

# Abschätzung der THG-Emissionen einer zukünftigen Wasserstofftransportinfrastruktur

Maximilian Heneka, Sabine Malzkuhn und Frank Graf

Wasserstoff, THG-Emissionen, Wasserstoffkernnetz, Klimaziele

*Der Aufbau einer nachhaltigen Wasserstoffinfrastruktur wird für die Erreichung der Klimaneutralität Deutschlands vorausgesetzt. Aktuelle Studien legen nahe, dass Wasserstoff ein indirektes Treibhauspotenzial (GWP) aufweist und somit zum Treibhauseffekt beiträgt. In dieser Kurzstudie werden die aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Treibhauspotenzial von Wasserstoff zusammengefasst. Am Beispiel von Deutschland wird der Einfluss potenzieller flüchtiger Wasserstoffemissionen beim Gasfernleitungstransport auf das Klima abgeschätzt. Die Menge an flüchtigen Wasserstoffemissionen wird durch Umrechnungsfaktoren ermittelt. Diese basieren auf den heutigen Methanemissionen im Transportnetz. Die durch flüchtige Methanemissionen verursachten Treibhausemissionen auf Transportnetzebene können durch die Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff weiter gesenkt werden.*

## 1. Einleitung

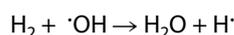
Deutschland muss bis 2045 klimaneutral werden. Wasserstoff stellt bei der Erreichung dieser Ziele eine vielversprechende Option dar. Europaweit werden Anstrengungen unternommen, ein europäisches Transportnetz (European Hydrogen Backbone, EHB [1]) aufzubauen. Bis 2032 soll in Deutschland ein 9.040 km langes H<sub>2</sub>-Kernnetz aufgebaut werden [2].

In Anbetracht der EU-Methanemissionsverordnung [3], die im Juli 2024 in Kraft getreten ist, erscheint es im Hinblick auf eine Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff sinnvoll, potenzielle Klimawirkungen von Wasserstoff zu bewerten. Im Folgenden Artikel wird der derzeitige Forschungsstand zur Klimawirkung von Wasserstoff beleuchtet. Außerdem wird ein Szenario betrachtet, in welchem das derzeitige Erdgastransportnetz auf Wasserstoff umgestellt ist. Mit Hilfe von Umrechnungsfaktoren werden derzeitige Methanemissionen auf Wasserstoff umgerechnet und die Klimawirkung mit Hilfe des aktuellen Forschungsstands für das Treibhauspotenzial von Wasserstoff abgeschätzt.

## 2. Klimawirkung von Wasserstoff

Wasserstoff (H<sub>2</sub>) selbst hat keinen Einfluss auf das Klima. Denn durch seine Molekülstruktur und -symmetrie ist er nicht in der Lage, Wärmestrahlung zu absorbieren oder zu reflektieren. Allerdings hat Wasserstoff eine indirekte Wirkung auf das Klima und die Atmosphärenzusammensetzung, welche durch Reaktionen mit anderen Molekülen in der Atmosphäre hervor-

gerufen wird. Eine der Hauptreaktionen die stattfindet, ist die Reaktion mit Hydroxylradikalen (OH) in der Troposphäre. Bei dieser Reaktion entstehen Wasser und ein Wasserstoffradikal:



Hydroxylradikale werden als das „Waschmittel“ der Atmosphäre bezeichnet und sind ein wichtiger Auslöser für Kettenreaktionen. Sie oxidieren zum Beispiel Methan (CH<sub>4</sub>). Ohne diese Reaktion wären die Lebensdauer von Methan und seine Auswirkungen auf das Klima um mehrere Größenordnungen höher:

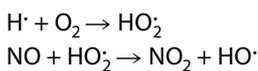


Daher könnte eine erhöhte Wasserstoffkonzentration in der Atmosphäre zu einer geringeren Konzentration von Hydroxylradikalen führen, da beide Reaktionen miteinander konkurrieren und Wasserstoff deutlich reaktionsfreudiger als Methan ist. Die Hydroxylradikale stehen dann nicht mehr für die Oxidation von Methan zur Verfügung und verlängern daher dessen Lebensdauer in der Atmosphäre.

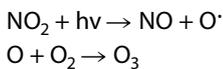
Des Weiteren führt eine Erhöhung der Wasserstoffkonzentration in der Atmosphäre zu einer Zunahme der Wasserdampfkonzentration, was insbesondere in der Stratosphäre (in 10 bis 50 km Höhe) problematisch ist (s. **Bild 1**). Durch diese „Befeuchtung“ der Stratosphäre kühlt diese ab und führt zu einer höheren Wahrscheinlichkeit für die Bildung von Strato-

sphärenwolken. Das verändert einerseits die Strahlungsbilanz der Erde (Veränderung der ein- und ausfallenden Strahlung) sowie eine Wärmeabgabe an höhere Schichten von einem tieferen Temperaturniveau, was weniger effizient ist und somit zur weiteren Erwärmung der Atmosphäre führt [4].

Ein weiterer Weg, der zur Erderwärmung führen kann, ist die Entstehung von troposphärischem Ozon. Je nachdem in welcher Schicht (s. Bild 1) sich das Ozon befindet, hat es eine unterschiedliche Rolle. In der Stratosphäre bildet Ozon eine Schutzschicht vor UV-Strahlen. In der Troposphäre hat Ozon allerdings schädliche Auswirkungen auf Vegetation und Lebewesen. Des Weiteren besitzt Ozon in der Troposphäre ein sehr hohes Erwärmungspotenzial. Ozon wird dort durch eine komplexe Reaktionskette gebildet, in der unterschiedlichen Spezies wie NO<sub>x</sub>, CO, CH<sub>4</sub> und andere flüchtige organische Komponenten involviert sind. Zunächst reagieren Wasserstoffradikale mit Sauerstoff zu Peroxylradikalen. Der darauffolgende, geschwindigkeitsbestimmende Schritt der Ozonbildung ist die Reaktion von NO und Peroxylradikalen:



Diese Reaktion wird gefolgt von der photochemischen Spaltung des NO<sub>2</sub>, was dann zu Ozon reagiert:



Eine Steigerung des Wasserstoffgehalts in der Atmosphäre kann dementsprechend in einer NO<sub>x</sub>-reichen Umgebung zu mehr Ozon in der Atmosphäre, insbesondere in der Troposphäre führen [5, 6].

Zusammenfassend lassen sich die indirekten Auswirkungen des Wasserstoffs auf folgende Faktoren zurückführen:

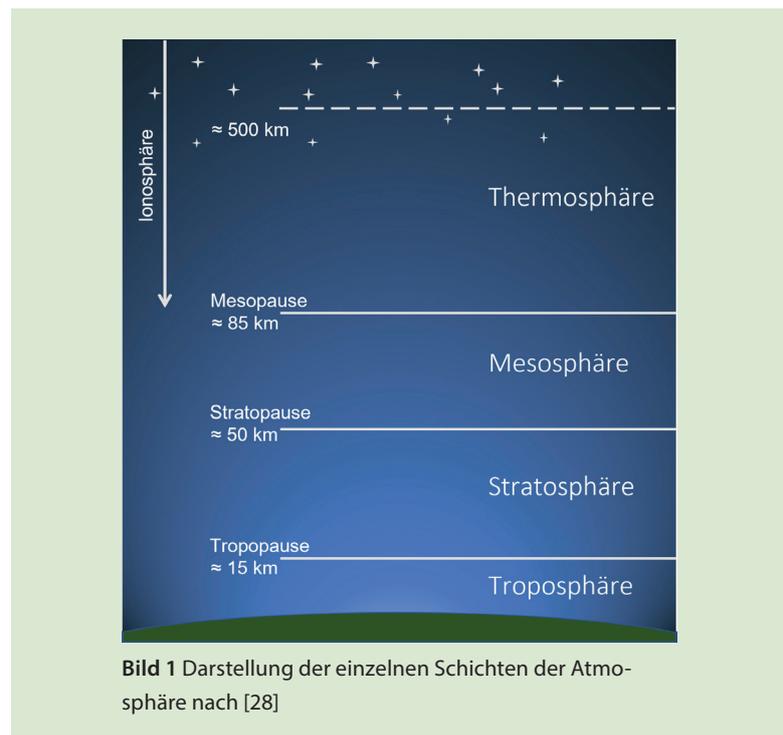
**Tabelle 1:** Übersicht: Global Warming Potential GWP von Wasserstoff und Methan

Literatur	Wasserstoff		Methan	
	GWP <sub>20</sub>	GWP <sub>100</sub>	GWP <sub>20</sub>	GWP <sub>100</sub>
Derwent et al. [8]		5 ± 1		
IPCC [9]			82,5 ± 25,8	29,8 ± 11
Field und Derwent [10]		3,3 ± 1,4		
Ocko und Hamburg [6]	33 ± 20	11 ± 5		
Warwick [5]	33 ± 20	11 ± 5		
Hauglustaine [11]	40,1 ± 24,1	12,8 ± 5,2		
Sand [12]	37,3 ± 15,1	11,6 ± 2,8		

- Den Einfluss auf die Lebensdauer von Methan und anderen flüchtigen organischen Verbindungen in der Atmosphäre
- die Entstehung von Wasserdampf, insbesondere in der Stratosphäre
- die Reaktion von Wasserstoffradikalen, die zu mehr Ozon in der Troposphäre führt und eine weitere Erwärmung bewirkt.

Eine große Unsicherheit besteht in Bezug auf die Wege des emittierten Wasserstoffs. Schätzungsweise enden bis zu 75 % des emittierten Wasserstoffs im Boden und werden nicht an die Atmosphäre abgegeben [7]. Im Boden soll der Abbauprozess von Mikroorganismen gesteuert sein, allerdings ist die Datenlage noch gering und weitere Forschungsarbeiten zur Klärung nötig.

Um die Klimawirksamkeit unterschiedlicher Treibhausgase untereinander zu vergleichen, wird häufig das so genannte Treibhauspotenzial (engl. Global Warming Potential, GWP) herangezogen. Das GWP gibt an, wie viel Energie von einem Kilogramm Gas über einen bestimmten Zeitraum im Verhältnis zu der Energieabsorption von einem Kilogramm Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) absorbiert wird [13]. Des Weiteren repräsentiert das GWP einerseits die Verweildauer einer Komponente in der Atmosphäre sowie die Effizienz beim Strahlungsantrieb (radiative forcing) [14]. Das ist die Fähigkeit des Gases, Wärme in der Atmosphäre zu speichern. In der Regel wird ein Zeitraum von 20 oder 100 Jahren betrachtet. Als Referenzgas wird CO<sub>2</sub> ein GWP von „1“ zugeordnet. Je größer das GWP eines Gases, desto größer ist dessen Treibhauspotenzial innerhalb eines bestimmten Zeitraums im Vergleich zu CO<sub>2</sub> (Tabelle 1).



**Bild 1** Darstellung der einzelnen Schichten der Atmosphäre nach [28]

Beispielsweise hat Methan (CH<sub>4</sub>) laut dem aktuellen IPCC-Sachstandsbericht [9] ein GWP von 29,8 ± 11 über einen Zeitraum von 100 Jahren (GWP<sub>100</sub>) und ein GWP von 82,5 ± 25,8 über einen Zeitraum von 20 Jahren (GWP<sub>20</sub>). Dies bedeutet, dass 1 kg emittiertes Methan über 100 Jahre das gleiche Treibhauspotenzial wie etwa 30 kg emittiertes Kohlenstoffdioxid aufweist oder mit anderen Worten: Das CO<sub>2</sub>-Äquivalent (CO<sub>2</sub>eq) für Methan bei einem Zeithorizont von 100 Jahren beträgt etwa 30. Zur Berechnung des GWP, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die zu unterschiedlichen Werten führen können. Die meisten Berechnungen basieren auf der Methodik des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC), bei der unter anderem folgende Faktoren einbezogen werden [15]:

- Die Absorption von Infrarotstrahlung (IR)
- Der betrachtete Zeitraum<sup>1</sup>
- Die Lebensdauer eines Gases in der Atmosphäre<sup>2</sup>.

### 3. Methanemissionen auf Transportnetzebene

Zur Abschätzung der flüchtigen Emissionen aus einer zukünftigen Wasserstofftransportinfrastruktur ist es sinnvoll, zunächst die Ursachen und die Menge der Methanemissionen im bestehenden Erdgastransportnetz zu betrachten.

#### 3.1 Methodik

Deutschland ist aufgrund verschiedener internationaler Regelungen (UNFCCC, Übereinkommen von Paris) verpflichtet, jährlich über die Entwicklung der nationalen Treibhausgasinventare zu berichten. In diesen „Nationalen Inventarberichten zum Deutschen Treibhausgasinventar“ (NIR) sind auch die Methanemissionen aus der Erdgasbereitstellung und -weiterverteilung enthalten. Die Emissionsdaten werden nach einem Bottom-up-Ansatz ermittelt. Dabei werden Aktivitätsraten (z. B. die aggregierte installierte Verdichterleistung aller Erdgasverdichterstationen in Megawatt) für die verschiedenen Komponenten des Transportnetzes mit den zugehörigen spezifischen Emissionsfaktoren (im Falle der Erdgasverdichterstationen: kg CH<sub>4</sub>/MW) multipliziert (Gl. (1)).

$$\text{Aktivitätsrate (AR)} \cdot \text{Emissionsfaktor (EF)} = \text{Emission (EM)} \quad (1)$$

Im Falle des Erdgastransportnetzes ergeben sich die Aktivitätsraten aus einer jährlichen Bestandsaufnahme der betrachteten Elemente des Gastransportnetzes. Hierzu werden u.a. Meldungen, Umsetzungsberichte und Netzentwicklungspläne der Fernleitungsnetzbetreiber (FNB) sowie die Gas- und Wasser-Statistik (GaWaS)<sup>3</sup> des DVGW verwendet. **Tabelle 2** zeigt beispielhaft die Aktivitätsraten für ausgewählte Komponenten des Erdgastransportnetzes für das Jahr 2020.

<sup>1</sup> Die Periode über die integriert wird, bspw. GWP<sub>100</sub> betrachtet einen Zeitraum von 100 Jahren.

<sup>2</sup> Kurzlebige Spezies kommen schneller ins Gleichgewicht.

<sup>3</sup> <https://www.dvgw.de/themen/sicherheit/gas-und-wasserstatistik>

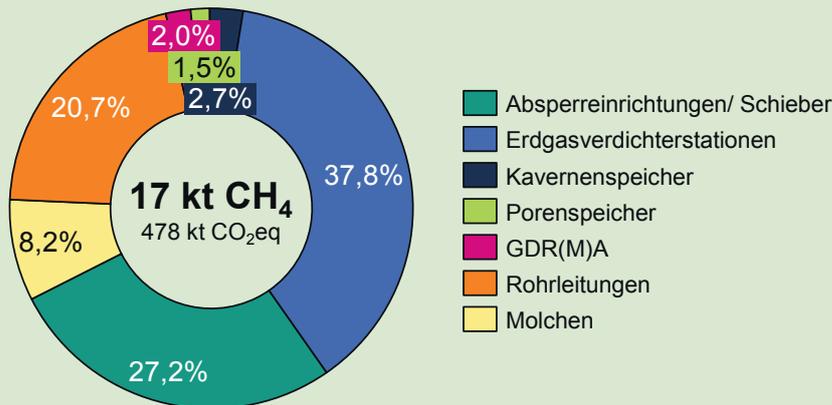
**Tabelle 2:** Ausgewählte Aktivitätsraten für das Gesamt-Asset der Fernleitungsnetzbetreiber für das Berichtsjahr 2020 [16]

Komponente	Aktivitätsrate	Wert
Rohrleitungen	Leitungslänge in Kilometern (km)	33.808,5
Verdichter	Installierte Verdichterleistung in Megawatt (MW)	2068,2
Schieberknoten	Anzahl	11.075
GDRM-Anlagen	Anzahl	832

Die zugehörigen Emissionsfaktoren basieren auf Messdaten und wissenschaftlichen Untersuchungen. Im Jahr 2022 wurde eine umfassende Aktualisierung der spezifischen Emissionsfaktoren vorgenommen, bei der die bisherigen Emissionsfaktoren, die zum Teil auf sehr alten Messdaten (Zeitraum 1989 bis 2005) bzw. auf außerhalb von Deutschland ermittelten Messdaten beruhen, durch aktuellere Daten ersetzt wurden [16]. Ausschlaggebend für die Aktualisierung war die Verabschiedung des OGMP 2.0 Berichterstattungsrahmens für Methanemissionen im Jahr 2020. Die OGMP bezeichnet eine im Jahr 2014 gegründete, freiwillige Industrieinitiative zur Reduzierung der Methanemissionen im Öl- und Gassektor. Mit dem Start der OGMP 2.0 Initiative wurden die Mitglieder, zu denen auch mehrere deutsche Fernleitungsnetzbetreiber (FNB) zählen, erstmals (mit einer Übergangsfrist von drei Jahren) verpflichtet, ihre Anlagen jährlich nach einem standardisierten und transparenten Berichterstattungsrahmen (OGMP 2.0 – Level 3) durch Messungen auf Methanemissionen zu überprüfen und die Einhaltung definierter Emissionsreduktionsziele anhand von Fortschrittsberichten nachzuweisen [17]. Vor diesem Hintergrund wurde von den deutschen FNB im Zeitraum September 2020 bis November 2020 ein Messprogramm („ME-TSO“) an potenziellen Leckstellen im Gastransportnetz durchgeführt [18]. Der daraus resultierende Datensatz (43.144 Einzelmesswerte) wurde auf das Gesamt-Asset der FNB aggregiert und an das UBA für die nationale Inventarberichterstellung übermittelt [16]. Vor diesem Hintergrund hat das UBA die Berichterstattungsmethodik für Methanemissionen auf Transportnetzebene angepasst und berücksichtigt seitdem die von den FNB im Rahmen von OGMP 2.0 jährlich aktualisierten Emissionsfaktoren, die auf standardisierten Messungen beruhen [16].

**Tabelle 3** stellt die Ergebnisse für die nach der bisherigen und der aktualisierten Berichterstattungsmethodik ermittelten Methan-Emissionen auf Gastransportnetzebene für das Berichtsjahr 2020 gegenüber.

Die Ergebnisse zeigen, dass die auf dem FNB-Messprogramm basierenden Emissionsfaktoren im Vergleich zu den bisher verwendeten Emissionsfaktoren in Summe zu deutlich geringeren Methanemissionen führen (- 76 %). Im Falle der Untertagegasspeicher und Gasdruckregelanlagen wurden die Emissionsfaktoren aufgrund fehlender neuer Messdaten



**Bild 2:** Methanemissionen im Gasfernleitungsnetz einschließlich Untertagegasspeicher basierend auf Daten aus [16]

konstant gehalten. Die Änderungen bei den Gasdruckregelungen sind auf eine Anpassung der Aktivitätsrate zurückzuführen. Dabei wurde die bisherige Auswertung der GaWaS, die aufgrund möglicher Doppelzählungen mit Unsicherheiten behaftet war, durch neu vorliegende, konkrete Betreiber-meldungen ersetzt. Die Methanemissionen aufgrund von Reinigungs- und Wartungsarbeiten sowie durch Molchungen wurden erstmals für das Berichterstattungsjahr 2020 berücksichtigt und basieren auf einer Auswertung des DBI aus dem Jahr 2019 [19]. Der Emissionsfaktor für Rohrleitungen basiert ebenfalls auf einer Abschätzung und wurde für das Berichterstattungsjahr 2020 von 158,9 kg CH<sub>4</sub>/km auf 104 kg CH<sub>4</sub>/km reduziert. Der Grund hierfür ist, dass bei Wartungsarbeiten seit 2010 mobile Verdichter eingesetzt werden, die das Gas in abgetrennten Abschnitten in andere Leitungssysteme umpumpen und die flüchtigen Emissionen durch Abblasen von Spülgasmengen in die Atmosphäre deutlich reduzieren [16]. Diese Emissionsminderungsmaßnahme wurde im bisherigen Emissionsfaktor für Rohrleitungen noch nicht berücksichtigt.

### 3.2 Ergebnisse

Die aktualisierten Ergebnisse der Methanemissionen für das Berichterstattungsjahr 2020 zeigen, dass Verdichterstationen, die zur Druckaufrechterhaltung in den Leitungen ca. alle 100 bis 200 km eingesetzt werden [20], mit einem Anteil von 37,8 % eine wesentliche Quelle für Methanemissionen auf Transportnetzebene darstellen (s. **Bild 2**). Leckagen treten hier sowohl an den Verdichtern selbst (bewegte Teile), als auch an undichten Flanschen, geschraubten Verbindungsstücken oder Armaturen auf [16, 21]. Weitere bedeutende Quellen sind Absperreinrichtungen (z. B. Schieber) (Anteil: 27,2 %) sowie Rohrleitungen (Anteil: 20,7 %). Bei den Rohrleitungen können äußere Einflüsse oder Korrosion und die damit verbundene Bildung von Rissen, Löchern oder Brüchen zu flüchtigen Emissionen führen [21]. Weitere Emissionen entstehen durch Wartungs- und Reparaturarbeiten und den damit ver-

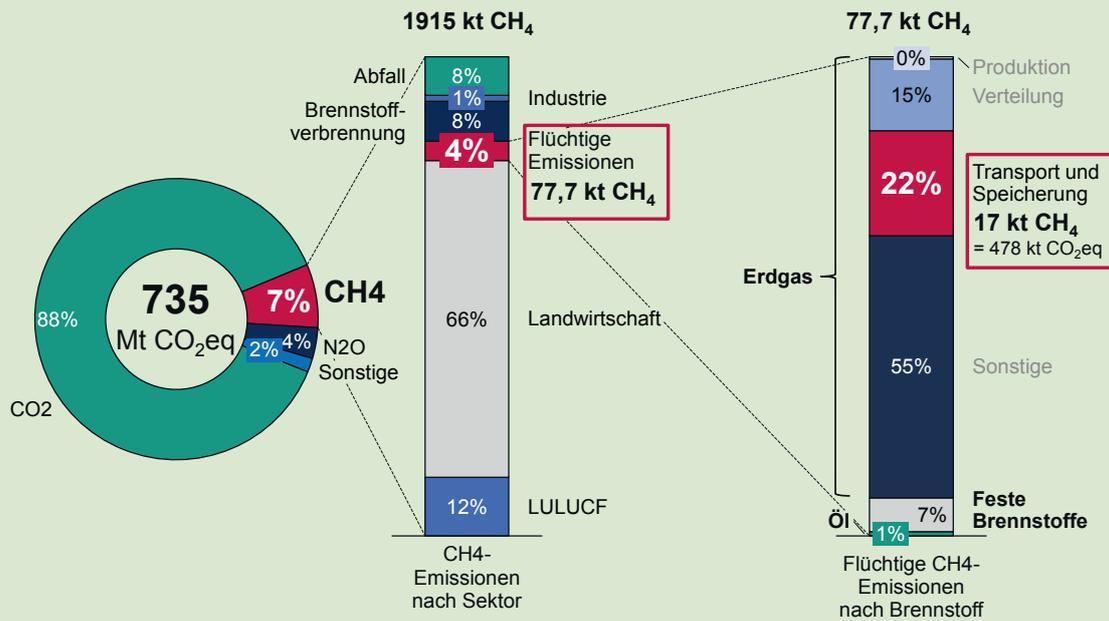
bundenen Ausblasungen. Deren Anteil ist jedoch in den letzten Jahren durch den zunehmenden Einsatz von mobilen Verdichtern stark zurückgegangen. Nach eigenen Angaben der OGE können mobile Verdichter die Methanemissionen bei Wartungsarbeiten um 95 % reduzieren [16].

Im Jahr 2020 wurden auf Fernleitungsnetzbetreiberebene (inkl. Untertagegasspeicher) etwa 17 kt an flüchtigen Methanemissionen verursacht [22]. Das entspricht etwa 0,9 % der Gesamt-Methanemissionen (= 1.915 kt CH<sub>4</sub>) und 0,07 % der Gesamt-Treibhausgasemissionen (GWP<sub>100</sub>) in Deutschland (= 735 Mt CO<sub>2</sub>eq) (s. **Bild 3**) [22].

**Tabelle 3:** Bisherige und aktualisierte Methanemissionen auf Transportnetzebene für das Berichtsjahr 2020 [16]

Quellbezeichnung	CH <sub>4</sub> -Emissionen nach bisheriger Methodik in kg	CH <sub>4</sub> -Emissionen nach neuer Methodik in kg	Abweichung
Absperreinrichtungen/ Schieber	37.189.900	4.626.259	- 88 %
Erdgasverdichterstationen	27.179.460	6.430.034	- 76 %
Kavernenspeicher	452.580	452.580	0 %
Porenspeicher	258.450	258.450	0 %
Gasdruckregelungen	518.408	338.664	- 35 %
Rohrleitungen	5.372.250	3.516.136*	- 35 %
Molchen	1.396.785	1.396.785	0 %
<b>Summe</b>	<b>72.367.833</b>	<b>17.018.907</b>	<b>- 76 %</b>

\* In der Originaltabelle befindet sich an dieser Stelle eine Übertragungsfehler. Der Wert wurde von den Autoren rechnerisch durch den gegebenen Emissionsfaktor (104 kg/km) und die Aktivitätsrate (33.808,5 km) ermittelt.



**Bild 3:** Anteil der Methanemissionen an den Gesamt-Treibhausgasemissionen (GWP100) in Deutschland (inkl. Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft, LULUCF) und Darstellung unterschiedlicher Emissionspfade. Flüchtige Emissionen und Brennstoffemissionen bilden gemeinsam den Sektor „Energie“

#### 4. Abschätzung der Wasserstoffemissionen in einem zukünftigen Wasserstofftransportnetz

Wie bereits erwähnt, absorbiert Wasserstoff keine IR-Strahlung, hat allerdings durch die oben genannten Effekte einen indirekten Einfluss auf die Atmosphärenzusammensetzung. Der Einfluss ist schwer zu beschreiben und zu quantifizieren und dementsprechend mit hohen Unsicherheiten behaftet. Wie in **Tabelle 1** zu sehen, unterscheiden sich die von unterschiedlichen Studien berechneten GWP-Werte für Wasserstoff signifikant. Im Folgenden wird sich nur auf die Werte, die ab 2022 publiziert wurden, bezogen, da diese Effekte in der Stratosphäre mitbetrachten und dementsprechend höhere GWP-Werte ermittelt haben als die Publikationen davor.

Für die indikative Abschätzung der flüchtigen Emissionen von Wasserstoff aus einem zukünftigen Wasserstofftransportnetz werden nachfolgend die typischen Emissionspfade für Methan über einen Umrechnungsfaktor auf Wasserstoff übertragen. Für die folgende Analyse wurden folgende Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

- I. Das Wasserstofftransportnetz hat die gleiche Struktur wie das heutige Erdgastransportnetz.
- II. Der Anteil der aggregierten Transportnetz-Assets (Rohrleitungen, Speicher, Verdichterstationen, GDRMA, etc.) ist proportional zur Leitungslänge des Gastransportnetzes.
- III. Da die endgültige Länge des deutschen Wasserstofftransportnetzes nicht bekannt ist und eine möglichst konservative Abschätzung angestrebt wird, wird das Konzept des „impliziten Emissionsfaktors“ gemäß IPCC Guidelines 2006

[23] angewandt. Hierbei handelt es sich um eine Methode, die in begrenztem Umfang Vergleiche zwischen unterschiedlichen Infrastrukturen erlaubt. Hierzu werden die aggregierten Emissionsdaten der betrachteten Berichterstattungskategorie (z. B. Methanemissionen auf Transportnetzebene) auf eine charakteristische Referenzgröße bezogen. Im vorliegenden Fall wird als Referenzgröße die Länge des Gastransportnetzes in Kilometern verwendet.

- IV. Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten in Bezug auf die Nutzung von Porenspeichern für die Wasserstoffspeicherung werden als Untertagegasspeicher ausschließlich Kavernenspeicher betrachtet [24].
- V. Die Berechnungen und Abschätzungen beziehen sich aufgrund der guten Datenverfügbarkeit auf das Berichtsjahr 2020 und spiegeln damit den Zustand des Erdgastransportnetzes im Jahr 2019 wider. Es handelt sich somit um eine konservative Abschätzung, bei der zukünftige nationale und internationale Bestrebungen zur Minderung der flüchtigen Emissionen auf Gastransportnetzebene ignoriert werden.
- VI. Um den Unsicherheiten bezüglich des Treibhauspotenzials von Wasserstoff und der Menge an flüchtigen Wasserstoffemissionen in einem zukünftigen Wasserstofftransportnetz zu begegnen, werden die Ergebnisse mit Hilfe von Minimum-/Maximum-Bereichen dargestellt.

Nach Angaben des Umweltbundesamtes wurden im Jahr 2020 auf Transportnetzebene (inklusive Kavernenspeicher,

exklusive Porenspeicher<sup>4</sup>) insgesamt 16,76 kt Methan emittiert [25]. Unter Berücksichtigung der Länge des Gastransportnetzes von 33.809 km ergibt sich aus dem Verhältnis der aggregierten Methanemissionen und der Netzlänge ein impliziter Emissionsfaktor von 496 kg CH<sub>4</sub>/(km·a), siehe Gl. (2).

$$IEF_{CH_4,2020} = \frac{17,02 \text{ kt} - 0,26 \text{ kt}}{33.809 \text{ km}} = \frac{16,76 \text{ kt}}{33.809 \text{ km}} = 496 \frac{\text{kg}}{\text{km}} \quad (2)$$

Unter Berücksichtigung der Normdichte von Methan (0,717 kg/m<sup>3</sup> (NTP) [20]) folgt daraus ein volumetrischer implizierter Emissionsfaktor in Höhe von 692 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> (NTP)/(km·a) für das Jahr 2020.

Um die zukünftigen flüchtigen Wasserstoffemissionen auf Basis des impliziten Emissionsfaktors für Methanemissionen abzuschätzen, wird nachfolgend auf den sog. Umrechnungsfaktor zurückgegriffen. Der Umrechnungsfaktor (URF) wird als das Verhältnis der Volumenströme von zwei verschiedenen Gasmedien (z. B. Wasserstoff und Methan) bei gleichen Prüfbedingungen definiert, Gl. (3).

$$URF_{H_2/CH_4} = \frac{\dot{V}_{H_2}}{\dot{V}_{CH_4}} \quad (3)$$

Diese abweichenden Volumenströme ergeben sich aus den unterschiedlichen Eigenschaften der Fluide, wie z. B. Dichte oder Viskosität. Der Umrechnungsfaktor wird in verschiedenen industriellen Anwendungsbereichen verwendet, bei denen aus Sicherheitsgründen nicht mit dem eigentlich vorgesehenen Gasmedium geprüft werden kann. Beispielsweise kann mithilfe des Umrechnungsfaktors eine mit einem ungefährlichen Medium durchgeführte Dichtheitsmessung auf das eigentlich zu betrachtende, kostenintensive oder gefährliche Medium übertragen werden. Das Konzept des Umrechnungsfaktors kann in erster Näherung auch für Vergleiche zwischen Methan- und Wasserstoffemissionen auf Transportnetzebene verwendet werden. Im DVGW-Forschungsprojekt ECLHYPSE [26] wurden u. a. methanbasierte Umrechnungsfaktoren für die Prüfung der technischen Sicherheit und Dichtheit von Gasinstallationen, Gasgeräten und Gasverteilungsanlagen bei Umstellung auf Wasserstoff ermittelt. Demnach betragen die methanbasierten Umrechnungsfaktoren für Wasserstoff 1,26 für den laminaren und 2,83 für den turbulenten Strömungsbereich. Nach [27] erfolgt das Ausströmen von Gas aus einem Leck laminar oder turbulent, abhängig von den zugrundeliegenden Gaseigenschaften und dem Verhältnis von Leckfläche zu Lecklänge. Laminare Strömungen sind typisch für Leckagen an Dichtungselementen, während turbulente Strömungen z. B. an Pipelinelöchern auftreten [27].

Für den impliziten Emissionsfaktor (IEF) für flüchtige Wasserstoffemissionen auf Transportnetzebene lässt sich mit den methanbasierten Umrechnungsfaktoren für Wasserstoff aus Anghilante et al. [26] und dem impliziten Emissionsfaktor für

**Tabelle 4:** Randbedingungen zur Berechnung der spezifischen Treibhausgasemissionen für das Szenario H<sub>2</sub>-Low und H<sub>2</sub>-High sowie für Methan (CH<sub>4</sub>)

Szenario	Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO <sub>2</sub> eq/kg		Impliziter Emissionsfaktor Transportnetz (THG) in kg/(km·a)
	GWP 20	GWP 100	
H <sub>2</sub> -LOW	33	11	78
H <sub>2</sub> -HIGH	40,1	12,8	176
CH <sub>4</sub>	82,2	29,8	503

Methan für das Erdgastransportnetz die folgende Bandbreite ableiten:

$$IEF_{H_2,lam} = 1,26 \frac{m^3 H_2}{m^3 CH_4} \cdot 692 \frac{m^3 CH_4}{km \cdot a} = 872 \frac{m^3 H_2}{km \cdot a} \quad (4)$$

$$IEF_{H_2,turb} = 2,83 \frac{m^3 H_2}{m^3 CH_4} \cdot 692 \frac{m^3 CH_4}{km \cdot a} = 1.958 \frac{m^3 H_2}{km \cdot a} \quad (5)$$

Unter Berücksichtigung der Normdichte von Wasserstoff (0,090 kg/m<sup>3</sup>) folgt daraus ein gravimetrischer impliziter Emissionsfaktor in Höhe von 78 kg H<sub>2</sub>/(km·a) für den laminaren Fall und 176 kg H<sub>2</sub>/(km·a) für den turbulenten Fall.

#### 4.1 Ergebnisse

Mithilfe des Treibhauspotenzials (GWP) von Wasserstoff können die impliziten Emissionsfaktoren für Wasserstoff in die spezifische Treibhausgasintensität (THG) in CO<sub>2</sub>-Äquivalent (CO<sub>2</sub>eq) umgerechnet werden:

$$THG_{H_2} \left[ \frac{kg \ CO_2eq}{km} \right] = IEF_{H_2} \left[ \frac{kg \ H_2}{km} \right] \cdot GWP_{H_2} \left[ \frac{kg \ CO_2eq}{kg \ H_2} \right] \quad (6)$$

Für die spezifische Treibhausgasintensität der Methanemissionen aus dem Erdgastransportnetz gilt analog:

$$THG_{CH_4} \left[ \frac{kg \ CO_2eq}{km} \right] = IEF_{CH_4} \left[ \frac{kg \ CH_4}{km} \right] \cdot GWP_{CH_4} \left[ \frac{kg \ CO_2eq}{kg \ CH_4} \right] \quad (7)$$

Aufgrund der großen Bandbreiten für das GWP 100 (11 bis 12,8)<sup>5</sup> und das GWP 20 (33 bis 40,1) von Wasserstoff sowie der unterschiedlichen impliziten Emissionsfaktoren für laminare und turbulente Strömungen werden im Folgenden zwei Szenarien definiert: Das Szenario „H<sub>2</sub>-LOW“ geht von laminaren Strömungsbedingungen und einem Wasserstoff-GWP von 33 (GWP 20) bzw. 11 (GWP 100) aus. Das Szenario „H<sub>2</sub>-HIGH“ betrachtet turbulente Strömungsbedingungen und ein Wasserstoff-GWP von 40,1 (GWP 20) und 12,6 (GWP 100) Wasserstoff. **Tabelle 4** fasst die Randbedingungen für die Berechnung der spezifischen Treibhausgasemissionen für Wasserstoff und Methan zusammen.

<sup>4</sup> Die aggregierten Methanemissionen einschließlich Porenspeicher betragen 17,02 kt CH<sub>4</sub>. Daraus würde sich ein impliziter Emissionsfaktor von 503 kg/(km·a) ergeben.

<sup>5</sup> Für die Festlegung der GWP-Bandbreiten werden nur diejenigen Werte herangezogen, die auch die stratosphärische Wasserdampfbildung berücksichtigen. Dies umfasst im Wesentlichen alle ab 2022 veröffentlichten Studien aus **Tabelle 1**.

**Bild 4:** Vergleich der spezifischen THG-Emissionen, die durch flüchtige Emissionen in einem zukünftigen Wasserstoffnetz verursacht werden. Die Bereiche der THG-Emissionen setzen sich zusammen aus den verschiedenen impliziten Emissionsfaktoren für laminare und turbulente Strömung sowie dem minimalen und maximalen GWP für Wasserstoff



**Bild 4** zeigt die mit den Randbedingungen aus **Tabelle 4** berechneten Bandbreiten für die Klimawirksamkeit der flüchtigen H<sub>2</sub>-Emissionen auf Transportnetzebene in den Szenarien H<sub>2</sub>-HIGH und H<sub>2</sub>-LOW im Vergleich zu den für das Jahr 2020 berichteten Methanemissionen aus [16].

Die Ergebnisse zeigen, dass die spezifischen THG-Emissionen durch die Umstellung von Methan auf Wasserstoff bei Betrachtung des GWP20 um mindestens 83 % (von 42 t CO<sub>2</sub>eq/(km.a) auf 7 t CO<sub>2</sub>eq/(km.a)) und bei Betrachtung des GWP100 um mindestens 85 % sinken (von 15 t CO<sub>2</sub>eq/(km.a) auf 2,3 t CO<sub>2</sub>eq/km.a). Der Grund für die geringeren Treibhausgasemissionen ist neben dem geringeren Treibhauspotenzial auch die geringere Dichte von Wasserstoff<sup>6</sup>, die dazu führt, dass trotz der im Vergleich zu Methan um den Faktor 1,23 bis 2,83 höheren Leckagerate zu einem geringeren impliziten Emissionsfaktor für Wasserstoff führt (78 bis 176 kg H<sub>2</sub>/(km.a) gegenüber 503 kg CH<sub>4</sub>/(km.a)<sup>7</sup>).

Für die vorgenommene Abschätzung gilt die Einschränkung, dass diese weitgehend auf der Struktur des heutigen Erdgastransportnetzes basiert. Das zukünftige Wasserstofftransportnetz wird sich jedoch deutlich vom heutigen Gastransportnetz unterscheiden (z. B. Netzstruktur durch neue bzw. neu umgewidmete Leitungen, abweichende Betriebsbedingungen und Transportmengen). Daher ist davon auszugehen, dass die flüchtigen H<sub>2</sub>-Emissionen des zukünftigen Wasserstofftransportnetzes tendenziell geringer ausfallen werden. Genauere Aussagen können jedoch nur durch Messungen an den einzelnen Assets der Transportnetzebene getroffen werden, wie sie zum Beispiel im Rahmen der OGMP 2.0 Initiative für Methanemissionen zunehmend durchgeführt werden.

<sup>6</sup> Normdichte Wasserstoff: 0,090 kg/m<sup>3</sup> (NTP), Normdichte Methan: 0,717 kg/m<sup>3</sup> (NTP)

<sup>7</sup> Bei Erdgastransportnetz Betrachtung inklusive Porenspeicher.

## 5. Fazit

In Deutschland spielen flüchtige Methanemissionen auf der Ebene des Transportnetzes (inkl. Untergrundgasspeicher) mit einem Anteil von 0,07 % an den Gesamt-THG-Emissionen (GWP<sub>100</sub>) bzw. 0,9 % an den Gesamt-Methanemissionen (Stand: 2020) nur eine geringe Rolle [22]. Die hier vorgestellte methodische und konservative Abschätzung der diffusen Emissionen einer zukünftigen Wasserstofftransportinfrastruktur zeigt, dass die THG-Emissionen aus flüchtigen Wasserstoffemissionen aufgrund der geringeren Dichte und des damit verbundenen geringeren impliziten Emissionsfaktors sowie des geringeren Treibhauspotenzials von Wasserstoff im Vergleich zu Methan deutlich geringer sein werden als die heutigen Methanemissionen. Dennoch ist es wichtig, flüchtige Emissionen auf der Ebene des Transportnetzes so weit wie möglich zu minimieren, um eine möglichst effiziente und nachhaltige H<sub>2</sub>-Versorgung zu ermöglichen. Im Rahmen der EU-Methanstrategie werden derzeit Richtlinien zur Minimierung flüchtiger Methanemissionen entwickelt, von denen auch der zukünftige Transport von Wasserstoff über Transportleitungen profitieren wird.

## Dank

Die in diesem Artikel vorgestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen des vom BMBF geförderten und der Europäischen Union finanzierten Verbundprojektes „TransHyDE Systemanalyse“ aus dem Wasserstoffleitprojekt TransHyDE.

## Literatur

- [1] European Hydrogen Backbone, 2024. [Online]. Available: <https://ehb.eu/>. [Zugriff am 23. Oktober 2024]
- [2] FNB Gas: Wasserstoff-Kernnetz, 2024. [Online]. Available: <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernnetz/>. [Zugriff am 8 August 2024]
- [3] E. Commission: Methane Emissions, 2024. [Online]. Available: [https://energy.ec.europa.eu/topics/carbon-management-and-fossil-fuels/methane-emissions\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/carbon-management-and-fossil-fuels/methane-emissions_en). [Zugriff am 08 Oktober 2024]
- [4] Derwent, R. G.: Hydrogen for heating: Atmospheric impacts, BEIS Research Paper, 2018

- [5] *Warwick, N.; Griffiths, P.; Keeble, J.; Archibald, A.; Pyle, J. und Shine, K.*: Atmospheric implications of increased hydrogen use, 2022
- [6] *Ocko, I. B. und Hamburg, S.P.*: Atmos. Chem. Phys., p. 9349, 22 2022
- [7] *Arrigoni, A. und Diaz, L.B.*: Hydrogen emissions from a hydrogen economy and their potential global warming impact, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022
- [8] *Derwent, R. G.; Stevenson, S. D.; Utembe, S. R.; Jenkin, M. E.; Khan, A. H. und Shallcross, D. E.*: Global modelling studies of hydrogen and its isotopomers using STOICHEM-CRI: Likely radiative forcing consequences of a future hydrogen economy, International Journal of Hydrogen Energy, Bd. 45, Nr. 15, pp. 9211-9221, 2020
- [9] *Forster, P.*: The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2021, p. 923–1054
- [10] *Field, R. A. und Derwent, R. G.*: Global warming consequences of replacing natural gas with hydrogen in the domestic energy sectors of future low-carbon economies in the United Kingdom and the United States of America, International Journal of Hydrogen Energy, Bd. 46, Nr. 58, pp. 30190-30203, 2021
- [11] *Hauglustaine, D.; Paulot, F.; Collins, W.; Derwent, R.; Sand, M. und Boucher, O.*: Commun. Earth. Environ., p. 3, 2022
- [12] *Sand, M.; Skeie, R.B.; Krishnan, S.; Myhre, G.; Bryant, H.; Derwent, R. G.; Hauglustaine, D.; Paulot, F. und Prather, M.*: Commun. Earth. Environ., p. 1, 4 2023
- [13] EPA – United States Environmental Protection Agency: Understanding Global Warming Potentials, [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- [14] *Lee, H. und Romero, J.*: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report, IPCC, Geneva, Switzerland, 2023
- [15] *Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A.; Connors, S.L.; Péan, C.; Berger, S.; Caud, N.; Chen, Y.; Goldfarb, L.; Gomis, M. I.; Huang, M.; Leitzell, K. und E. Lonnoy, E.*: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC Intergovernmental Panel on, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021
- [16] Umweltbundesamt: Aktualisierung der Emissionsfaktoren für Methan für die Erdgasbereitstellung, Dezember 2022. [Online]. Available: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_159-2022\\_aktualisierung\\_der\\_emissionsfaktoren\\_fuer\\_methan\\_fuer\\_die\\_erdgasbereitstellung.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_159-2022_aktualisierung_der_emissionsfaktoren_fuer_methan_fuer_die_erdgasbereitstellung.pdf). [Zugriff am 07 September 2023]
- [17] OGMP: Mineral Methane Initiative OGMP2.0 Framework, 2020
- [18] FNB Gas: Methanemissionen, 2024. [Online]. Available: <https://fnb-gas.de/energiezukunft/methanemissionen/>. [Zugriff am 8 August 2024]
- [19] *Große, C.*: Qualitätsprüfung der Texte für den Nationalen Inventarbericht und Datenerhebung in der Quellgruppe 1.B.2.b: Abschlussbericht, 2019
- [20] *Cerbe, G.*: Grundlagen der Gastechnik: Gasbeschaffung - Gasverteilung – Gasverwendung, 8. Aufl. München: Hanser Carl, ., [Online]. Verfügbar unter: <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446449657>, 2016
- [21] *Schütz, S.; Große, C. und Kleinickel, C.*: Treibhausgas-Minderungspotenziale in der europäischen Gasinfrastruktur, November 2015
- [22] UNFCCC: Greenhouse Gas Inventory Data - Detailed data by Party [Online]. Available: <https://unfccc.int/topics/mitigation/resources/registry-and-data/ghg-data-from-unfccc>. [Zugriff am 19 Oktober 2023]
- [23] *Winiwarter, W.*: Mangino, J.; Ajavon, A.-L. N. und McCulloch, A.: Chapter 6: QUALITY ASSURANCE / QUALITY CONTROL AND VERIFICATION, in Volume 1: General Guidance and Reporting, 2006
- [24] DBI GUT; ESK GmbH; DEEP.KBB GmbH; Untergrundspeicher- und Geotechnologie-Systeme GmbH: Wasserstoff speichern - soviel ist sicher, 2022
- [25] *Böttcher, C.*: Aktualisierung der Emissionsfaktoren für Methan für die Erdgasbereitstellung, Umweltbundesamt, Fachgebiet Emissionssituation V1.6, 2022. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-der-emissionsfaktoren-fuer-methan>. [Zugriff am 07 Juni 2024]
- [26] *Anghilante, R.*: Experimentelle Charakterisierung der Leckageraten von Prüflecks mit H<sub>2</sub> und/oder CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>-Gasgemischen gegenüber Luft (ECLHYPSE), Forschungsbericht G 202138, Abschlussbericht, März 2023
- [27] K. Technology: Management Summary of first inventory of hydrogen leakages at small permissible leaks, 2019. [Online]. Available: [https://www.netbeheernederland.nl/sites/default/files/page\\_files/Waterstof\\_56\\_f1ec1f8adb.pdf](https://www.netbeheernederland.nl/sites/default/files/page_files/Waterstof_56_f1ec1f8adb.pdf). [Zugriff am 07 Juni 2024]
- [28] Planet Wissen: Aufbau der Erdatmosphäre, 10 08 2020. [Online]. Available: <https://www.planet-wissen.de/natur/klima/erdatmosphaere/pwieaufbaudererdatmosphaere100.html>. [Zugriff am 17 Oktober 2024]

#### Autor:innen



#### Dr. Sabine Malzkuhn

DVGW-Forschungsstelle, Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) | Karlsruhe |  
Tel.: +49 721 608-41281 |  
malzkuhn@dvgw-ebi.de



#### Maximilian Heneka

DVGW-Forschungsstelle, Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) | Karlsruhe |  
Tel.: +49 721 608-41225 |  
heneka@dvgw-ebi.de



#### Dr.-Ing. Frank Graf

DVGW-Forschungsstelle, Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) | Karlsruhe |  
Tel.: +49 721 608-41221 |  
graf@dvgw-ebi.de