer Frist leisten. Die Reduktion der Methanemissionen ist eine der vorrangigen Initiativen des europäischen Grünen

Deals<sup>1</sup>, und die im Oktober 2020 veröffentlichte EU-Methanstrategie zeigt Optionen zur Minderung von Methan in den relevanten Sektoren auf.

Am 15. Dezember 2021 hat die Europäische Kommission zudem einen Vorschlag für die Minderung der Methanemissionen aus dem Energiesektor vorgelegt. Darüber hinaus initiierten die USA und die EU im September 2021 den "Global Methane Pledge"<sup>2</sup>. Mit der Unterzeichnung dieser Erklärung verpflichteten sich über 100 Staaten zu einer 30-prozentigen Methanminderung bis 2030 gegenüber den Emissionen des Jahres 2020.

Trotz der angestoßenen Initiativen zur Methanminderung ist jedoch vielen Menschen noch nicht bewusst, wie notwendig eine Reduzierung der  $\text{CH}_4$ -Emissionen ist und welchen Nutzen sie bringen kann. Das Umweltbundesamt möchte deshalb mit diesem Papier über die Wirkungen und die wichtigsten Emissionsquellen von Methan informieren und konkrete Maßnahmen zur Methanreduktion auf nationaler Ebene und weltweit aufzeigen.

<sup>1</sup> [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_de](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de)  
<sup>2</sup> <https://www.globalmethanepledge.org/>

# 1 Politische Empfehlungen des UBA

Deutschland hat in den vergangenen Jahren Fortschritte bei der Reduktion von Methanemissionen erzielt. Insbesondere im Abfallsektor haben die bereits ergriffenen Maßnahmen zu großen Erfolgen geführt. Um weitere Methanminderungen zu erreichen und einen Beitrag zu den genannten Initiativen zur CH<sub>4</sub>-Reduktion zu leisten, fordert das Umweltbundesamt (UBA) die Umsetzung der folgenden Maßnahmen:



## Energie- und Industriesektor:

- ▶ Entwicklung von Abgasreinigungstechnik zur Reduktion der Methanemissionen aus stationären Verbrennungsmotoranlagen
  - ▶ Transformation des Energiesystems und der Anwendungsbereiche Wärme, Verkehr und Industrie: Ausstieg aus sämtlichen fossilen Energieträgern. Überall dort, wo es technisch möglich ist, sind erneuerbare Energien und erneuerbarer Strom direkt zu nutzen.
  - ▶ Reduktion des Methan- bzw. Gasbedarfes: Die direkte Verwendung von Strom ist die effizienteste Lösung. Der Einsatz von Brennstoffen, also auch von erneuerbarem Gas, sollte nur noch dort erfolgen, wo dies technisch notwendig ist.
  - ▶ Ausstieg aus gasbasierten Heizungstechniken: Im Gebäudebereich gibt es ausreichend brennstofffreie Alternativen aus erneuerbaren Energien wie Solarthermie, Geothermie und Umweltwärme (mit Wärmepumpen). Spätestens ab 2026 sollten keine neuen Gasheizungen mehr installiert werden, so dass vor dem Hintergrund der Nutzungszyklen ein Ausstieg bis spätestens 2045 gelingen kann.
  - ▶ Elektrifizierung der Betriebsmittel im Gasnetz: In konsequenter Fortführung der Prämissen zur Transformation in ein nachhaltiges Energiesystem sind die Betriebsmittel (Verdichter, Vorwärmstrecken) im Gasnetz zu elektrifizieren und sollten nicht mehr mit Gas betrieben werden.
- ▶ Konsequente und regelmäßige Durchführung von Programmen zur Erkennung und Reparatur von Leckagestellen in der Gasinfrastruktur (Leak Detection And Repair (LDAR)-Programme)
  - ▶ Einführung eines Methan-Emissionsgrenzwerts für Verbrennungsmotoranlagen in der EU-Richtlinie über mittelgroße Feuerungsanlagen ((EU) 2015/2193)
  - ▶ Einführung eines Methan-Emissionsgrenzwerts für kleine Verbrennungsmotoranlagen (< 1 Megawatt Feuerungswärmeleistung) im Rahmen einer nationalen Bundes-Immissionsschutzverordnung



### Landwirtschaftssektor:

- ▶ Methan aus tierischer Verdauung reduzieren: insbesondere durch Verringerung des Tierbestandes, ergänzt durch die Nutzung der Potenziale zur Minderung der Methanemission pro Einheit Produkt über Futterzusatzstoffe, Fütterung, Züchtung, Verbesserung von Tierwohl, Tiergesundheit und Langlebigkeit
- ▶ Ausbau der Güllevergärung in Biogasanlagen

### Abfallsektor:

- ▶ Weltweit die Beendigung der Deponierung von Bioabfall und organikreichen Siedlungsabfällen vorantreiben, denn nur so kann die Entstehung und Freisetzung von Methan aus Deponien dauerhaft verhindert werden.
- ▶ Den Ausbau der Getrenntsammlung und der anschließenden Kompostierung, Vergärung oder energetischen Nutzung von Bioabfällen weltweit fördern und fördern
- ▶ Die Vermeidung und Reduzierung von Lebensmittelabfällen national und global umsetzen
- ▶ Entstandenes Deponiegas fassen und energetisch verwerten

- ▶ Die Kommunikation zu Minderungspotenzialen des Abfallsektors und die Quantifizierung und Messung von Emissionen und vermiedenen Emissionen verbessern

### Übergreifende Kooperation und Kommunikation:

- ▶ Festlegung eines verbindlichen Minderungsziels für Methan im Zuge der Überarbeitung des Göteborg-Protokolls der Genfer Luftreinhaltekonvention und der im Jahr 2025 geplanten Novellierung der EU-NEC-Richtlinie (EU-RL 2016/2284)
- ▶ Engere Kooperation mit internationalen Akteuren, zum Beispiel der „Climate and Clean Air Coalition“ (CCAC), UN-Organisationen und der Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)
- ▶ Das Zusammenwirken von nationalen Zielen (Nationally Determined Contributions (NDCs)) und Rahmenbedingungen sowie der Umsetzung von Zielen auf lokaler Ebene (Städte, Privatsektor, Nichtregierungsorganisationen) unterstützen und ausbauen
- ▶ Methanvermeidung durch bessere Förderung und Finanzierung, auch durch internationale Klimaschutzinstrumente

## 2 Relevanz von Methan

### 2.1 Klimawirkung und GWP

Methan ist nach Kohlendioxid das zweitwichtigste vom Menschen direkt verursachte Treibhausgas. Betrachtet man dieselbe Masse von emittiertem Methan und Kohlendioxid (zum Beispiel 1 Tonne), hat es eine 28 mal so starke Treibhauswirkung wie Kohlendioxid, wenn man einen Zeitraum von 100 Jahren nach der Emission insgesamt betrachtet (Metrik: GWP-100), (IPCC 2014). Nach neuerer Forschung ist Methan in der Metrik des GWP-100 sogar 30 mal so klimawirksam wie CO<sub>2</sub> (IPCC 2021).

Während der letzten 650.000 Jahre lag die Methankonzentration in der Atmosphäre zwischen 400 ppb (parts per billion) während der Kaltzeiten und 700 ppb während der Warmzeiten. Sie ist seit 1750 von 722 ppb auf knapp 1.900 ppb im Jahr 2021 angestiegen. Der aktuelle Wert ist in den letzten 650.000 Jahren beispiellos. Während frühere Daten auf in Eis oder Firn eingeschlossenen Luftbläschen basieren, wird die Methankonzentration seit 1983 direkt in der Atmosphäre und global repräsentativ gemessen. In dieser Zeit ist die Methankonzentration sehr deutlich angestiegen. Insgesamt leistet das anthropogene Methan in der Atmosphäre einen Gesamtbeitrag zur anthropogenen Erwärmung von derzeit knapp 30 Prozent (brutto). Dies entspricht bis heute einer Brutto-Temperaturerhöhung von etwa 0,5 Grad Celsius (IPCC 2021).

### 2.2 Rolle in der Luftreinhaltung

Methan ist neben Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>), flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (engl. non-methane volatile organic compounds, NMVOC) und Kohlenmonoxid (CO) ein wichtiger Vorläuferstoff für die Bildung von bodennahem Ozon (O<sub>3</sub>). Ozon ist mit negativen Gesundheitseffekten wie Augenreizungen, Atemwegsbeschwerden, entzündlichen Reaktionen in den Atemwegen und einer verminderten Lungenfunktion verbunden. Darüber hinaus kann Ozon Ökosysteme und Nutzpflanzen schädigen. Bereits länger anhaltende Belastungen durch nur mäßig erhöhte Ozonkonzentrationen stellen ein Risiko für das Pflanzenwachstum, Ernteerträge, die Qualität landwirtschaftlicher Produkte und Ökosystemleistungen wie die Kohlenstoffbindung in Wäldern dar.

Nach einer durch das UBA in Auftrag gegebenen Studie (Butler et al. 2020) entsteht etwa ein Drittel des jährlichen bodennahen Ozons in Deutschland (etwa 20 Mikrogramm je Kubikmeter (µg/m<sup>3</sup>)) durch die Oxidation von Methan, wobei nur ein kleiner Teil davon (etwa 3 Mikrogramm je Kubikmeter) auf die Oxidation von Methan im europäischen Raum zurückzuführen sind. D. h. ein Großteil des Methans stammt aus Quellen außerhalb Europas. Um den Beitrag von Methan zur Bildung bodennahen Ozons zu senken, ist daher ein globales Handeln erforderlich.

### 2.3 Methanquellen und -senken

Biogenes Methan entsteht dort, wo organisches Material unter Luftausschluss abgebaut wird. Das Gas wird dabei von methanbildenden Mikroorganismen, sogenannten methanogenen Archaeen gebildet, zum Beispiel im Verdauungstrakt von Wiederkäuern (enterische Fermentation), aber auch durch Gärungsprozesse in Deponiekörpern. In durch den Klimawandel auftauenden Permafrostböden werden Tier- und Pflanzenreste unter Luftabschluss zersetzt und tragen so ebenfalls zur Methanbildung bei.

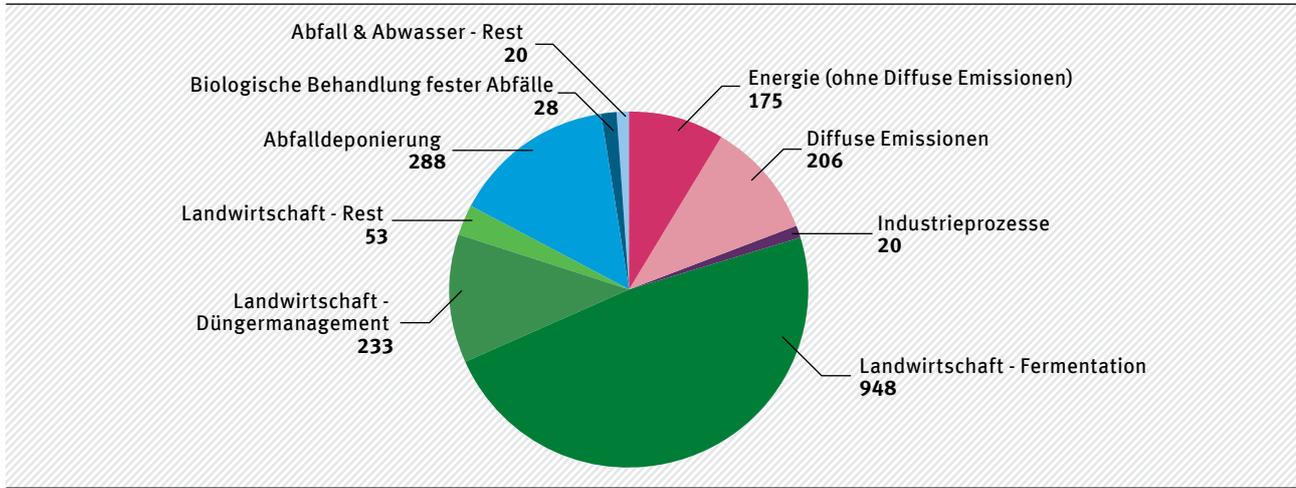
Durch die Erwärmung der Meere schmilzt Methanhydrat (Eis mit Methan) und setzt Methan frei. Das über Jahrtausende durch hohen Druck und Temperatur entstandene Methan, das sich durch biochemische Umwandlung organischer Materialien bildete, wird heute allgemein als fossil bezeichnet und industriell als Energiequelle gefördert. Methan kann darüber hinaus auch durch geothermische Prozesse, zum Beispiel in Hydrothermalquellen, entstehen.

Prozesse, die Methan in der Atmosphäre abbauen, bezeichnet man als Methansenken. Die wichtigste Senke ist die Oxidation von Methan durch das Hydroxyl-Radikal OH in der Troposphäre. Auch Böden sind eine kleine Senke für atmosphärisches Methan: Bakterien in den obersten Bodenschichten nutzen das CH<sub>4</sub> als Energiequelle und bauen es dabei ab. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass die Methanspeicherung in Böden von vielen Umweltfaktoren, zum Beispiel von Stoffeinträgen und klimatischen Bedingungen, abhängig ist. Bisher reicht das Wissen um diese Wechselwirkungen aber noch nicht aus, um sie zuverlässig in Modellen abzubilden.

2.3.1 Situation in Deutschland

Abbildung 1

**Methanemissionen aus Deutschland im Jahr 2019 in kt**  
nach Kategorien der Berichterstattung\*

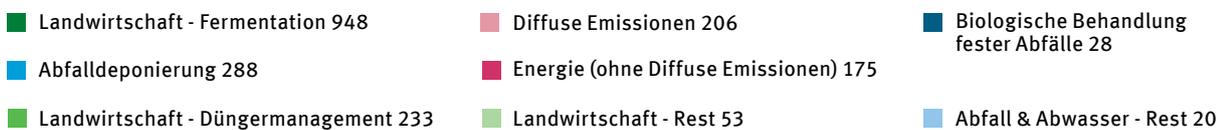
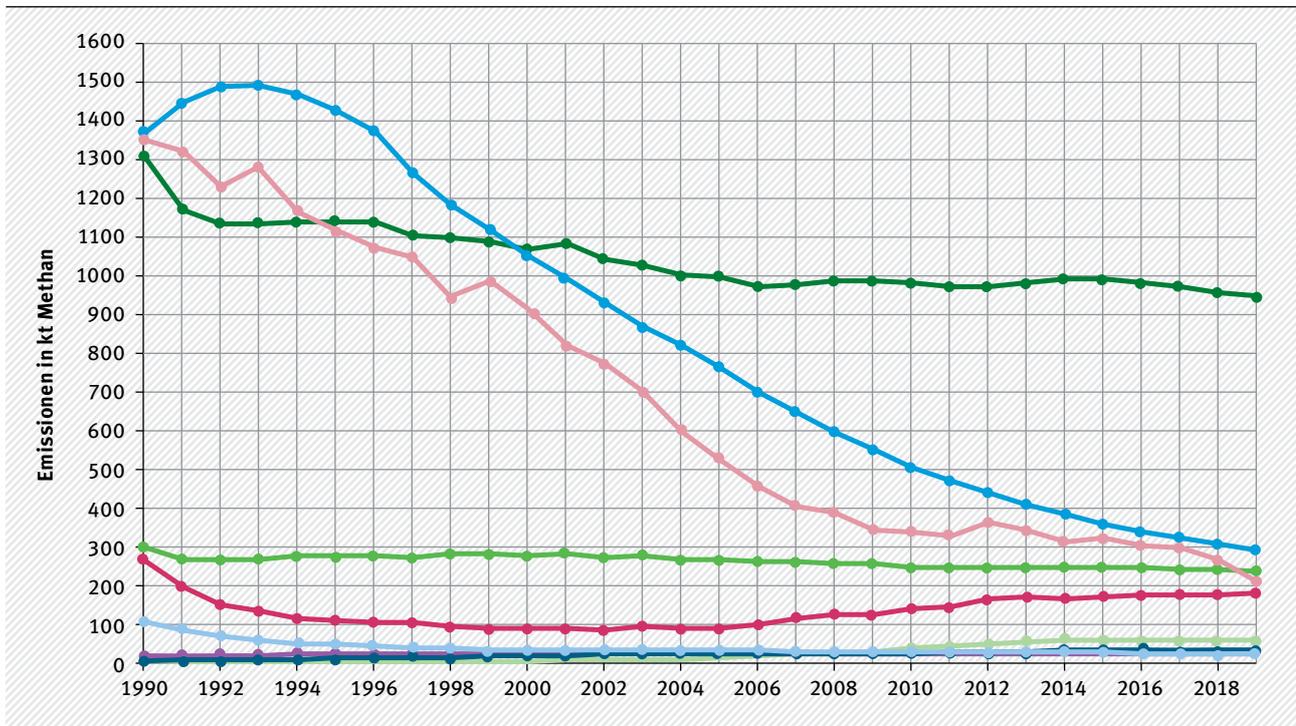


\* ohne Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (engl. land use, land use change and forestry, LULUCF) und nachrichtlich berichtete Daten

Quelle: eigene Darstellung, EuroStat Data Viewer - greenhouse gas emissions by source sector (Abfrage vom 21.07.2021)

Abbildung 2

**Methanemissionen aus Deutschland**  
nach Kategorien der Berichterstattung\*



\* ohne Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (engl. land use, land use change and forestry, LULUCF) und nachrichtlich berichtete Daten

Quelle: eigene Darstellung, EuroStat Data Viewer - greenhouse gas emissions by source sector (Abfrage vom 21.07.2021)

1990 hatten die Methanemissionen einen Anteil von fast 10 Prozent an den gesamten Treibhausgas-Emissionen in Deutschland (in Kohlendioxid-Äquivalenten umgerechnet) (UNFCCC 2021). Seit etwa 2010 liegt der Anteil von Methan stabil bei ca. 6 Prozent. In absoluten Zahlen sanken die Emissionen in den vergangenen dreißig Jahren langsam aber stetig um 2,8 Millionen Tonnen und lagen 2019 noch bei knapp zwei Millionen Tonnen. Das entspricht einer Minderung um 58 Prozent (UNFCCC 2021).

### 2.3.1.1 Energie

Die Methanemissionen der Energiewirtschaft stammen zum größten Teil aus der Förderung, Umwandlung und Verteilung von Brennstoffen. Während in den 1990er Jahren noch der Steinkohlenbergbau eine signifikante Rolle spielte, sind es derzeit mit über 160 Kilotonnen der Gastransport und die -verteilung (UNFCCC 2021). Durch die Einstellung des Steinkohlenbergbaus im Jahr 2018, die Erneuerung des Erdgasnetzes sowie die energetische Nutzung des Grubengases konnten über 1,1 Millionen Tonnen Methan eingespart werden. Mit Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG 2014), und der daraus resultierenden finanziellen Unterstützung bei der Verwertung von Grubengas konnten die direkten Methanemissionen aus stillgelegten Steinkohlenbergwerken nahezu vollständig reduziert werden. Das Grubengas wird hierbei aus den Bergwerken abgesaugt und einer energetischen Verwertung zugeführt oder aufbereitet und als Brennstoff im Erdgasnetz bereitgestellt. Durch das EEG wurde den Netzbetreibern so eine Abnahmeverpflichtung und eine Einspeisungsvergütung für den aus Grubengas erzeugten Strom gesetzlich vorgeschrieben.

Die durch die Gasverteilung verursachten Emissionen sind trotz deutlich gestiegener Gasdurchleitungen und eines gegenüber 1990 deutlich erweiterten Verteilungsnetzes leicht zurückgegangen. Ursache hierfür ist zum einen die Erneuerung des Gasverteilungsnetzes insbesondere im Osten Deutschlands. So wurde insbesondere der Anteil der Graugussrohre im Niederdrucknetz reduziert und durch emissionsärmere Kunststoffrohrleitungen ersetzt. Eine weitere Ursache dieser Reduzierung ist die Minderung der diffusen Verteilungsverluste durch technische Verbesserungen (technisch dichte Armaturen wie Flansche, Ventile, Pumpen, Kompressoren) als Resultat der Implementierung von Anforderungen zur Emissionskontrolle (TA Luft, 2002). Insgesamt

machen diffuse Entweichungen über 50 Prozent der Methanemissionen des Energiesektors aus (UNFCCC 2021). Daneben hat der Methanschlepp, der durch unvollständige Verbrennung aber auch durch Start-Stopp-Vorgänge an Endgeräten entsteht, einen Anteil von über 40 Prozent an den Gesamtmethanemissionen des Energiesektors.

### 2.1.1.3 Industrie

Methanemissionen im Industriebereich stammen vor allem aus der chemischen Industrie, insbesondere der Ethylen- und Methanolproduktion. Trotz deutschlandweit gestiegener Produktion sind die Emissionen um etwa 30 Prozent gesunken (UNFCCC 2021). Dies ist vor allem auf die thermische Nachverbrennung von flüchtigen organischen Stoffen zurückzuführen. In allen in Deutschland befindlichen Anlagen zur Herstellung von Grundchemikalien ist dies Stand der Technik.

### 2.3.1.3 Landwirtschaft

Mit über 1.200 Kilotonnen (2020) ist die Landwirtschaft die größte Treiberin der deutschen Methanemissionen (UBA 2022). Vor allem Nutztiere tragen mit ihrer Verdauung (enterischer Fermentation) 75 Prozent zum hohen Methanausstoß der Landwirtschaft bei. Auf das Wirtschaftsdüngermanagement entfallen 20 Prozent der landwirtschaftlichen Methanemissionen. Auch die Vergärung von Energiepflanzen (Lagerung von Gärresten) hat zunehmenden Einfluss auf die Werte und trägt mittlerweile mit rund 53 Kilotonnen (4 Prozent) zu den Emissionen bei (ebd.).

Die gesamten Methanemissionen der Landwirtschaft konnten von 1990 bis 2020 um etwa 23 Prozent gesenkt werden (UBA 2022). Der Rinderbestand in Deutschland, unter den Nutztieren als Wiederkäuer die größten Emittenten von Methan, nahm zwischen 1990 und 2020 um rund 42 Prozent ab (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) 2022a). Dafür war vor allem der Strukturwandel der ostdeutschen Landwirtschaft in den 1990er Jahren infolge der politischen Wende verantwortlich. Im gleichen Zeitraum gingen die Methanemissionen aus enterischer Fermentation jedoch nur um rund 28 Prozent zurück (UBA 2022). Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass zeitgleich die Milchleistung von durchschnittlich 4.900 Kilogramm pro Kuh und Jahr (1991) auf 8.400 Kilogramm (2020) anstieg (BMEL 2022b). Ein Teil der Reduktion wurde also durch die höhere Einzeltierleistung kompensiert.

Die Emissionen aus der Verdauung stagnieren daher seit Jahren. Die Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement gingen zwischen 1990 und 2020 um 28 Prozent zurück, da inzwischen mehr Gülle in Biogasanlagen genutzt wird. Dafür kommen gegenüber 1990 neue Methanemissionen aus der Vergärung von Energiepflanzen hinzu (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2019).

Der Projektionsbericht der Bundesregierung geht bis 2035 gegenüber 2020 von einer weiteren geringfügigen Reduktion der Methanemissionen der Landwirtschaft aus, die rund 38 Kilotonnen (rund 3 Prozent weniger) beträgt (BMU 2019).

**2.3.1.4 Abfall- und Abwasserwirtschaft**

Bei der Vermeidung und Verminderung von Methanemissionen im Abfallsektor nimmt Deutschland weltweit eine Vorreiterrolle ein. Geordnete Deponien mit Deponiegasfassung und -verwertung wurden schon im letzten Quartal des letzten Jahrhunderts eingeführt. Aber vor allem das bereits 2005 gesetzlich verankerte Ablagerungsverbot für organikhaltige unbehandelte Siedlungsabfälle (sofern diese mehr als 5 Prozent Gesamtkohlenstoffgehalt (englisch Total Organic Carbon (TOC)) aufweisen) war der entscheidende Auslöser für einen deutlichen Rückgang der Methanemissionen aus

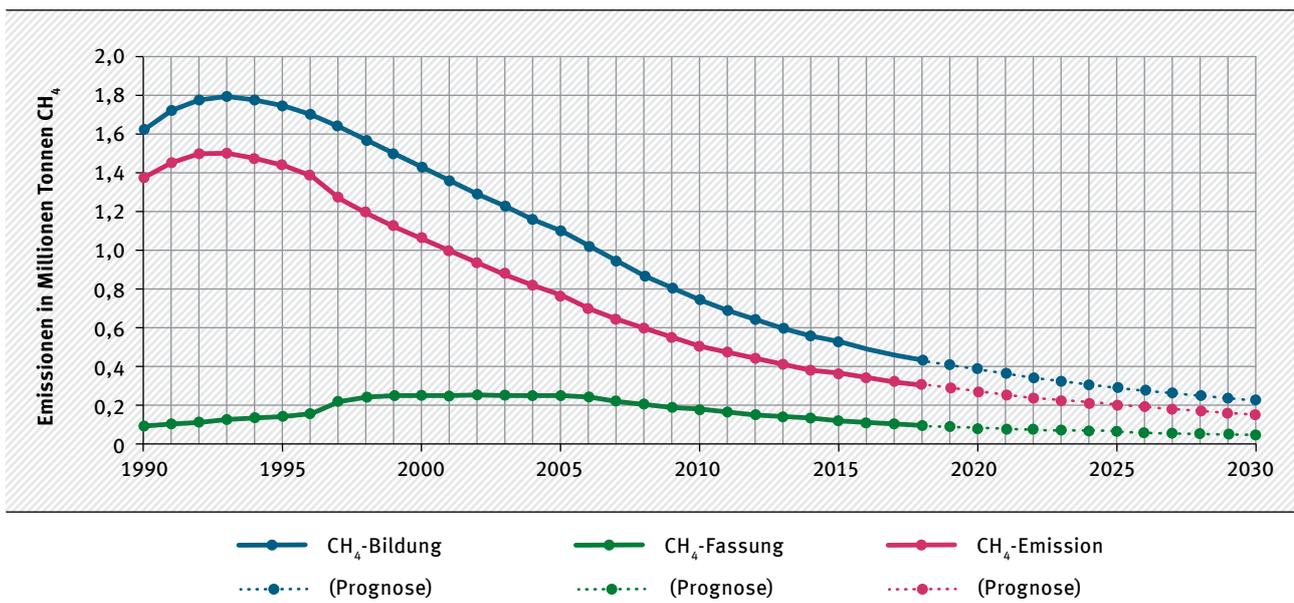
den Deponien. Dadurch konnte die Methanbildungsrate in den Deponien und damit einhergehend die Emissionen dauerhaft gesenkt werden. Die Gesetzesänderung wurde mehrere Jahre im Voraus angekündigt, so dass die Abfallwirtschaft Zeit hatte, auf die anstehende Transformation mit der Errichtung der notwendigen Behandlungsanlagen zu reagieren. Darüber hinaus konnte die Effizienz der Methangasfassung auf den Deponien verbessert werden. Dies zeigt auch die nachfolgende Abbildung 3.

Der Ausbau hin zu einer Kreislaufwirtschaft mit Abfalltrennung, Kompostierung und Biogasnutzung, mechanisch-biologischer Behandlung, Recycling und energetischer Verwertung der Abfälle hat maßgeblich dazu beigetragen, dass der Abfallsektor nicht nur Methan vermeidet, sondern auch Beiträge zum Klimaschutz in anderen Sektoren wie der Energiewirtschaft oder der Industrie leistet.

Mit zunehmender Vorbehandlung des biologisch abbaubaren Abfallanteils in Kompostierungs- und Vergärungsanlagen stellt jedoch auch diese Form der Abfallbehandlung weiterhin eine Quelle für unerwünschte Methanemissionen zum Beispiel bei unsachgemäßer Betriebsführung, durch anaerobe Rotteprozesse, offene Gärrestlager oder bei Betriebsstörungen dar.

Abbildung 3

**Methanemissionen aus Deponien**



Quelle: Umweltbundesamt

Darüber hinaus entsteht Methan durch die Abwasser- und Klärschlammbehandlung. Abwasser aus dem kommunalen Bereich besteht aus häuslichem Abwasser und Indirekteinleitungen der Industrie (etwa 30 Prozent bezogen auf die Einwohner- bzw. Einwohnergleichwerte) und wird im Allgemeinen in zentralisierten Kläranlagen in der Regel mittels des Belebtschlammverfahrens behandelt. Ein wesentlich geringerer Teil des Abwassers (etwa 3 Prozent bezogen auf die angeschlossenen Einwohnerwerte) wird in Kleinkläranlagen behandelt oder in abflusslosen Gruben bis zum anschließenden Abtransport und der Behandlung in einer Kläranlage gesammelt. Hauptquelle der auftretenden Methanemissionen im Abwasserbereich ist die Klärschlammbehandlung bzw. -faulung (Becker et al. 2012).

Als maßgebliche Gründe für die Reduktion der Methanemissionen im Bereich der Abwasserentsorgung sind die Erhöhung des Anschlussgrades an die öffentliche Kanalisation und Abwasserbehandlung (bedingt durch die Anforderungen der Europäischen

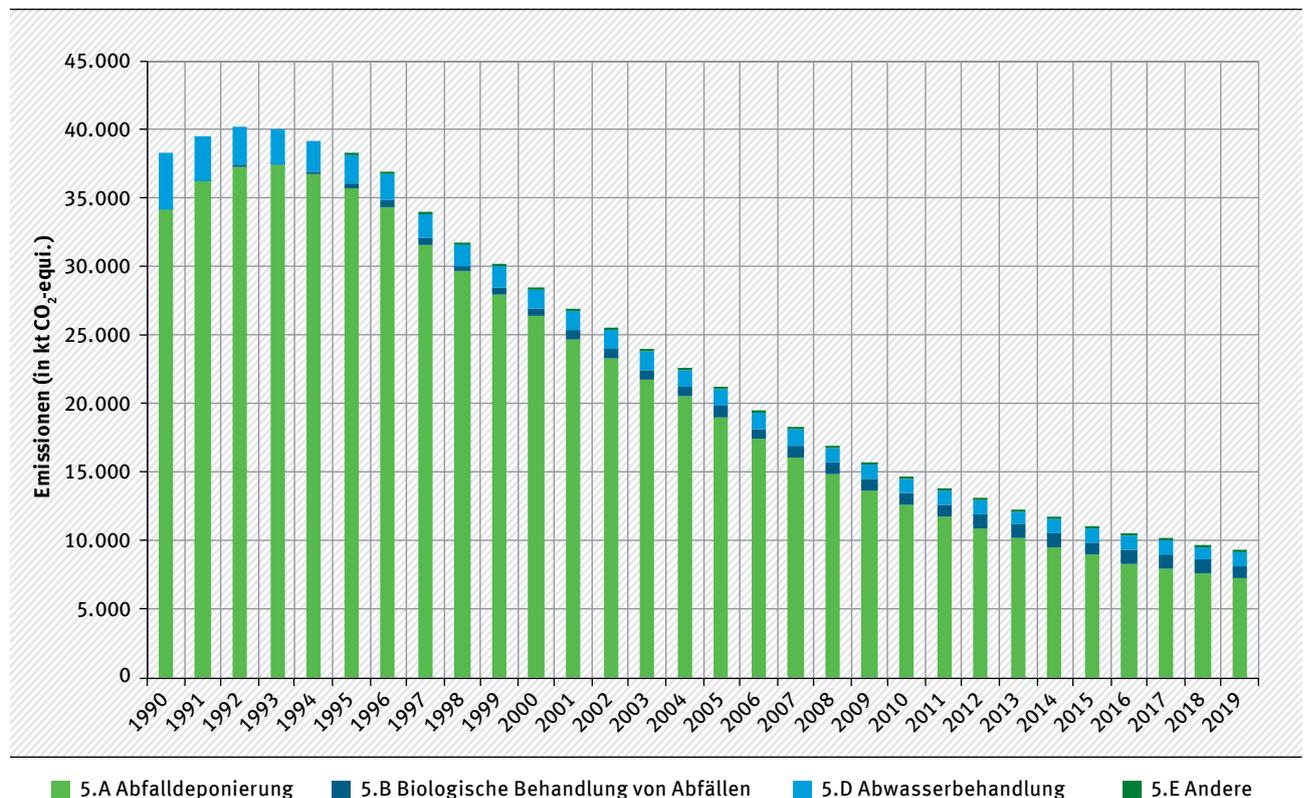
Kommunalabwasserrichtlinie (EU-RL 91/271/EWG)) und die Abschaffung der offenen Klärschlammfäulung zu nennen. Letztere wurde noch bis Anfang der 1990er Jahre in den Bundesländern der ehemaligen DDR praktiziert.

Für eine detailliertere Einschätzung der Methanemissionen aus der Abwasserbehandlung werden nach Einschätzung des UBA umfassende Messungen benötigt. Auf Basis dieser Messungen lassen sich auch spezifische Reduktionsmaßnahmen ableiten.

Die Abfall- und Abwasserwirtschaft zusammen emittierte im Jahr 2020 rund 8,9 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente hauptsächlich als Methan, davon stammen über 90 Prozent aus dem Abfallsektor. Die Emissionen reduzierten sich gegenüber dem Basisjahr 1990 um fast 79 Prozent. Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt die Anteile der Abfallwirtschaft und der Abwasserwirtschaft an den Gesamt-Emissionen des Sektors in Kilotonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten.

Abbildung 4

#### Jährliche Treibhausgasemissionen aus der Abfall- und Abwasserwirtschaft

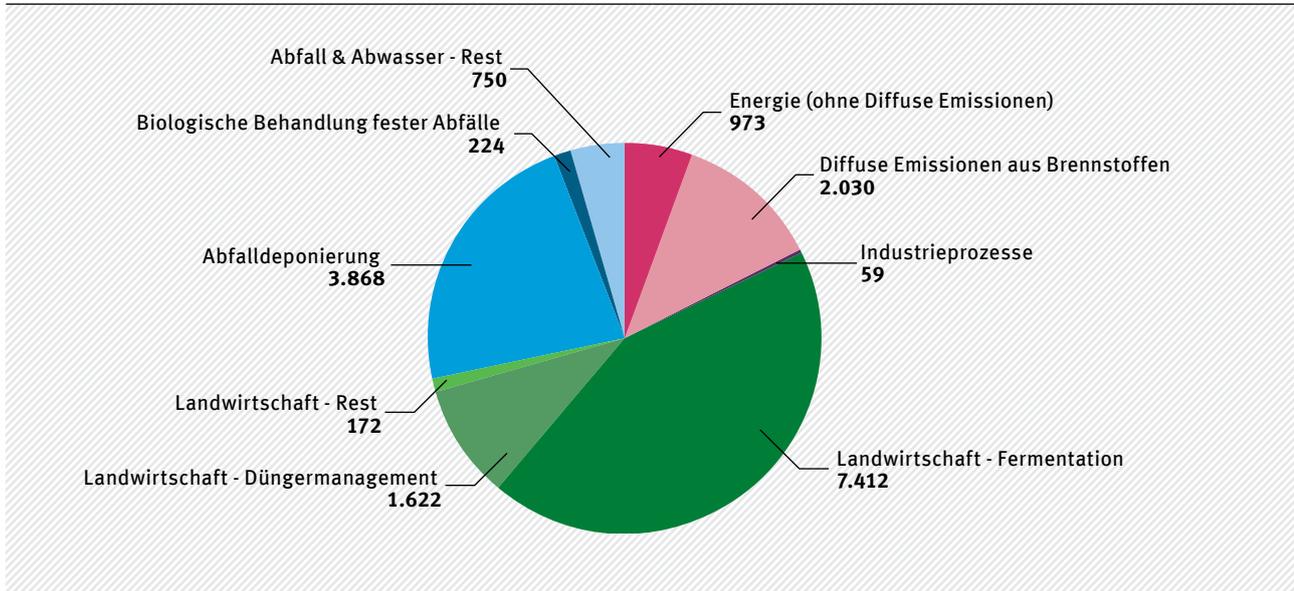


Quelle: Umweltbundesamt

### 2.3.2 Situation in Europa

Abbildung 5

#### Methanemissionen der Europäischen Union (inkl. UK) im Jahr 2019 in kt nach Kategorien der Berichterstattung\*



\* ohne Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (engl. land use, land use change and forestry, LULUCF) und nachrichtlich berichtete Daten

Quelle: eigene Darstellung, EuroStat Data Viewer - greenhouse gas emissions by source sector (Abfrage vom 21.07.2021)

#### 2.3.2.1 Energie

Europaweit zeigen die Methanemissionen ein ähnliches Bild wie in Deutschland. Im Energiebereich sind auch hier die Emissionen aus der Brennstoffumwandlung und -bereitstellung dominierend. Aber auch der Methanschluß, welcher durch unvollständige Verbrennung sowie durch Stopp- und Anfahrvorgänge von Motoren entsteht, spielt mit 30 Prozent eine Rolle. Während sich im Energiesektor insbesondere die Methanemissionen bei den stationären Feuerungen fast verdreifacht haben, was im Wesentlichen auf den Wechsel von der Verbrennung fester Brennstoffe zur Verfeuerung methanhaltiger gasförmiger Brennstoffe in Verbrennungsmotoranlagen zurückzuführen ist, haben sich die Emissionen bei der Brennstoffbereitstellung um über 70 Prozent reduziert. Hier spielt vor allem die zurückgehende Bedeutung des Steinkohlenbergbaus, aber auch die Modernisierung des Erdgasversorgungsnetzes eine wesentliche Rolle. Insgesamt sind die Methanemissionen im Energiebereich von über 7.800 Kilotonnen im Jahr 1990 um 61 Prozent reduziert worden.

#### 2.3.2.2 Industrie

Im Industriesektor ist mit über 82 Prozent auch europaweit die chemische Industrie der Hauptverursacher von Methanemissionen. Generell konnten die Emissionen um 19 Prozent reduziert werden, was im Wesentlichen auf die höheren Umweltstandards in den Mitgliedsstaaten zurückzuführen ist (UNFCCC 2021).

#### 2.3.2.3 Landwirtschaft

Mit über 9.200 Kilotonnen war die Landwirtschaft im Jahr 2019 die Hauptverursacherin der Methanemissionen in Europa. Neben der Nutztierhaltung und dem Wirtschaftsdüngermanagement (insgesamt rund 98 Prozent) hat auch der Nassreisanbau mit 200 Kilotonnen einen Anteil an diesen Emissionen (UNFCCC 2021). Gegenüber 1990 sind die Emissionen von Methan um über 20 Prozent gesunken (Welternährungsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) 2022). Vor allem im ersten Teil der 1990er Jahre kam es zu einer starken Reduktion (um mehr als 10 Prozent) durch die Abnahme der Tierbestände aufgrund des Strukturwandels in Osteuropa und durch einen effizienteren Umgang mit Wirtschaftsdüngern.

Beim Reisanbau gab es nur marginale Veränderungen. Am deutlichsten gesteigert haben sich die Emissionen durch Biogasanlagen in den vergangenen 20 Jahren, maßgeblich dominiert von Deutschland (UNFCCC 2021).

#### 2.3.2.4 Abfall-/Abwasserwirtschaft

Trotz einer Halbierung der Emissionen gegenüber 1990 bleibt der Sektor Abfall- und Abwasserwirtschaft mit über 4.800 Kilotonnen zweitgrößter Methan-Emittent in der EU (UNFCCC 2021). Ablagerungsverbote, Deponieschließungen und die Deponiegasfassung und -verwertung haben in einigen Mitgliedsländern maßgeblich zu einer Reduktion der Emissionen geführt. Aber in vielen EU-Mitgliedsstaaten bleibt die weiterhin hohe Deponierungsrate unbehandelter Abfälle der entscheidende Faktor für die insgesamt hohen Methanemissionen aus dem Sektor.

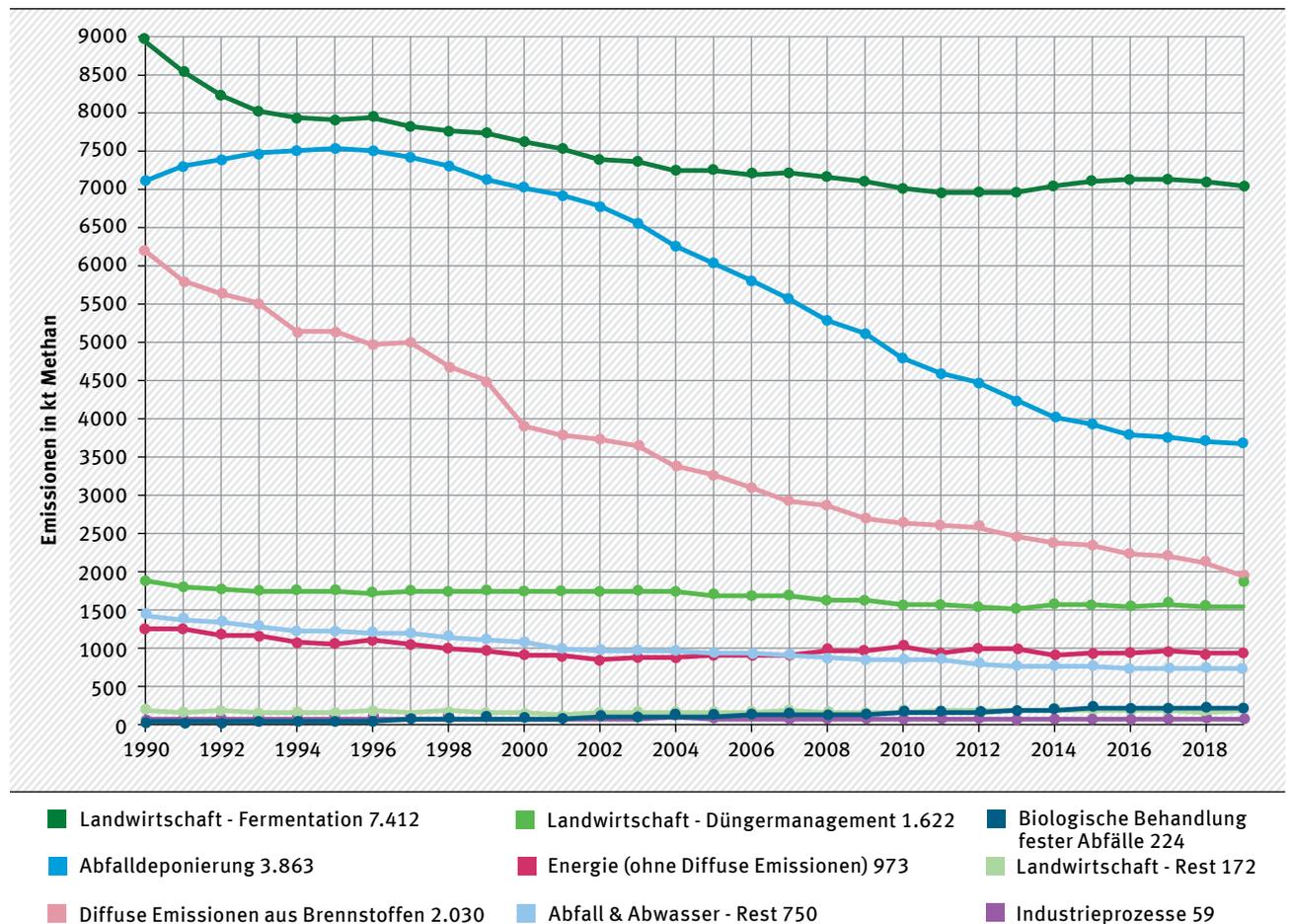
Die deutlich gestiegene Vorbehandlung des biologisch abbaubaren Abfallanteils in Kompostierungs- und Vergärungsanlagen stellt jedoch auch eine Quelle für unerwünschte Methanemissionen zum Beispiel bei unsachgemäßer Betriebsführung oder bei Betriebsstörungen dar, weshalb sich die Emissionen aus der biologischen Abfallbehandlung seit 1990 nahezu verzehnfachten.

Durch die Anpassung der Deponierichtlinie (EU-RL 1999/31/EG) im Rahmen des EU-Kreislaufwirtschaftspakets muss die Deponierung von Siedlungsabfällen bis 2035 auf 10 Prozent gesenkt werden. Dies wird entscheidend zur Reduktion der Methanemissionen aus dem Sektor beitragen, wobei in Prognosen zu berücksichtigen ist, dass einige Mitgliedsstaaten Fristverlängerungen beantragen können.

Abbildung 6

### Methanemissionen der Europäischen Union (inkl. UK)

nach Kategorien der Berichterstattung\*



\* ohne Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (engl. land use, land use change and forestry, LULUCF) und nachrichtlich berichtete Daten

Quelle: eigene Darstellung, EuroStat Data Viewer - greenhouse gas emissions by source sector (Abfrage vom 21.02.2022)

Bei der Abwasserbehandlung konnte durch technische Verbesserungen, aber auch durch den zunehmenden Anschluss von Anfallstellen des Abwassers an das Kanalnetz, in den vergangenen Jahren eine Reduktion der Methanemissionen von über 50 Prozent erreicht werden. Auch die zunehmende Verwertung von Klärschlamm und -gasen zur Energiegewinnung zeigt sich in den Daten deutlich.

Im Jahr 2019 trug die Deponierung mit 80 Prozent und die Abwasserbehandlung mit 15 Prozent zu den europäischen Emissionen bei (UNFCCC 2021).

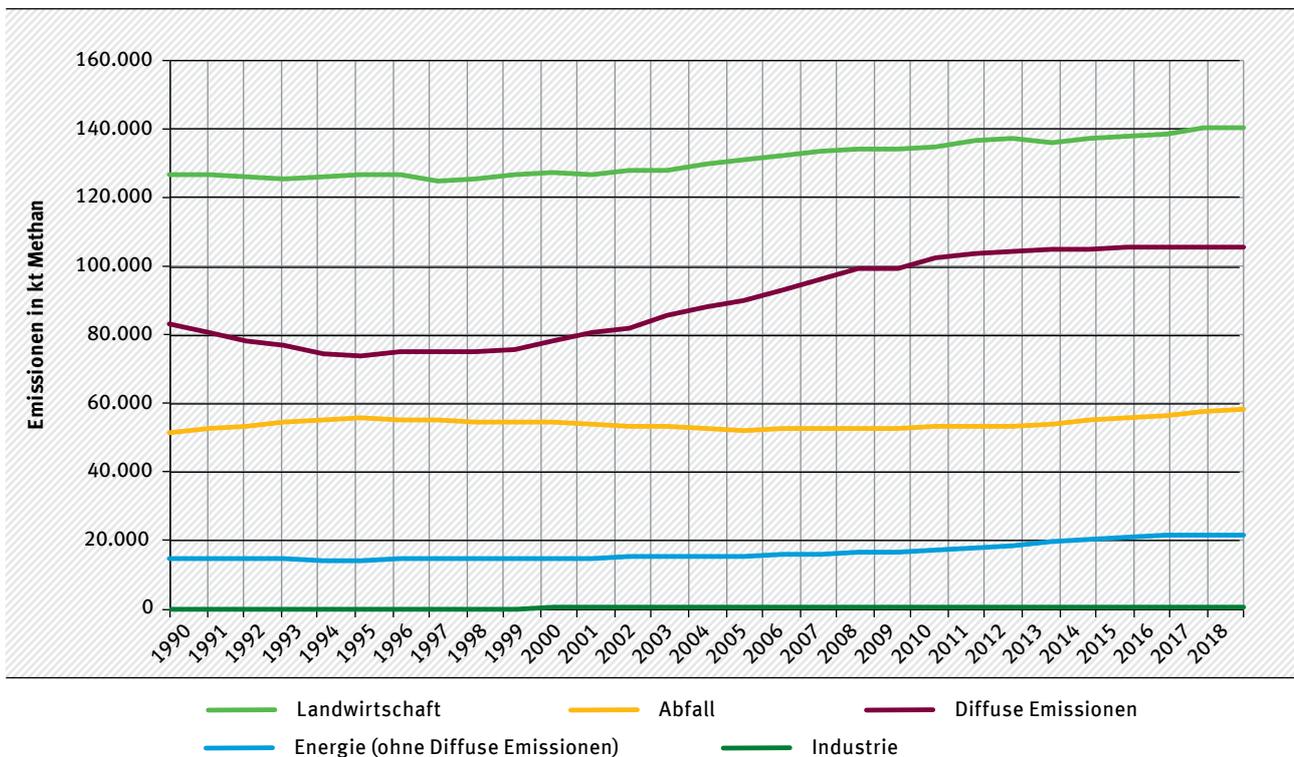
### 2.3.3 Situation weltweit

Etwa 60 Prozent der globalen Methanemissionen stammen aus anthropogenen Quellen (Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und CCAC 2021). Größter Emittent ist dabei die Landwirtschaft. Sie verursacht etwa 40 Prozent der weltweiten, vom

Menschen verursachten Methanemissionen. Etwa 35 Prozent der globalen anthropogenen CH<sub>4</sub>-Emissionen stammen aus der Gewinnung und dem Transport fossiler Brennstoffe und etwa 20 Prozent aus dem Abfall- und Abwassersektor, vor allem aus der Deponierung und der Abfallbehandlung (UNEP und CCAC 2021). Zwar spielen alle genannten Methanquellen in allen Regionen weltweit eine Rolle, es gibt allerdings deutliche regionale Unterschiede. Beispielsweise sind Methanemissionen aus der Kohleförderung vor allem in China relevant. CH<sub>4</sub>-Emissionen aus der Förderung und dem Transport von Öl und Erdgas entstehen vor allem im mittleren Osten, in Russland und in Nordamerika. Methan aus der Landwirtschaft, und hier vor allem aus der Nutztierhaltung, spielt in allen Regionen der Welt eine Rolle, besonders aber in Lateinamerika und Asien. CH<sub>4</sub>-Emissionen aus dem Reisbau stammen vor allem aus Südostasien (UNEP und CCAC 2021).

Abbildung 7

#### Methanemissionen weltweit nach Kategorien der Berichterstattung\*



\* ohne Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (engl. land use, land use change and forestry, LULUCF) und nachrichtlich berichtete Daten

Quelle: eigene Darstellung, Climatewatch - Historical GHG Emissions - Global Historical Emissions 1990-2018, CAIT dataset, Methan (Zugriff 08/2021)

### 2.3.3.1 Energie

Weltweit wird mit den Methanemissionen im Energiebereich unterschiedlich umgegangen, und einige wenige Länder haben Reduktionsmaßnahmen gesetzlich verankert. So setzen einige Staaten auf freiwillige Aktionen der Unternehmen, andere auf finanzielle Strafen bei Methanverlusten. Nachfolgend einige Beispiele dazu:

**Norwegen** hat als erstes Land eine Kohlenstoffsteuer eingeführt. Der Preis richtet sich unter anderem nach dem Emissionshandelspreis und steigt bis zum Jahr 2030 erheblich an. Im Jahr 2021 lag der Preis bei 590 Norwegischen Kronen (etwa 57 Euro) und soll kontinuierlich auf ca. 2.000 Norwegische Kronen (etwa 193 Euro) pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalente ansteigen. Die Methanemissionen aus der Bereitstellung fossiler Brennstoffe haben sich in Norwegen seit 1990 insgesamt kaum verändert und liegen jährlich bei etwa 21 Kilotonnen (Bioenergy International 2021; Norwegian Petroleum 2021). Für einen Öl- und Gasproduzenten ist dies ein vergleichsweise niedriger Wert (UNFCCC 2021).

**Russland** gehört ebenfalls zu den Ländern, die Gesetze zur Methanemissionsvermeidung verabschiedet haben. So werden Standards zur Emissionsvermeidung vom Energieministerium vorgegeben und vom Ministerium für Natürliche Ressourcen und Umwelt bei den Betreibern überprüft. Treten Emissionen an der Infrastruktur auf, muss eine Strafe gezahlt werden. Diese richtet sich nach der Emissionshöhe und -dauer. Allerdings sind die Höhen der Strafen mit 50 bis 1.250 Rubel pro emittierter Tonne (etwa 0,60 - 14,40 Euro, Umrechnung Stand August 2021 Finanzen.Net (2021)) vergleichsweise gering. Einige Regionen in Russland haben daher die Strafen deutlich erhöht (die Region Yamal zum Beispiel um einen Faktor 4), was dort zu erheblichen Investitionen in Techniken zur Emissionsvermeidung geführt hat (Evans und Roshchanka 2014). Die Methanemissionen sind in Russland seit 1990 im Energiebereich um 35 Prozent gesunken und lagen 2019 bei rund 6.900 Kilotonnen (UNFCCC 2021). Wesentlichen Einfluss hatten hier die Haushalte und Kleinverbraucher (80 Prozent) und der Strom- und Wärmesektor (32 Prozent). Die Förderung fossiler Brennstoffe ist im gleichen Zeitraum auch um 32 Prozent zurückgegangen, dominiert jedoch insgesamt mit 6.763 Kilotonnen den Energiesektor. Die Haupttreiber sind hierbei die Öl- und Gasförderung sowie der Transport von Erdgas mit jeweils rund 1.200 Kilotonnen Methan pro Jahr (UNFCCC 2021).

Auch die **USA** haben einen Plan zur Emissionsreduktion verabschiedet. So sollen nach einem 2015 beschlossenen Gesetz die Emissionen der Öl- und Gasproduzenten um 40 Prozent bis 2025 gegenüber 2012 gesenkt werden. Die Reduktionsmaßnahmen umfassen unter anderem eine Reihe von Standards zur Methanvermeidung durch eine verbesserte Lecksuche. Das Energiedepartment hat einen höheren Etat bekommen, um neue Standards zu entwickeln. Die Methanemissionen des Energiesektors sind mit 10.700 Kilotonnen im Jahr 2019 sehr hoch (The White House - Office of the Press Secretary 2015). 96 Prozent davon entfallen auf die Förderung und Bereitstellung fossiler Brennstoffe. Während sich die Emissionen der Kohleförderung seit 1990 fast halbiert haben, ist bei Öl und Gas nur ein leichter sinkender Trend zu erkennen (-16 Prozent); in den letzten Jahren sind die Emissionen dort eher steigend. Der Haupttreiber der Emissionen ist die Förderung von Erdgas (etwa 3.750 Kilotonnen), gefolgt von der Erdölförderung und dem Erdgastransport (je rund 1.500 Kilotonnen) (UNFCCC 2021).

**China** hatte bisher lediglich Methan aus Kohlegruben reguliert, jedoch mehr aus Sicherheits- und weniger aus Umweltgründen. Im Jahr 2021 wurde erstmals im Fünf-Jahres-Plan eine Regulierung der Methanemissionen im Energiesektor beschlossen (You 2021). Der größte Energielieferant, China National Petroleum Corporation (CNPC), hat sich selbst eine Reduzierung der Methanemissionen um 50 Prozent bis 2025 gegenüber 2017 auferlegt (Xu und Aizhu 2020). Insgesamt sind die Methanemissionen Chinas aus der Bereitstellung fossiler Brennstoffe von knapp 6.275 Kilotonnen im Jahr 1990 zunächst nur leicht, ab 2005 aber rasant auf 28.000 Kilotonnen bis 2015 gestiegen und fallen seitdem nur sehr leicht (Climate Watch 2021)<sup>3</sup>.

Die **Europäische Union (EU)** setzt im Rahmen des europäischen Grünen Deals, ähnlich wie die USA, auf Methanvermeidung durch eine verbesserte Lecksuche und unterstützt zudem das freiwillige Programm der „Oil and Gas Methane Partnership“ (OGMP)<sup>4</sup>. Außerdem forciert die EU eine unabhängige internationale Beobachterstelle im Rahmen des Umweltprogramms der Vereinten Nationen, die die gemeldeten Daten der

<sup>3</sup> Die angegebenen Daten sind in Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, wurden diese Daten durch das GWP-100 aus dem Assessment-Report 4 des IPCC von 25 dividiert

<sup>4</sup> Die Oil and Gas Methane Partnership ist eine Initiative der Climate and Clean Air Coalition unter Führung des UN-Umweltprogramms, die sich zum Ziel gesetzt hat, die Methanemissionen aus dem Energiesektor zu reduzieren.

Unternehmen der Erdgasbranche prüfen soll. Ein Legislativvorschlag der EU-Kommission vom Dezember 2021 soll die Mitgliedsstaaten dazu anhalten, eine verpflichtende Emissionsberichterstattung nach Maßstäben der OGMP umzusetzen (COM(2021) 805 final).

### 2.3.3.2 Industrie

Die prozessbedingten Methanemissionen im Industriebereich spielen weltweit eine untergeordnete Rolle. Der Trend ist allerdings steigend, insbesondere getrieben von Schwellenländern, vor allem China, seit den späten 1990er Jahren (Climate Watch 2021)<sup>5</sup>. Insbesondere der starke Ausbau der Petrochemie mit der Herstellung von Treibstoffen und chemischen Grundstoffen sowie, wenn auch zu einem geringen Teil, die Metallindustrie haben einen maßgeblichen Einfluss.

### 2.3.3.3 Landwirtschaft

Die Landwirtschaft verursachte im Jahr 2018 etwa 40 Prozent der weltweiten, vom Menschen verursachten Methanemissionen. Der größte Teil der landwirtschaftlichen Emissionen stammt auch hier aus der Nutztierhaltung aus enterischer Fermentation. Dieser Bereich und das Wirtschaftsdüngermanagement machen zusammen etwa 32 Prozent der weltweiten anthropogenen Methanemissionen aus. Der Reisanbau trägt weitere 8 Prozent dazu bei. Etwa 1 Prozent oder weniger ist auf die Verbrennung

landwirtschaftlicher Abfälle zurückzuführen (UNEP und CCAC 2021). Die Methanemissionen aus der Landwirtschaft stiegen kontinuierlich von rund 91.000 (1961) auf 140.000 Kilotonnen (2019) an (FAO 2022). In den Ländern der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) sanken sie in diesem Zeitraum - nach einem zwischenzeitlichen Hoch in den 1970er Jahren - insgesamt leicht auf rund 28.000 Kilotonnen. Dagegen verdreifachte sich die Methanemission der Gruppe der am wenigsten entwickelten Länder der Erde auf ungefähr 25.000 Kilotonnen, und stieg auch in Ländern mit einem deutlichen Wohlstandswachstum wie zum Beispiel China, Brasilien oder Indien an (ebd.). Der Hauptgrund sind die wachsende Weltbevölkerung und veränderte Ernährungsgewohnheiten. Letztere beinhalten einen steigenden Anteil tierischer Lebensmittel, besonders in den Ländern des Globalen Südens („Entwicklungs- und Schwellenländer“). Diese Entwicklungen führten zu einem Anwachsen der Tierbestände (UBA 2021). Die Zahl der Rinder und Büffel stieg so seit 1961 von 1,0 auf 1,7 Milliarden, die der Schafe und Ziegen von 1,3 auf 2,3 Milliarden an. Auch die weltweite Fläche mit Nassreisanbau wurde seit 1961 von 115 auf 162 Millionen Hektar ausgedehnt, um die immer weiter steigende Nachfrage nach Lebensmitteln zu bedienen (FAO 2022).



<sup>5</sup> Die angegebenen Daten sind in Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, wurden diese Daten durch das GWP-100 aus dem Assessment-Report 4 des IPCC von 25 dividiert.

### 2.3.3.4 Abfall und Abwasser

Nach Einschätzung der Climate and Clean Air Coalition ist der Abfall- und Abwassersektor für 20 Prozent der anthropogenen Methanemissionen verantwortlich (2005) und nach fossiler Brennstoffindustrie und Landwirtschaft der drittgrößte Methanemittent weltweit (UNEP und CCAC 2021).

Gerade im globalen Kontext ist die Abfallwirtschaft noch zu wenig entwickelt. Hier stellen die aus der Ablagerung von unbehandelten Siedlungs- und Gewerbeabfällen auf offenen Flächen und Deponien resultierenden Deponiegase die Hauptquelle der Methanemissionen dar. In fortschrittlichen Abfallwirtschaftssystemen trägt der Abfallsektor in geringerem Maße zu den Methanemissionen bei. Aufgrund technischer und ökonomischer Rahmenbedingungen können jedoch nur maximal 50 Prozent der Deponiegasemissionen wirkungsvoll gefasst und verwertet werden, so dass Deponien auch bei Fassung des Gases die Hauptmethanemittenten bleiben.

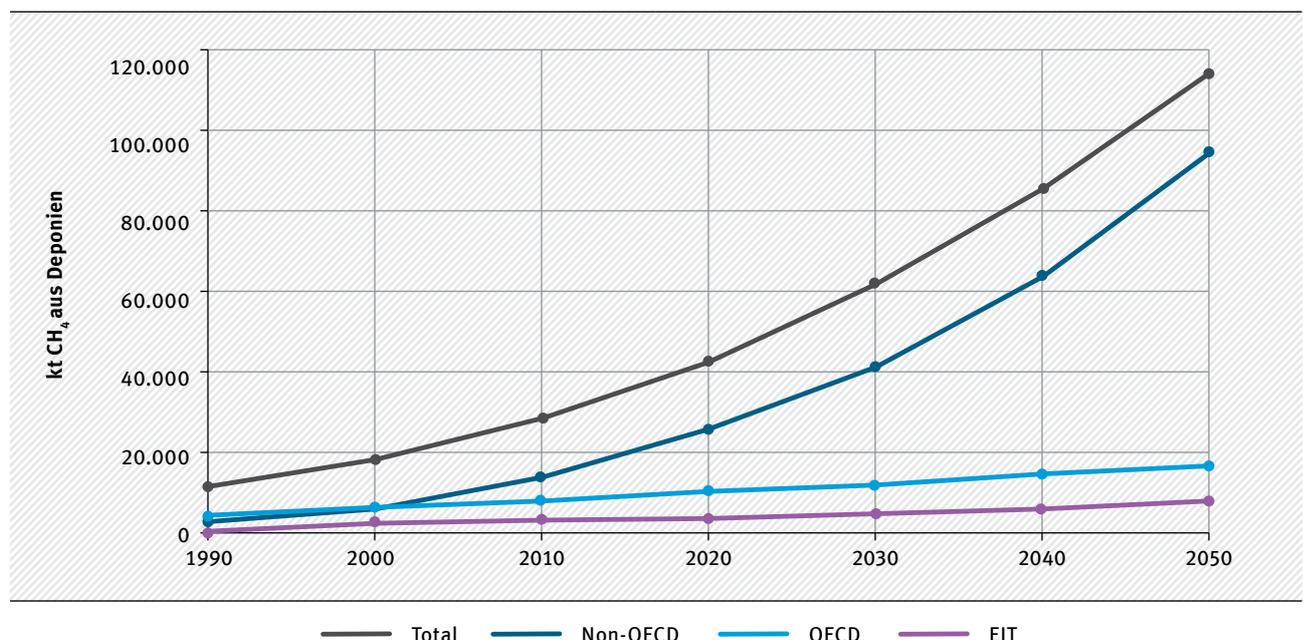
Wenn international keine Maßnahmen zum Ausbau einer klima- und ressourcenschonenden Abfallwirtschaft ergriffen werden, wird das jährliche globale Siedlungsabfallaufkommen von etwa 2 Milliarden Tonnen im Jahr 2016 auf etwa 3,4 Milliarden Tonnen im Jahr 2050 steigen, und der Abfallsektor würde damit 2050 etwa 2,6 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente emittieren (Kaza et al. 2018).

Monni et al. (2006) schätzen für die Nicht-OECD-Staaten eine deutliche Zunahme der Methanemissionen aus Deponien ab, wenn keine weiteren Maßnahmen ergriffen werden (siehe Abbildung 8). Dies zeigt die Bedeutung dieser Weltregionen für klimaschädliche Methanemissionen aus dem Abfallsektor.

Bezüglich der Abwasserbehandlung sind auf Grundlage der Erfahrungen in Deutschland Entwicklungen hin zu einer zentralisierten Behandlung und einer geschlossenen Klärschlammfäulung als sinnvoll anzusehen.

Abbildung 8

### Methanemissionen aus Deponien



Quelle: Monni et al. (2006)

## 3 Minderungsstrategien

### 3.1 Ziele zur Methanminderung

Bisher gibt es keine verbindlichen Minderungsziele für Methan. Methan wird nur indirekt über alle Klimagase in Form von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten betrachtet.

Im September 2021 initiierten die USA und die EU den "Global Methane Pledge" (CCAC 2021), eine Erklärung von Staaten, sich zu einer deutlichen Methanminderung zu verpflichten. Die Erklärung sieht vor, die Methanemissionen in den Unterzeichnerländern bis 2030 sektorübergreifend und kollektiv um mindestens 30 Prozent gegenüber 2020 zu senken. Dieses Ziel ist allerdings kein verbindliches Minderungsziel. Auch Deutschland hat den Global Methane Pledge im Oktober 2021 unterzeichnet.

Auch die CCAC formuliert in ihrer neuen Strategie (CCAC 2020) ein Minderungsziel für Methan: Bis 2030 ist eine 40-prozentige Minderung der globalen Emissionen gegenüber den Emissionen des Jahres 2010 zu erreichen. Auch dieses Ziel ist nicht verbindlich.

Zudem wird die Festlegung eines verbindlichen Minderungsziels für Methan im Zuge der Überarbeitung des Göteborg-Protokolls der Genfer Luftreinhaltkonvention und der im Jahr 2025 geplanten Novellierung der EU-NEC-Richtlinie (EU-RL 2016/2284) diskutiert. Das Umweltbundesamt befürwortet ein solches Minderungsziel unter der Voraussetzung, dass vor der Festlegung einer Minderungsverpflichtung eine fundierte Wirkungsbewertung mithilfe aktueller Daten durchgeführt wird.

### 3.2 Maßnahmen zur Minderung von Methan

Aktuelle Daten zeigen, dass etwa 95 Prozent der globalen Methanemissionen aus Quellen außerhalb Europas stammen (COM(2020) 663 final). Deutschland und die EU sind allerdings durch Erdgasimporte indirekt an den Methanemissionen in Erdgas-exportierenden Ländern beteiligt. Auch methanintensive Lebensmittel werden importiert: Nach verschiedenen EU-Ländern ist Südamerika die zweitwichtigste Quelle für importiertes Rindfleisch und Asien für Reis und Reisprodukte. Das meiste Schafffleisch wird aus Neuseeland importiert (Vereinte Nationen (UNO) 2021). Um die globalen Methanemissionen zu reduzieren, ist eine weltweite Kooperation unerlässlich. Deutschland sollte sich hier engagieren,

internationale Projekte finanziell fördern, Partnerschaften eingehen und andere Staaten durch einen Wissenstransfer unterstützen.

#### 3.2.1 Energiewirtschaft und Industrie

Weltweit liegen große Potenziale zur Minderung von Methan im Energiesektor. Vor allem bei der Gewinnung und Verteilung fossiler Brennstoffe sind leicht umzusetzende und kosteneffiziente Methan-Minderungsmaßnahmen wie die Beseitigung von Leckagen in der Erdgasinfrastruktur vorhanden. Methanemissionen aus Feuerungsanlagen lassen sich zudem durch technische Maßnahmen reduzieren. Grundsätzlich ist aber eine Transformation des gesamten Energiesystems und ein Ausstieg aus allen fossilen Energieträgern notwendig, um eine deutliche Minderung der Methanemissionen zu erreichen.

##### 3.2.1.1 Gewinnung und Verteilung von Brennstoffen

In Deutschland sind die Methanemissionen aus der Gewinnung und Verteilung von Brennstoffen durch die Einstellung des Steinkohlebergbaus, die Erneuerung des Erdgasnetzes und die energetische Nutzung des Grubengases in den vergangenen Jahren deutlich zurückgegangen.

Um Fortschritte und Problemfälle schnell entdecken und quantifizieren zu können, spricht sich das Umweltbundesamt für eine häufigere regelmäßige Begleichung, Überprüfung und Emissionsquantifizierung der Gasinfrastruktur (Leak Detection And Repair (LDAR)) aus. Ferner unterstützt das Umweltbundesamt die im Forschungsbericht des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches (DVGW) aufgezeigten Maßnahmen zur Emissionsreduzierung (Große und Köllmer 2019) ausdrücklich. Darüber hinaus hat die Oil and Gas Methane Partnership umfangreiche technische Dokumente dazu veröffentlicht, an welcher Stelle Emissionen auftreten und wie diese quantifiziert und vermieden werden können (CCAC 2017). Das Umweltbundesamt begrüßt diese Arbeiten und wünscht sich ein europaweit einheitliches Reporting nach diesen Standards.

Im Transportnetz wurden in den Jahren 2020 und 2021 umfangreiche Messungen an der Infrastruktur durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass an 0,5 Prozent der gemessenen Leckagen über 90 Prozent der

Gesamtemissionen auftraten. Die Erdgastransportunternehmen planen, bis Ende des Jahres 2025 die Methanemissionen für das gesamte deutsche Netz um 50 Prozent bezogen auf das Jahr 2015 zu reduzieren (Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. 2021). Das Umweltbundesamt spricht sich für eine regelmäßige Begutachtung der Infrastruktur, insbesondere der stark emittierenden Anlagenteile, und eine zügige Behebung von Leckagen aus.

### 3.2.1.2 Technische Anpassungen bei Anlagen und der Nutzung von Brennstoffen

Insbesondere bei der Nutzung von gasförmigen Brennstoffen (darunter Erdgas, Biogas, Biomethan, Deponiegas und Klärgas) in Verbrennungsmotoren wird der Brennstoff nicht vollständig verbrannt. Ein kleiner Teil des Brennstoffes, der bei Erdgas zu über 90 Prozent und bei Biogas, Klärgas und Deponiegas zu großen Teilen aus Methan besteht, entweicht unverbrannt in die Atmosphäre. Wegen des hohen Treibhausgaspotenzials von Methan stellt der sogenannte Methanschluß ein Problem für alle Verbrennungsmotoranlagen mit methangashaltigen Brennstoffen dar.

Wesentliche Quellen für unverbrannte Methanemissionen sind bei Gasmotoren der Schluß während der Ventilüberschneidung, Fehlzündungen, das Verlöschen der Flamme an Wänden und Brennraumspalten (Quenching) sowie die unvollständige Verbrennung insbesondere bei inhomogenen Brennstoffgemischen (de Zwart et al. 2012). Wichtige Einflussgrößen auf die Methanemissionen im Abgas sind die Überschneidungen der Einlass- und Austrittszeiten der Ventile, die Brennraumgeometrie, das Brennstoff-Luftverhältnis und die Brennraumtemperatur.

Lambda-1-Motoren, welche den Brennstoff stöchiometrisch verbrennen, sind in der Regel mit 3-Wege-Katalysatoren ausgestattet und weisen niedrigere Methanemissionen auf als Mager- und Zündstrahlmotoren, welche den Brennstoff mit Luftüberschuss verbrennen. Das zeigt sich u. a. in den unterschiedlichen Emissionsgrenzwerten der 44. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (44. BImSchV). Der Emissionsgrenzwert der 44. BImSchV für Mager- und Zündstrahlmotoren in Höhe von 1,3 Gramm Gesamtkohlenstoff je Normkubikmeter Abgas gilt für Erdgasmotoren ab 2025 und ist voraussichtlich durch eine rein motorische Minderung realisierbar. Der Emissionsgrenzwert der 44. BImSchV für Lambda-1-Motoren in Höhe von

0,30 Gramm je Kubikmeter ist durch den Einsatz eines 3-Wege-Katalysators einhaltbar. Da Lambda-1-Motoren meist niedrigere elektrische Wirkungsgrade aufweisen als Magermotoren, können die CO<sub>2</sub>-Emissionen pro erzeugter Menge Energie höher sein als beim Magermotor. Bei einem Vergleich beider Techniken müssen die Treibhausgasemissionen als CO<sub>2</sub>-Äquivalente verglichen werden. Forschungsarbeiten zu diesem Thema hat unter anderem die Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden durchgeführt (Trötsch et al. 2022).

Da die Methanemissionen bei allen Gasmotortypen aus Sicht des Klimaschutzes unangemessen hoch sind, kommt den Verfahren zur methanspezifischen Abgasreinigung eine hohe Bedeutung zu. Für Magermotoren kann durch Abgasreinigungstechnik mittels Oxidationskatalysatoren eine Reduzierung der Methanemissionen erreicht werden. Im Abgas enthaltene gasförmige Kohlenwasserstoffe werden dabei zu Kohlenstoffdioxid und Wasser oxidiert. Die effektive Minderung von Methan erfordert insbesondere hohe Abgastemperaturen im Bereich um etwa 550 Grad Celsius. Für Lambda-1-Motoren können 3-Wege-Katalysatoren im Hinblick auf die Minderung von Methan weiterentwickelt werden. Bisher sind beide Abgasnachbehandlungstechniken nicht marktreif, da wegen eines bisher fehlenden anspruchsvollen Methangrenzwertes kein Anreiz zur Entwicklung besteht. Zum erreichbaren Minderungspotenzial sind daher derzeit keine quantitativen Aussagen möglich.

Eine Reduzierung auf Werte, wie sie im Abgas von Kohlekraftwerken gemessen werden (um und unter 10 Milligramm je Kubikmeter bei 6 Prozent Sauerstoff (O<sub>2</sub>)), könnte derzeit nur mittels einer thermischen Nachverbrennung erreicht werden. Thermische Nachverbrennungsanlagen werden hauptsächlich in Bereichen eingesetzt, bei denen hohe Gehalte organischer Verbindungen in der Abluft vorzufinden sind. Hierbei werden bei Temperaturen zwischen 650 und 820 Grad Celsius die in der Abluft enthaltenen brennbaren Stoffe oxidiert. Die Beständigkeit der thermischen Nachverbrennung gegenüber Katalysatorgiften wie Chlor- und Schwefelverbindungen ist ein Vorteil dieses Abgasreinigungsverfahrens. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass es mit einer flexiblen Fahrweise der Anlagen, mit teilweise wenigen Stunden pro Tag, wegen der kontinuierlichen Bereitstellung der hohen Temperaturen in der thermischen Nachverbrennungsanlage nicht vereinbar ist.

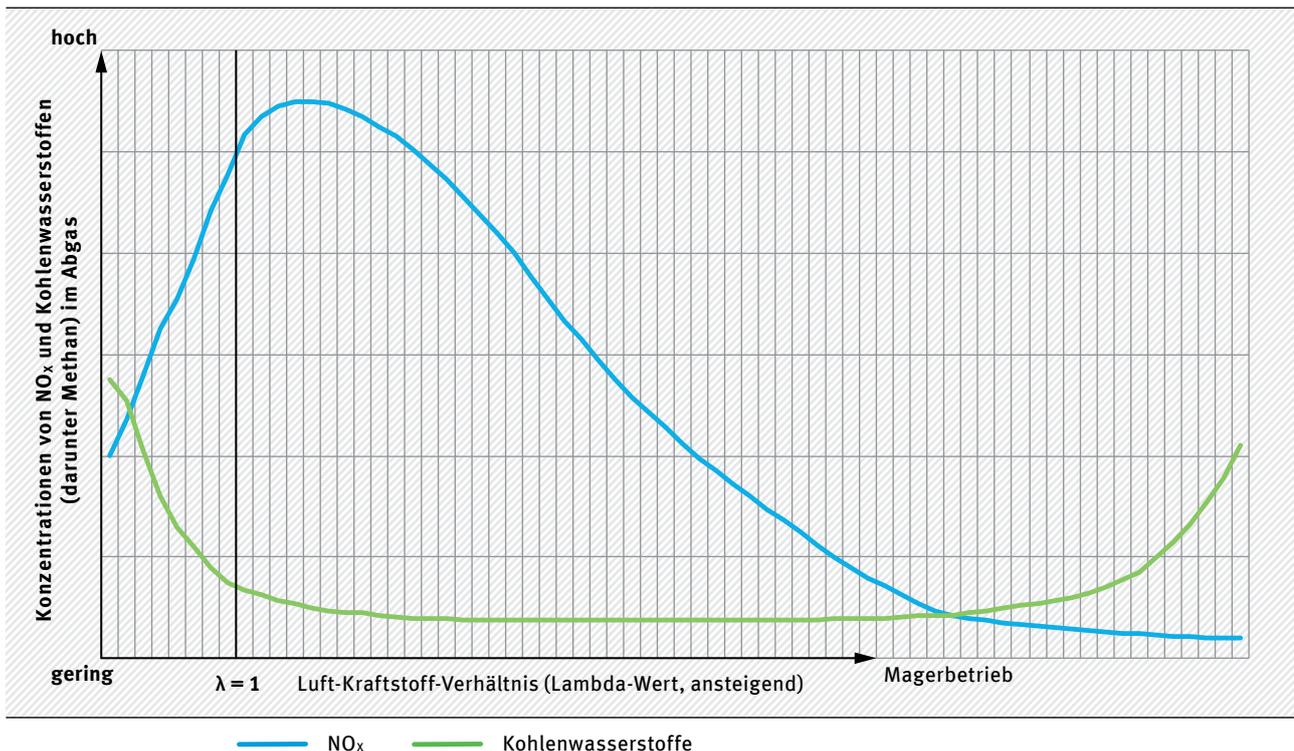
Weiter erfordert die Technik hohe Investitionskosten sowie gegebenenfalls die Zugabe von weiterem Brennstoff, um die Betriebstemperaturen der thermischen Nachverbrennung zu erreichen (Böhm et al. 2010). Hinzu kommt, dass der Platzbedarf für die Einrichtungen zur thermischen Nachverbrennung nach derzeitigem Kenntnisstand hoch ist. Gerade im Falle von großen Verbrennungsmotoranlagen mit ihren großen Abgasvolumenströmen dürfte der zusätzliche Platzbedarf, aber auch die mit dem Verfahren verbundenen zusätzlichen Investitionskosten den Einsatz dieses Verfahrens erheblich erschweren. Insgesamt wird daher die Technik der thermischen Nachverbrennung für Verbrennungsmotoranlagen zurzeit nur in Nischenanwendungen wie Deponiegasmotoren angewendet. Eine leistungsfähige Abgasreinigung ist folglich zügig zu entwickeln und die Methan-Grenzwerte sind daran anzupassen. Diese Technik ist einerseits während einer Übergangszeit, in der noch Erdgas-Blockheizkraftwerke (BHKW) in Betrieb sind, zur Minderung der Treibhausgasmissionen erforderlich. Andererseits wird methanspezifische Abgasreinigungstechnik auch bei der Nutzung von Biometan, Biogas oder methanhaltigem Power to Gas (PtG) in Verbrennungsmotoren benötigt, da andernfalls

die Methanemissionen so hoch sind, dass Klimaneutralität nicht erreicht werden kann. Der Einsatz einer Abgasreinigung sollte auch verhindern, dass der Ersatz von Kohlekraftwerken durch Gasmotoranlagen wie bisher mit erhöhten Methanemissionen einhergeht. Diese Methanemissionen schmälern den Vorteil der Erdgasfeuerungen gegenüber Kohlefeuerungen im Hinblick auf die Klimagasemissionen um etwa ein Drittel, wenn eine Erdgas-Verbrennungsmotoranlage den Emissionsgrenzwert der 44. Bundes-Immissionsschutzverordnung für Gesamt-Kohlenstoff (als Indikator für Methan) ausschöpft.

Solange Katalysatoren zur Minderung von Methan noch nicht marktreif sind, können die Emissionen von Mager- und Zündstrahlmotoren nur mit motorischen Maßnahmen gemindert werden. Dabei kommt dem Zusammenspiel der Emissionen von Stickstoffoxiden ( $\text{NO}_x$ ) und Methan eine besondere Bedeutung zu. Motoren, die Methan und Stickstoffoxide rein motorisch (ohne Abgasnachbehandlung) mindern, arbeiten zum Zweck der  $\text{NO}_x$ -Minderung bei hohem Luftüberschuss. Ab einem bestimmten Luftüberschuss steigt jedoch die Methanemission (siehe Abbildung 9).

Abbildung 9

**Typische Verläufe der Emissionen ( $\text{NO}_x$  und Kohlenwasserstoffe) in Abhängigkeit vom Lambda-Wert**



Quelle: UBA, Eigene Darstellung

Dieses Problem kann sich auf besondere Art und Weise bei Verbrennungsmotoren stellen, die zu einem späteren Zeitpunkt auf (aus regenerativem Strom erzeugten) Wasserstoff umstellen möchten (H<sub>2</sub>-ready-Geräte). Da Wasserstoff heißer verbrennt als Erdgas, sind auch die NO<sub>x</sub>-Emissionen höher als bei der Verbrennung von Erdgas. Eine rein motorische Minderung von NO<sub>x</sub> hätte zur Folge, dass der Motor bei noch höherem Luftüberschuss betrieben würde. Im „vorübergehenden“ Erdgasbetrieb könnten dann höhere Methanemissionen entstehen als bei einem nicht wasserstoffgeeigneten Erdgasmotor.

Es muss darauf geachtet werden, dass H<sub>2</sub>-ready-Geräte beim Betrieb mit Erdgas (solange, wie Wasserstoff noch nicht zur Verfügung steht) nicht mehr Methan emittieren als auf Erdgas ausgelegte Geräte. Das betrifft vor allen Dingen Verbrennungsmotoranlagen. Um dies zu gewährleisten, sind folgende gesetzgeberische Maßnahmen erforderlich:

- ▶ Einführung eines Methan-Emissionsgrenzwerts für Verbrennungsmotoranlagen in der EU-Richtlinie über mittelgroße Feuerungsanlagen
- ▶ Einführung eines Methan-Emissionsgrenzwerts für kleine Verbrennungsmotoranlagen (< 1 Megawatt Feuerungswärmeleistung) im Rahmen einer nationalen Bundes-Immissionsschutzverordnung.

Da auch in einem „treibhausgasneutralen“ Deutschland methanhaltige Brennstoffe wie Gas aus PtG, Biogas oder Deponiegas weiterhin eine (wenn auch kleine) Rolle spielen sollen, müssen die Methanemissionen aus stationären Verbrennungsmotoranlagen durch Abgasreinigung weiter reduziert werden. Hierzu ist Forschung und Entwicklung erforderlich.

Magermotoren, die eine Abgasreinigung (in Form einer Selektiven Katalytischen Reduktion (kurz SCR)) zur Minderung der Stickstoffoxide einsetzen, können bei weniger Luftüberschuss betrieben werden; damit entstehen auch weniger Methanemissionen als bei einer rein motorischen NO<sub>x</sub>-Minderung bei höherem Luftüberschuss. Ein Vorteil dieser Variante ist auch der höhere elektrische Wirkungsgrad. In vielen Fällen können Betreiber die SCR allein durch die höheren Stromerlöse finanzieren.

Die geltenden NO<sub>x</sub>-Emissionsgrenzwerte der EU-Richtlinie 2015/2193 über mittelgroße Feuerungsanlagen für Verbrennungsmotoranlagen mit gasförmigen Brennstoffen können mit rein motorischen Maßnahmen, für neue Erdgasmotoranlagen nur mit einer sehr mageren Verbrennung („enhanced lean burn“) eingehalten werden. Da die EU-Richtlinie keine Emissionsgrenzwerte für Methan enthält, ist zu vermuten, dass die Methanemissionen solcher Anlagen hoch sind.

Zur Minderung sowohl der NO<sub>x</sub>- als auch der Methanemissionen muss folglich ein Methan-Grenzwert in die EU-Richtlinie über mittelgroße Feuerungsanlagen (EU-RL 2006/123/EG) aufgenommen werden; gleichzeitig ist der NO<sub>x</sub>-Grenzwert dahingehend zu senken, dass er nur mit Abgasreinigung, also mit SCR eingehalten werden kann. In Deutschland ist dies sowohl für Großfeuerungsanlagen (13. BImSchV) als auch für mittelgroße Feuerungsanlagen (44. BImSchV) bereits der Fall. Für Anlagen unter 1 Megawatt Feuerungswärmeleistung sind bundesweit gültige Emissionsgrenzwerte noch einzuführen.

### 3.2.1.3 Sektorübergreifende Transformation der Energieversorgung

In unserem heutigen Wirtschaftssystem kommt Gas, vornehmlich Erdgas, in nahezu allen Anwendungsbereichen vor: insbesondere für die Raum- und Prozesswärmeversorgung, in der chemischen Industrie, in der Stromversorgung bis hin zur Mobilität in erdgasbetriebenen Fahrzeugen<sup>6,7</sup>. Um den Klimawandel erfolgreich zu begrenzen, ist eine Transformation weg von fossiler Energie hin zu erneuerbaren Energien unausweichlich. Oberste Prämisse im Sinne des Vorsorgeprinzips ist es, Treibhausgasemissionen zu vermeiden und gleichzeitig die Nutzung und den Verbrauch von Ressourcen und alle negativen Umwelteffekte möglichst gering zu halten. Dazu sind viele Veränderungen in Wirtschaft und Gesellschaft notwendig – sowohl bei der Nachfrage nach Energie und Gütern als auch bei deren Produktion. Um Energie und natürliche Ressourcen effizient einzusetzen, müssen überall, wo es technisch möglich ist, erneuerbare Energien, insbesondere erneuerbarer Strom, direkt

6 Erdgas wird seit einigen Jahren als ein alternativer Kraftstoff vor allem auch im Straßengüterfernverkehr diskutiert. Trotz eines gewissen Wachstums ist der Anteil an den neuzugelassenen Lkw jedoch absolut noch gering. Aktuell ist unklar, ob bzw. wie lange sich dieser Trend fortsetzen wird.

7 Auch im Seeverkehr wird von einigen Akteuren die Nutzung von verflüssigtem Erdgas vorangetrieben, wobei unklar ist, ob bezogen auf die Kraftstoffbedarfe relevante Anteile erreicht werden können.

genutzt werden. Über die Nutzung von erneuerbarem Strom und Synthesen mittels Power to Gas-Techniken kann unter hohen Energieverlusten ein synthetisches erneuerbares Gas (synthetisches Methan) bereitgestellt werden (Purr et al. 2016; 2019). Biomethan steht aus Ressourcen- und Klimaschutzgründen nur in begrenztem Umfang zur Verfügung, beispielsweise können nicht stofflich nutzbare biogene Abfall- und Reststoffe zur Bereitstellung biogener Gase genutzt werden. Der wesentliche Anteil des zukünftigen Gasbedarfes wird mittels Power to Gas (PtG) erzeugt werden müssen. Brennstoffe sind in einem nachhaltigen, vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Energiesystem ein wertvolles Gut und sollten nur dort zum Einsatz kommen, wo dies technisch nicht anders möglich ist. Denn je mehr Energie – auch in Form von Gas – wir benötigen, desto mehr Photovoltaik- und Windenergieanlagen für die Stromerzeugung und damit auch mehr Ressourcen benötigen wir für deren Bereitstellung.

Mit den Strategien einer solchen nachhaltigen Transformation des Energie- und Wirtschaftssystems werden die Gasbedarfe und folglich auch die dabei verursachten Methanemissionen deutlich sinken. So zeigt das Umweltbundesamt in seiner Studie „Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE“ (Purr et al. 2019), wie der Gasbedarf bis zur Treibhausgasneutralität auf bis zu 140 Terawattstunden sinken kann<sup>8</sup>.

Zentral dabei ist die Umstellung der Raumwärmerversorgung. Generell gilt es, die vorhandenen, sehr hohen Energieeffizienzpotenziale möglichst schnell zu heben und die Energienachfrage zu senken. Zwar ist es technisch möglich, erneuerbares Gas, synthetisches Methan oder Wasserstoff für das Heizen von Gebäuden in Brennstoffzellen oder auch Heizkesseln einzusetzen, jedoch gibt es ausreichend brennstofffreie Alternativen aus erneuerbaren Energien wie Solarthermie, Geothermie, Umweltwärme (mit Wärmepumpen) und unvermeidbare Abwärme. Wärmepumpen sind energieeffizienter und ersetzen aus der gleichen Einheit an erneuerbarem Strom etwa drei Einheiten fossile Brennstoffe. Heizen mit synthetischem Methan oder Wasserstoff wird dementsprechend deutlich teurer werden – und nach heu-

tigem Kenntnisstand mittel- bis langfristig zwei- bis dreimal so hohe Energiekosten verursachen wie das Beheizen mit einer Wärmepumpe. Das Umweltbundesamt empfiehlt, den Brennstoffeinsatz in Gebäuden zu beenden. Konkret sollen möglichst schnell keine Öl-Heizungen mehr installiert werden. Vor dem Hintergrund der Ambitionssteigerung im Klimaschutz sollten außerdem spätestens ab 2026 auch keine neuen Gasheizungen mehr installiert werden. Vor dem Hintergrund der Nutzungszyklen sollte so der Ausstieg aus gasbasierten Heizungen bis 2045 gelingen (Purr et al. 2021).

Was für Häuser mit eigener Heizung gilt, müssen auch Wärmenetze erfüllen: Sie müssen bis 2045 auf treibhausgasneutrale Energieträger umgestellt werden. Auch hier gilt es, den Brennstoffwechsel hin zur direkten Nutzung von erneuerbarem Strom und Umweltwärme zu realisieren, beispielsweise durch effiziente Kombinationen aus Solarthermie und Umweltwärme mit Großwärmepumpen sowie Blockheizkraftwerken. Für Letztere wird dann erneuerbarer Wasserstoff oder synthetisches Methan benötigt. Wird Wasserstoff statt synthetischen Methans als Brennstoff genutzt, können die diffusen Methanemissionen, die beim Transport von Methan und beim Betrieb von BHKW anfallen, vermieden werden. Wasserstoff weist nur etwa ein Fünftel der Klimawirkung von Methan auf und ist damit beim Austritt durch Undichtigkeiten in die Atmosphäre klimafreundlicher. Auch hier werden bereits die Weichen gestellt, beispielsweise durch den KWK-Innovationspiloten im Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG 2020) oder wie in der nationalen Wasserstoffstrategie die angekündigte Förderung von „Wasserstoff-Readiness“-KWK-Anlagen (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2020). Gleichwohl sind Undichtigkeiten an sich, unabhängig davon, ob Methan oder Wasserstoff entweicht, durch technische Maßnahmen und engmaschige Überwachung immer auf ein Minimum zu begrenzen.

Auch in der Industrie und im Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungsbereich (GHD) wird unter den Prämissen einer vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung methanhaltiges Gas in deutlich geringerem Umfang als heute zum Einsatz kommen (Purr et al. 2019). Heute wird in einer Vielzahl von Produktionsprozessen Gas zur Wärmebereitstellung genutzt. Eine Dekarbonisierung dieser Prozesswärmeversorgung sollte, soweit möglich, in erster Linie durch die Elektrifizierung erfolgen. Im niedrigen

<sup>8</sup> Szenario GreenSupreme. Werden Energieeffizienzmaßnahmen und Maßnahmen zur effizienten Sektorkopplung nicht konsequent umgesetzt oder verschleppt, liegt der Gasbedarf höher. Beispielhaft ist hier das Szenario GreenLate mit langfristig rund 330 Terawattstunden zu nennen.

bis mittleren Temperaturbereich ist dies sehr effizient durch Wärmepumpen möglich. Die Elektrifizierung von Hochtemperaturprozessen (zum Beispiel Wärmeöfen zur Stahlvergütung, Glasschmelzwannen) hingegen muss nach derzeitigem Kenntnisstand durch eine direktere Verwendung von elektrischer Energie (zum Beispiel Widerstandsbeheizung oder Lichtbogen) erfolgen. In einigen Bereichen ist die Elektrifizierung nicht oder nur unter sehr hohen technischen Aufwänden möglich, beispielsweise bei besonderen Anforderungen an die Ofenatmosphäre oder bei sehr hohen benötigten Temperaturen (> 1.600 Grad Celsius). Hier kommen dann erneuerbare synthetische Brennstoffe (Wasserstoff und Methan) zum Einsatz.

Die direkte Verwendung von Strom ist auch im Verkehr die effizienteste Lösung und daher zu priorisieren. Bereits heute spielt Erdgas nur eine untergeordnete Rolle in diesem Anwendungsbereich. Die wissenschaftlichen Studien und Szenarien für die Zukunft geben keinerlei Hinweise, dass sich dies ändern wird. Synthetisches Methan oder biogene Gase aus Rest- und Abfallstoffen werden voraussichtlich keine Relevanz bei der Verkehrswende einnehmen.

Zentrales Fundament für eine Transformation der Energieversorgung ist eine schnelle Dekarbonisierung der Stromversorgung mit einem ambitionierten Ausbau der erneuerbaren Energien. Die Pläne der Bundesregierung, die einen Anteil erneuerbarer Energien von 80 Prozent am Bruttostromverbrauch bis zum Jahr 2030 erreichen wollen, sind dafür ein wichtiger Schritt (SPD; GRÜNE; FDP 2021). Gleichfalls soll ein schrittweiser Ausstieg aus der fossilen Gasverstromung bis 2035 erfolgen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2021). Dieser schrittweise Fuel-Switch hin zur Verstromung von Wasserstoff soll durch Anpassungen der Regulatorien und Förderinstrumente bereits im Sofort-Klimaschutzprogramm im ersten Halbjahr 2022 adressiert werden. Moderne H<sub>2</sub>-ready Gaskraftwerke und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen sowie junge, auf hocheffiziente und flexible Verstromung gasförmiger Brennstoffe (Grünen Wasserstoff) umgerüstete Kohlekraftwerke gewährleisten die Versorgungssicherheit.

Diese aus Sicht der effizienten Energiewende über alle Anwendungsbereiche hinweg notwendigen Schritte sowie der Fuel-Switch von Erdgas zu Wasserstoff in der Stromversorgung bis 2035 ermöglichen erhebliche Synergien zur Methanstrategie. Der Brennstoffwechsel

hin zur Nutzung erneuerbaren Stroms führt sektörübergreifend dazu, dass die Methanverbrauchsmengen sinken und so auch die damit verbundenen Emissionen bei der Nutzung. In Folge wird mindestens ein Drittel der Verteilnetze nicht mehr wirtschaftlich betreibbar sein (Wachsmuth et al. 2019). Dementsprechend werden auch die bei Transport und Nutzung entstehenden diffusen Methanemissionen sinken. Auch im zukünftig weiter bestehenden Gasnetz können die diffusen Methanemissionen weiter reduziert werden, indem die Betriebsmittel (Verdichter, Vorwärmstrecken) elektrifiziert werden und nicht mehr mit Gas betrieben werden (Wachsmuth et al. 2019). Dies ist nur eine konsequente Fortführung der oben skizzierten Prämissen zur Transformation in ein nachhaltiges Energiesystem.

### 3.2.2 Landwirtschaft

Das Methan aus der Verdauung von Wiederkäuern stellt einen Zwischenschritt im Kohlenstoff-Kreislauf CO<sub>2</sub> (Luft) – organisch gebundener Kohlenstoff (Pflanze) – Methan (Luft) – CO<sub>2</sub> (Luft) dar. Dem emittierten Methan steht nach dem Zerfall zu CO<sub>2</sub> und der anschließenden Bindung in Pflanzen am Ende zwar eine CO<sub>2</sub>-Senke gegenüber, jedoch zeitlich versetzt und mit dem im Vergleich zu CO<sub>2</sub> viel stärkeren Erwärmungseffekt von Methan. Es gibt keinen Referenzwert für einen klimaneutralen Tierbestand, der eine Art „dauerhaftes Verschmutzungsrecht“ für einen Staat begründen würde (Flessa und Osterburg 2021). Die insgesamt steigenden Methankonzentrationen, das hohe Erwärmungspotenzial von Methan und die ehrgeizigen Klimaschutzziele mit einem kurzen Zeithorizont von 10 bis 30 Jahren erfordern, dass das große Potenzial der Verringerung von Methanemissionen aus der Landwirtschaft ausgeschöpft werden muss (ebd.). Die wichtigste Maßnahme im Landwirtschaftssektor ist neben der anaeroben Vergärung von Wirtschaftsdüngern die Minderung von Methan aus tierischer Verdauung. Dies kann am wirksamsten über eine Verkleinerung der Tierbestände erreicht werden – in Deutschland und weltweit (UBA 2021)

Wenn sich gleichzeitig über Maßnahmen im Bereich Ernährung der Konsum tierischer Lebensmittel in Deutschland verringert, werden Verlagerungseffekte (zum Beispiel vermehrter Import) vermieden. Dennoch lässt sich ein Minderungsziel für einen Nutztierbestand in Deutschland nicht linear aus den Konsumzielen ableiten. Stattdessen sollte der maximale nachhaltige Nutztierbestand für Deutschland und

in intensiven Tierhaltungsregionen aus den Umwelt-, Natur- und Klimaschutzzielen abgeleitet werden. Ein Reduktionsziel für den Nutztierbestand muss langfristig klar sein und transparent kommuniziert und umgesetzt werden. In Frage kommen etwa eine maximale Viehbesatzdichte auf betrieblicher oder regionaler Ebene, Förderprogramme für betriebliche Umstrukturierungen und handelbare Produktionsrechte nach dem Vorbild der Niederlande (UBA o.J.).

Bei Umsetzung des von der Borchert-Kommission empfohlenen tierwohlgerechten Umbaus der Nutztierhaltung könnte sich kurzfristig der Bestand verringern, da in bestehenden Ställen mehr Platz angeboten werden muss (BMEL 2020; Grethe et al. 2021).

Begleitend zu einem Abbau der Tierbestände sollten alle zur Verfügung stehenden verfahrenstechnischen und Managementmaßnahmen ausgeschöpft werden, um die Ökoeffizienz der tierischen Erzeugung zu steigern, also die Methanemission pro Kilogramm Fleisch oder Milch zu senken (UBA o.J.). Solche sind zum Beispiel die Verbesserung von Tierwohl, Tiergesundheit und Langlebigkeit, angepasste Stall- und Entmistungssysteme, neuartige methanhemmende Futterzusatzstoffe und die Aufnahme von Futtereffizienz und Minderung der Methanemission in die Zuchtziele. Solche begleitenden Maßnahmen lassen sich über mehr Forschung und finanzielle Anreize für Betriebe und Unternehmen fördern. Sie sollten jedoch Teil einer integrierten politischen Gesamtstrategie sein, die Tierwohl und Umweltschutz als gleichwertige Schutzgüter gemeinsam betrachtet.

Einen wichtigen Beitrag zur Minderung der Methanemissionen aus Wirtschaftsdüngern kann die vermehrte Vergärung von Gülle in Biogasanlagen und die gasdichte Lagerung von Gärresten leisten. Diese sollten über staatliche Investitionszuschüsse oder ordnungsrechtliche Vorgaben gestärkt werden. Durch die Förderung der Güllevergärung dürfen jedoch nicht mehr Produktionskapazitäten für Gülle (mehr Tiere) oder Energiepflanzen geschaffen werden. Die Menge der in Deutschland in Biogasanlagen verwerteten Gülle könnte Schätzungen zufolge verdoppelt werden (Scholwin et al. 2019). Unsicherheiten bestehen noch bei der möglichen unerwünschten Methan-Freisetzung aus Biogasanlagen und bei der Bildung von mikrobiellen Resistenzen in Gülle von mit Antibiotika behandelten Tieren. Hier ist weitere Forschung notwendig.

#### 3.2.3 Abfall- und Abwasserwirtschaft

In Deutschland werden seit 2013 vom Nationalen Klimaschutzprogramm über den Stand der Technik hinausgehende Maßnahmen zur Reduzierung der Restemissionen aus Deponien gefördert, die global einzigartig sind. Denn mit zunehmendem Deponiealter verringert sich die Methanbildung, wodurch eine wirksame Deponiegasfassung und -verwertung erschwert bis unmöglich wird. Durch die aktive Belüftung von mehr als 50 Altdeponien sollen auch diese noch verbleibenden Methanemissionen gemindert werden. Für die Deponien, die dieses Stadium noch nicht erreicht haben, kann seit 2019 auch die Optimierung der Deponiegasfassung, die über den Stand der Technik hinausgeht, unterstützt werden. Darüber hinaus wird mit dem Abfallvermeidungsprogramm des Bundes unter Beteiligung der Länder aus dem Jahr 2013 (BMU 2013) und seiner Fortschreibung im Jahr 2021 (BMU 2020) eine Reduzierung des Lebensmittelabfalls angestrebt.

Um international Methan in der Abfallwirtschaft zu reduzieren, ist es unerlässlich, weltweit die Deponierung von organischen Abfällen zu begrenzen beziehungsweise zu beenden. Um die Methan-Minderungspotenziale des Abfallsektors zu erschließen, muss eine integrierte Kreislaufwirtschaft unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus von Produkten verfolgt werden, mit dem Ziel, prioritär Abfälle zu vermeiden und falls nicht vermeidbar, sie getrennt zu erfassen und vorrangig zu recyceln oder energetisch zu verwerten. Abhängig von der Ausgangslage und der Unterstützung lässt sich dieses Ziel in vielen Staaten kurz- bis mittelfristig umsetzen und bringt dabei wesentliche Co-Benefits im Bereich Umwelt, Gesundheit, Wertschöpfung und Green Economy mit sich.

Dies ist insbesondere durch die Vermeidung von Lebensmittelabfällen auf jeder Lebenszyklusstufe, möglichst mit kontinuierlichem Monitoring, sowie mittels Getrenntsammlung und Behandlung von Bioabfällen durch Kompostierung, Vergärung, energetische Nutzung oder deren Nutzung als Tierfutter erreichbar. Kompost und Gärreste sollten einer Qualitätssicherung unterliegen, um zur Bodenverbesserung und als Torf- und Kunstdüngerersatz eingesetzt werden zu können. Sie können beim Einsatz in der Landwirtschaft, dem Landschaftsbau und bei der naturbasierten Klimaanpassung im städtischen Raum (Begrünung) einen weiteren Beitrag zum Klimaschutz liefern.



Ergänzend dazu muss verbleibendes Deponiegas möglichst umfassend und frühzeitig gefasst und verwertet werden, da Deponien über einen langen Zeitraum nach Beendigung der Verfüllung noch Methan emittieren. Deshalb ist der Aufbau integrierter Abfallwirtschaftssysteme, ausgerichtet auf eine Verwertung von Ressourcen und Energie, ein zentraler Bestandteil einer Methanminderungsstrategie im Sektor und sollte aufgrund der Synergien auch die Substitutionseffekte durch Recycling und energetische Verwertung bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen in anderen Branchen (Industrie, Zement, Kraftwerke) einbeziehen.

Nach Studien des UBA kann gerade in Ländern des globalen Südens das gesamte Treibhausgasaufkommen durch abfallwirtschaftliche Maßnahmen um bis zu 15 Prozent reduziert werden (Dehoust et al. 2010).

Um Reduktionsmaßnahmen für die Abwasserbehandlung zielführend entwickeln zu können, sind detaillierte Betrachtungen der Emissionen notwendig, insbesondere durch Messungen der verschiedenen Bereiche der Abwasserentsorgung.

Um die genannten Maßnahmen umzusetzen, ist es notwendig, Kooperationen mit internationalen Akteuren innerhalb der EU sowie in der bi- und multilateralen Zusammenarbeit auszubauen, beispielsweise mit der Climate and Clean Air Coalition (CCAC), mit UN-Organisationen, der Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), der International Solid Waste Association (ISWA) oder der NDC-Partnerschaft<sup>9</sup>. Dabei ist vor allem die Unterstützung durch Klimaschutzinitiativen und -fonds und durch die Entwicklungszusammenarbeit einzubeziehen.

Zudem ist es wichtig, das Zusammenwirken von nationalen Zielen und Rahmenbedingungen mit der Umsetzung auf lokaler Ebene zu unterstützen und auszubauen. Auch die Kommunikation zu den Minderungspotenzialen des Abfallsektors und die Quantifizierung von Emissionen muss verbessert werden.

Darüber hinaus sollten entsprechende Strategien und Rechtsvorschriften auf internationaler Ebene entwickelt bzw. auf EU-Ebene fortgeschrieben werden.

<sup>9</sup> Mit dem Pariser Klimaabkommen von 2015 verpflichteten sich die Vertragsstaaten, nationale Klimabeiträge (englisch Nationally Determined Contributions, NDCs) festzulegen und umzusetzen. Die im Jahr 2016 ins Leben gerufene globale NDC-Partnerschaft unterstützt Entwicklungsländer bei der Festlegung und Umsetzung ihrer nationalen Klimabeiträge.

## 4 Erfassung und transparente Berichterstattung von Methanemissionen

Es gibt große Unsicherheiten bei der Quantifizierung der globalen Methanemissionen, insbesondere bei natürlichen Methanquellen. Es existieren aber einige Emissionsinventare, die die Emissionsdaten für alle Regionen der Welt unterteilt nach Quellgruppen erfassen.

Methanemissionen lassen sich an der Quelle messen. Darüber hinaus gibt es Modelle, die die Entstehung und Ausbreitung von Methan in der Atmosphäre simulieren. Auch mithilfe von Satellitenbeobachtungsprogrammen lassen sich mittlerweile Methanquellen detektieren. Da es aber weltweit zu wenig Daten und Informationen zu Emissionsminderungspotenzialen gibt, hat die EU-Kommission zusammen mit dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen den Aufbau eines internationalen Methan-Observatoriums (IMEO) beschlossen (UNEP 2021), das im Frühjahr 2021 seine Arbeit aufgenommen hat.

### 4.1 Bisherige Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention und dem Kyoto-Protokoll

Die Berichterstattung von Treibhausgasen und somit auch der Methanemissionen erfolgt derzeit jährlich gemäß der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) für Annex-I-Staaten. Demnach müssen alle im Anhang I der Klimarahmenkonvention aufgeführten Staaten jährlich einen Nationalen Inventarbericht (NIR) erstellen, der detaillierte und vollständige Angaben über den gesamten Prozess der Erstellung der Treibhausgasinventare enthält. Diese Berichte werden transparent veröffentlicht (UNFCCC 2021). Die Grundlage für die Ermittlung der Emissionen sind derzeit noch die IPCC-Richtlinien von 2006 (IPCC 2006). Diese geben an, wie man möglichst genau Emissionen berechnen kann. Dabei kommt in den meisten Fällen die Formel  $\text{Aktivität} \times \text{Emissionsfaktor} = \text{Emission}$  zum Einsatz. Die Aktivitätsrate beschreibt die Bezugsgröße eines bestimmten Emissionsvorgangs: „gefährte Kilometer eines Fahrzeuges“ oder „eingesetzte Menge eines Brennstoffes“. Der Emissionsfaktor gibt an, wie hoch dabei die durchschnittlichen Emissionen bezogen auf die

Aktivität ist, zum Beispiel die Menge entwichenes  $\text{CH}_4$  pro Kilometer Gasleitung. Die Staaten berichten die Emissionen dann in einem einheitlichen Tabellenformat (CRF Tabelle = common reporting format tables) für alle Jahre ab 1990.

Nicht-Annex-I Staaten berichten hingegen aller vier Jahre eine National Communication (NC) (UNFCCC 2022). Der Umfang der NC ist wesentlich kleiner als der der Berichterstattung der Annex-I Staaten. Aufgrund der unterschiedlichen Berichtsjahre und auch der unterschiedlich angewendeten IPCC-Richtlinien (zum Teil sind noch die Richtlinien von 1996 in Anwendung) sind die Emissionen nur schwer miteinander vergleichbar.

### 4.2 Detektion von Methan mit Hilfe von Satelliten

Die weltweite Methandetektion aus Satellitendaten ist eine Fernerkundungsanwendung, die durch die schnelle Entwicklung in den Gebieten der Satellitenplattformen, Algorithmenentwicklung und Sensorik immer mehr an Bedeutung gewonnen hat. Die an Bord befindlichen Spektrometer messen hierbei jedoch nicht direkt die Methankonzentration. Der Sensor registriert vielmehr die Lichtabsorption in engen Wellenlängenbändern über einem Teil des elektromagnetischen Spektrums von 300-2.500 Nanometer. Die spezifische Lichtabsorption in engen Absorptionsbanden innerhalb des Detektionsbereiches des Sensors wird als charakteristischer spektraler Fingerabdruck bezeichnet. Mit Hilfe dieser spektroskopischen Messung und komplexer Strahlungstransfermodellierung ist es dann möglich, auf den Anteil an Methan in der Atmosphäre zu schließen. Weitere Rückschlüsse von den Methankonzentrationen aus den Satellitenmessungen auf Methanemissionen erfordern weitere komplexe Modellierungsansätze.



Hierbei gilt es, die besonderen Größenordnungen der Satellitenmessungen in Erwägung zu ziehen: TROPOMI auf Sentinel5P ist als globaler Atmosphärenmonitoring-Satellit (Flugstreifenbreite 2.600 Kilometer) in der Lage, Methankonzentrations-Datenprodukte auf einem Maßstab von etwa 7 Kilometern pro Pixel zu liefern, wohingegen räumlich höheraufgelöste wissenschaftliche Missionen wie EnMAP oder PRISMA keine direkten Methankonzentrations-Datenprodukte auf operationeller Basis anbieten (Apituley et al. 2021). Bei ihnen besteht jedoch die Möglichkeit, diese Datenprodukte (30 Kilometer Flugstreifenbreite, 30 Meter Pixelgröße) im Zuge wissenschaftlicher Forschung zu entwickeln und zur Verfügung zu stellen (Guanter et al. 2021). Zudem gibt es in Kanada bereits eine Firma, die seit 2016 auf kommerzieller Basis Methandatenprodukte ihrer eigenen Satellitenflotte anbietet (GHGSAT 2021). GHGSat ist hierbei darauf spezialisiert räumlich hochaufgelöste Methandatenprodukte anzubieten, zum Beispiel für die Öl- und Gasindustrie, Kohlegewinnung und für den Abfallsektor, hauptsächlich bezogen auf Deponien. Zukünftige Entwicklungen in der Methandetektion im Satelliten- oder auch im Drohnenbereich werden vor allem im Dreiklang von Nutzungsanforderungen, Wissenschaft und Forschungsförderung entwickelt.

#### 4.3 Harmonisierung der Berichterstattung

Die EU-Strategie zur Minderung der Methanemissionen als Teil des europäischen Grünen Deals sieht vor, dass es eine einheitliche und vergleichbare Berichterstattung der Methanemissionen gibt. Hierzu wurde unter anderem das Internationale Methanemissionsobservatorium IMEO unter dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen geschaffen (UNEP 2021). Ziel ist unter anderem, die von den Betreibern der Gasinfrastruktur gemeldeten Emissionen zu verifizieren und für die Emissionsberichterstattung der Länder zu nutzen. Für den Fall, dass keine Meldungen erfolgen, wird das Institut auf Basis von Satellitendaten Emissionswerte ermitteln.

Die EU wird diese Daten für ihr Emissionsinventar nutzen. Damit hier nicht zwei Systeme parallel laufen, müssen die Daten auch von den einzelnen Mitgliedstaaten verwendet werden. Das Umweltbundesamt begrüßt diese Pläne und wird auch die Daten der nationalen Betreiber in das Emissionsinventar einfließen lassen.

## Literatur

- Apituley, A; Pedernana, M; Sneep, M; Veeffkind, JP; Loyola, D; Hasekamp, O (2021): Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Methane. Download unter: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/0/Sentinel-5P-Level-2-Product-User-Manual-Methane/1808f165-0486-4840-ac1d-06194238fa96>, Stand: 30.05.2022
- Becker, A; Düputell, D; Gärtner, A; Hirschberger, R; Oberdörfer, M (2012): Emissionen klimarelevanter Gase aus Kläranlagen. Immissionsschutz(4), S. 182-188. DOI: <https://doi.org/10.37307/j.1868-7776.2012.04.07>
13. BImSchV – Verordnung über Großfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen vom 6. Juli 2021 (BGBl. I S. 2514), ersetzt V 2129-8-13-2 v. 2.5.2013 I 1021, 1023, 3754 (BImSchV 13 2013)
44. BImSchV – Verordnung über mittelgroße Feuerungs- Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen vom 13. Juni 2019 (BGBl. I S. 804), die durch Artikel 3 Absatz 1 der Verordnung vom 6. Juli 2021 (BGBl. I S. 2514) geändert worden ist
- Bioenergy International (2021): Norwegian government presents its 2021-2030 climate action plan. <https://bioenergyinternational.com/policy/norwegian-government-launches-climate-action-plan>, Stand: 30.05.2022
- BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2020): Kompetenznetzwerk Nutztierhaltung: Empfehlungen des Kompetenznetzwerkes Nutztierhaltung. Download unter: [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/\\_Tiere/Nutztiere/200211-empfehlung-kompetenznetzwerk-nutztierhaltung.pdf;jsessionid=21CFE3A5BD3568ED568332A7C9F980F.live832?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Tiere/Nutztiere/200211-empfehlung-kompetenznetzwerk-nutztierhaltung.pdf;jsessionid=21CFE3A5BD3568ED568332A7C9F980F.live832?__blob=publicationFile&v=3).
- BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2022a): Tabellen zur Landwirtschaft. Viehbestand. Download unter: <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/SJT-3100200-0000.xlsx>.
- BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2022b): Tabellen zur Landwirtschaft. Leistungen der kontrollierten Milchkühe und der Kühe insgesamt. Download unter: <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/SJT-3110300-0000.xlsx>.
- BMU – Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und nukleare Sicherheit (2019): Projektionsbericht der Bundesregierung 2019 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013. Bonn. Download unter: [https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14\\_lcds\\_pams\\_projections/projections/envxnw7wq/Projektionsbericht-der-Bundesregierung-2019.pdf](https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14_lcds_pams_projections/projections/envxnw7wq/Projektionsbericht-der-Bundesregierung-2019.pdf).
- BMU – Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020): Abfallvermeidungsprogramm des Bundes unter Beteiligung der Länder - Fortschreibung. Download unter: <https://www.bmu.de/download/abfallvermeidungsprogramm-des-bundes-unter-beteiligung-der-laender-fortschreibung-wertschaetzen-statt-wegwerfen>.
- BMU – Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2013): Abfallvermeidungsprogramm des Bundes unter Beteiligung der Länder. Bonn. Download unter: <http://webde/gruppen/bibliothek/Onlinebuecher/EB008107.pdf>.
- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin. Download unter: [https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf;jsessionid=5385CA013649DAFAF73F58DAD9F0A6D7.live382?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf;jsessionid=5385CA013649DAFAF73F58DAD9F0A6D7.live382?__blob=publicationFile&v=1).
- BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2021): Eröffnungsbilanz Klimaschutz. Berlin. Download unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111\\_eroeffnungsbilanz\\_klimaschutz.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=22Bundesregierung](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=22Bundesregierung).
- Böhm, W; Danner, J; Dutzi, R; Schlichter, E; Stöcklein, F (2010): Ermittlung des Standes der Emissionsminderungstechnik bei Verbrennungsmotoranlagen, Ermittlung technischer Grundlagen für immissionsschutzrechtliche Anforderungen an diese Anlagen: Teilvorhaben 05, Paket 3: Erdgas. Dessau-Roßlau. Umweltbundesamt. Siehe: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat04356a&AN=fuu.02351503&lang=de&site=eds-live>
- Butler, T; Leitao, J; Lupascu, A (2020): Consideration of methane emissions in the modelling of ozone concentrations in chemical transport models : final report. Texte 67/2020. Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/consideration-of-methane-emissions-in-the-modelling>.
- CCAC – Climate & Clean Air Coalition (2017): Oil and Gas Methane Partnership Technical Guidance Documents. Download unter: <https://www.ccacoalition.org/en/content/oil-and-gas-methane-partnership-technical-guidance-documents>, Stand: 20.05.2022
- CCAC – Climate & Clean Air Coalition (2020): The Climate and Clean Air Coalition 2030 Strategy. Download unter: <https://www.ccacoalition.org/en/resources/climate-and-clean-air-coalition-2030-strategy>, Stand: 20.05.2022
- CCAC – Climate & Clean Air Coalition (2021): Global Methane Pledge. <https://www.globalmethanepledge.org/>, Stand: 20.05.2022
- Climate Watch (2021): Data Explorer. World Resources Institute. Washington, DC. <https://www.climatewatchdata.org.>, Stand: 30.05.2022
- COM(2020) 663 final – Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über eine EU-Strategie zur Verringerung der Methanemissionen
- COM(2021) 805 final – Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates über die Verringerung der Methanemissionen im Energiesektor und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/942
- de Zwart, M; van Dijk, G; Klimstra, J (2012): Methane emissions from gas engines driving combined heat and power installations. Journal of Integrative Environmental Sciences 9, S. 14. DOI: <https://doi.org/10.1080/1943815X.2012.691885>

- Dehoust, G; Schüler, D; Vogt, R; Giegrich, J (2010): Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft: Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz. Texte 06/2010. Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3907.pdf>.
- EEG 2014 – Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2406) geändert worden ist
- EU-RL – Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser
- EU-RL – Richtlinie 1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien
- EU-RL – Richtlinie (EU) 2015/2193 des europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2015 zur Begrenzung der Emissionen bestimmter Schadstoffe aus mittelgroßen Feuerungsanlagen in die Luft
- EU-RL – Richtlinie (EU) 2016/2284 des europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2016 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe, zur Änderung der Richtlinie 2003/35/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 2001/81/EG
- Evans, M; Roshchanka, V (2014): Russian policy on methane emissions in the oil and gas sector: A case study in opportunities and challenges in reducing short-lived forcers. *Atmospheric Environment* 92, S. 199-206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.026>
- FAO – Welternährungsorganisation der Vereinten Nationen (2022): FAOSTAT: Climate Change - Emissions. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/GT>, Stand: 30.05.2022
- Finanzen.Net (2021): Finanzen – Umrechnung Währungen. [https://www.finanzen.net/devisen/euro-russischer\\_rubel-kurs](https://www.finanzen.net/devisen/euro-russischer_rubel-kurs), Stand: 30.05.2022
- Flessa, H; Osterburg, B (2021): Stellungnahme zur Veröffentlichung „Landwirtschaft und Klimawandel: Stimmt die Rechnung“ von Friedrich Kuhlmann im Band 99, Ausgabe 2, 2021. *Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* Band 99(2), S. 5. DOI: <https://doi.org/10.12767/buel.v99i2.369>
- GHGSAT (2021): Global Emissions Monitoring. <https://www.ghgsat.com/en/>, Stand: 30.05.2022
- Grethe, H; Martinez, J; Osterburg, B; Taube, F; Thom, F (2021): Klimaschutz im Agrar- und Ernährungssystem Deutschlands: Die drei zentralen Handlungsfelder auf dem Weg zur Klimaneutralität. Gutachten für die Stiftung Klimaneutralität. Berlin. Download unter: [https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/06/2021-06-01-Klimaneutralitaet\\_Landwirtschaft.pdf](https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/06/2021-06-01-Klimaneutralitaet_Landwirtschaft.pdf), Stand: 16.12.2021
- Große, C; Köllmer, A (2019): Abschlussbericht G 201813 2019-09 Gas. Erstellung eines Leitfadens mit Maßnahmen zur technischen Reduzierung von Methanemissionen im Gasverteilnetz (ME-Red DSO). DBI Gas und Umwelttechnik GmbH. Leipzig. Download unter: <https://www.dvgw-regelwerk.de/plus/#technische-regel/dvgw-g-201813/affa2e>, Stand: 30.05.2022
- Guanter, L; Irakulis-Loitxate, I; Gorroño, J; Sánchez-García, E; Cusworth, DH; Varon, DJ; Cogliati, S; Colombo, R (2021): Mapping methane point emissions with the PRISMA spaceborne imaging spectrometer. *Remote Sensing of Environment* 265, S. 112671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112671>
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (Hrsg.). IGES, Japan. Download unter: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>, Stand:
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Hauptautoren, Pachauri, HK und Meyer, LA (Hrsg.). IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016. Download unter: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/IPCC-AR5\\_SYR\\_barrierefrei.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf), Stand: 16.12.2021
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2021): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte, V; Zhai, P; Pirani, A; Connors, SL; Péan, C; Berger, S; Caud, N; Chen, Y; Goldfarb, L; Gomis, M; Huang, M; Leitzell, K; Lonnoy, E; Matthews, JBR; Maycock, TK; Waterfield, T; Yelekçi, O; Yu, R; Zhou, B (Hrsg.). Cambridge University Press. Im Druck. Download unter: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf), Stand: 16.12.2021
- Kaza, S; Yao, L; Bhada-Tata, P; Woerde, FV (2018): What a waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. World Bank Group. Washington. Download unter: <https://olc.worldbank.org/system/files/What%20a%20Waste%202.0%20Overview.pdf>, Stand: 16.12.2021
- KWKG 2020 – Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz vom 21. Dezember 2015 (BGBl. I S. 2498), das zuletzt durch Artikel 88 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist
- Monni, S; Pipatti, R; Lehtilä, A; Savolainen, I; Syri, S (2006): Global climate change mitigation scenarios for solid waste management VTT Technical Research Centre of Finland. Espoo. Download unter: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2006/P603.pdf>, Stand: 16.12.2021
- Norwegian Petroleum (2021): Emissions to air. <https://www.norskpetroleum.no/en/environment-and-technology/emissions-to-air/>, Stand: 30.05.2022
- Purr, K; Osiek, D; Lange, M; Adlunger, K; Burger, A; Hain, B; Kuhnhehn, K; Lehmann, H; Mönch, L; Müschen, K; Proske, C; Schmied, M; Vollmer, C (2016): Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess. Position. Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/integration-von-power-to-gaspower-to-liquid-in-den>.
- Purr, K; Günther, J; Lehmann, H; Nuss, P; Kropf, A (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE: Langfassung. *Climate Change* 36/2019. Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/rescue>.
- Purr, K; Wehmann, K; Balzer, F; Erxleben, F; Hendzlik, M; Kahrl, A; Lange, M; Lünenbürger, B; Joscha, S; Weyland, M (2021): Treibhausgasminderung um 70 Prozent bis 2030: So kann es gehen! Position. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgasminderung-um-70-prozent-bis-2030>.

- Scholwin, F; Grope, J; Clinkscales, A; Daniel-Gromke, J; Rensberg, N; Denysenko, V; Stinner, W; Richter, F; Raussen, T; Kern, M; Turk, T; Reinhold, G (2019): Aktuelle Entwicklung und Perspektiven der Biogasproduktion aus Bioabfall und Gülle: Abschlussbericht. Texte 41/2019. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-15\\_texte\\_41-2019\\_biogasproduktion.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-15_texte_41-2019_biogasproduktion.pdf).
- SPD; GRÜNE; FDP (2021): Mehr Fortschritt Wagen – Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit: Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP. Download unter: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1990812/04221173eef9a6720059cc353d759a2b/2021-12-10-koav2021-data.pdf?download=1>, Stand: 25.02.2022
- The White House - Office of the Press Secretary (2015): FACT SHEET: Administration Takes Steps Forward on Climate Action Plan by Announcing Actions to Cut Methane Emissions [Pressemitteilung]. 14.01.2015. <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2015/01/14/fact-sheet-administration-takes-steps-forward-climate-action-plan-anno-1>
- Trötsch, R; Becker, M; Lechner, R (2022): Methanemissionen und ihr Einfluss auf die THG-Bilanz von Erdgas-BHKW - Brückentechnologie ja oder nein? BWK Energie 1-2(74), S. 3. <https://www.ingenieur.de/fachmedien/bwk/energieversorgung/methanemissionen-und-ihr-einfluss-auf-die-thg-bilanz-von-erdgas-bhkw/>
- UBA – Umweltbundesamt (2021): Perspektiven für eine umweltverträgliche Nutztierhaltung in Deutschland. Texte 33/2021. Dessau-Roßlau. Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/perspektiven-fuer-eine-umweltvertraegliche>.
- UBA – Umweltbundesamt (2022): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 – 2020. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2022\\_01\\_12\\_em\\_entwicklung\\_in\\_d\\_trendtabelle\\_thg\\_v1.0.xlsx](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2022_01_12_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_thg_v1.0.xlsx).
- UBA – Umweltbundesamt (o. J.): Zukunftsfähig ernähren – Nutztierhaltung umbauen. Position. Dessau-Roßlau. In Vorbereitung.
- UNEP – Umweltprogramm der Vereinten Nationen (2021): International methane emissions observatory (IMEO). <https://www.unep.org/explore-topics/energy/what-we-do/international-methane-emissions-observatory>, Stand: 30.05.2022
- UNEP – Umweltprogramm der Vereinten Nationen und CCAC - Climate & Clean Air Coalition (2021): Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions. Nairobi. Download unter: [https://www.ccacoalition.org/en/file/7941/download?token=q\\_bCnfYV](https://www.ccacoalition.org/en/file/7941/download?token=q_bCnfYV), Stand: 15.12.2021
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2021): National Inventory Submissions 2021. <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2021>, Stand: 28.02.2022
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2022): National Communication submissions from Non-Annex I Parties. <https://unfccc.int/non-annex-i-NCs>, Stand: 30.05.2022
- UNO – Vereinte Nationen (2021): UN Comtrade Datenbank. <https://comtrade.un.org/data>, Stand: 20.05.2022
- Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. (2021): Methanemissionen. <https://fnb-gas.de/energiezukunft/methanemissionen/>, Stand: 11.10.21
- Wachsmuth, J; Michaelis, J; Neumann, F; Wietschel, M; Duscha, V; Degünther, C; Köppel, W; Zubair, A (2019): Roadmap Gas für die Energiewende – Nachhaltiger Klimabeitrag des Gassektors. Climate Change 12/2019. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-15\\_cc\\_12-2019\\_roadmap-gas\\_2.pdf#page=138&zoom=100,72,345](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-15_cc_12-2019_roadmap-gas_2.pdf#page=138&zoom=100,72,345).
- Xu, M; Aizhu, C (2020): China's CNPC targets 50% slash in methane emission intensity by 2025. <https://www.reuters.com/article/us-china-cnpc-carbon-idINKBN2430P7>, Stand: 30.05.2022
- You, L (2021): China to Reduce Emissions of Methane, a Powerful Greenhouse Gas. <https://www.sixthtone.com/news/1006954/china-to-reduce-emissions-of-methane%2C-a-powerful-greenhouse-gas>, Stand: 30.05.2022

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Methanemissionen aus Deutschland im Jahr 2019 in kt.....	10
<b>Abbildung 2:</b> Methanemissionen aus Deutschland.....	10
<b>Abbildung 3:</b> Methanemissionen aus Deponien.....	12
<b>Abbildung 4:</b> Jährliche Treibhausgasemissionen aus der Abfall- und Abwasserwirtschaft.....	13
<b>Abbildung 5:</b> Methanemissionen der Europäischen Union (inkl. UK) im Jahr 2019 in kt.....	14
<b>Abbildung 6:</b> Methanemissionen der Europäischen Union (inkl. UK).....	15
<b>Abbildung 7:</b> Methanemissionen weltweit.....	16
<b>Abbildung 8:</b> Methanemissionen aus Deponien.....	19
<b>Abbildung 9:</b> Typische Verläufe der Emissionen (NO <sub>x</sub> und Kohlenwasserstoffe) in Abhängigkeit vom Lambda-Wert.....	22







► **Unsere Broschüren als Download**  
Kurzlink: [bit.ly/2dowYYI](https://bit.ly/2dowYYI)

 [www.facebook.com/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)  
 [www.twitter.com/umweltbundesamt](https://www.twitter.com/umweltbundesamt)  
 [www.youtube.com/user/umweltbundesamt](https://www.youtube.com/user/umweltbundesamt)  
 [www.instagram.com/umweltbundesamt/](https://www.instagram.com/umweltbundesamt/)