

## Ist Wasserstoff treibhausgasneutral?

### Stand des Wissens in Bezug auf diffuse Wasserstoffemissionen und ihre Treibhauswirkung

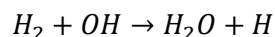
## 1 Einleitung

Dem Einsatz von Wasserstoff in einem zukünftigen treibhausgasneutralen Wirtschaftssystem wird eine zentrale Rolle zugewiesen, sowohl als Endenergieträger als auch als Sekundärenergieträger und Rohstoff in der Chemie (BMW 2020). Bisher wurden vor allem die Vorketten, also die Herstellung von Wasserstoff, und dabei anfallende Treibhausgasemissionen, konkret Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>), betrachtet. Wenn zum Beispiel Erdgas als Wasserstoffquelle genutzt wird, können flüchtige Methanemissionen bei Förderung und Transport entstehen (Bauer et al. 2021; Howarth und Jacobson 2021; Parkinson et al. 2019). Nur in vereinzelt Studien wurde bislang die potentielle Klimawirkung von Wasserstoff (H<sub>2</sub>) selbst in der Atmosphäre untersucht. Diese Kurzstudie stellt die wichtigsten Erkenntnisse aus der Literatur zur Wirkung von H<sub>2</sub> in der Atmosphäre zusammen. Die drei zentralen Einflussfaktoren auf die Treibhauswirkung von Wasserstoff (Produzierte Menge im Umlauf, Emissionsrate und Treibhauspotential) werden herausgearbeitet. Mithilfe einer eigenen Berechnung werden H<sub>2</sub>-Emissionen hinsichtlich ihrer Tragweite in einem Netto-Null-Energiesystem eingeordnet.

## 2 Treibhauswirkung von Wasserstoff in der Atmosphäre

Anders als z.B. CO<sub>2</sub> oder CH<sub>4</sub> ist H<sub>2</sub> kein direktes Klimagas. Es absorbiert also keine Infrarotstrahlung; gleichwohl kann H<sub>2</sub> eine treibhausgasrelevante Wirkung zugeschrieben werden. H<sub>2</sub> wird jedoch nicht in der Liste der Klimagase des Pariser Klimaschutzabkommens und den Inventaren der Klimarahmenkonventionen §12 aufgeführt. Es kann deshalb nicht in nationalen Klimabilanzen verrechnet werden.

Die Treibhauswirkung von H<sub>2</sub> wird durch zwei Effekte indirekt verursacht, denen dieselbe Reaktion zu Grunde liegt: der atmosphärische Abbau von H<sub>2</sub> durch dessen Reaktion mit dem Hydroxylradikal (OH) (Derwent 2018):



Diese OH-Radikale erfüllen eine wichtige Reinigungsfunktion, da sie durch Reaktion mit bspw. CH<sub>4</sub> und weiteren THG deren Lebensdauer in der Atmosphäre und damit ihre Treibhauswirkung reduzieren. Zum einen wird also die indirekte Treibhauswirkung von H<sub>2</sub> dadurch ausgelöst, dass dieser mit OH-Radikalen reagiert und so deren Konzentration reduziert. Folglich wird auch die Wirkung der OH-Radikale zur Neutralisierung anderer THG reduziert (Derwent et al. 2006; Pearman und Prather 2020; Derwent 2018). Die produzierten H-Atome wiederum reagieren mit Sauerstoff zu Hydroperoxil-Radikalen, die durch Reaktion mit Stickoxiden bodennahes Ozon erzeugen (Derwent et al. 2020).

Eine weitere indirekte Treibhauswirkung ergibt sich durch das Produkt der Reaktion, Wasserdampf (H<sub>2</sub>O). Höhere H<sub>2</sub>-Konzentrationen erhöhen folglich die Konzentration von Wasserdampf in der Stratosphäre. Dies wird auch als Befeuchtung der Atmosphäre bezeichnet. Diese Befeuchtung wiederum führt zu einer Abkühlung der Stratosphäre (zwischen 10 km und 50 km Höhe) (Vogel et al. 2012). Des Weiteren wird durch die Kühlung der Stratosphäre die

Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von stratosphärischen Wolken erhöht, die wiederum die Bildung des Ozonlochs verstärken (Derwent 2018; Tromp et al. 2003).

Da H<sub>2</sub> sich nur indirekt auf die Strahlungsbilanz auswirkt, ergibt sich die Quantifizierung seines THPs primär aus der Erhöhung der Methan- und Ozonwerte, die aus der Reduzierung der OH-Radikale in der Troposphäre resultieren (Derwent 2018). Dazu kommen die beschriebenen Wirkungen in der Stratosphäre. Die Anzahl der Studien zur Quantifizierung des Treibhauspotentials (THP) von H<sub>2</sub> ist begrenzt und entstammte bis vor Kurzem ausschließlich aus der Gruppe um den britischen Wissenschaftler Richard Derwent, welche sich nur auf das troposphärische THP bezogen haben (vgl. Tabelle 1). Aus den dort veröffentlichten Werten ergab sich eine Bandbreite des 100-jährigen THPs von 1,9 – 6,0. Erst im Jahr 2022 erschienen zwei Studien von Warwick et al. (2022) und Ocko und Hamburg (2022), welche auch die stratosphärischen Effekte quantifizieren. Diese kommen auf eine Bandbreite des 100-jährigen THPs von 6 – 16, wobei der troposphärische Anteil mit 4,3 – 11,5 angegeben wird. Außerdem wurde erstmals auch eine Bandbreite des 20-jährigen THPs von 20 – 44 bestimmt. Alle Werte wurden durch ein besseres Verständnis des Wasserstoffkreislaufs und dessen Abbildung in chemischen Transportmodellen über die Jahre aktualisiert. Unsicherheiten bleiben aber weiterhin bestehen (Derwent et al. 2020).

**Tabelle 1: Treibhauspotentialwerte von Wasserstoff**

Treibhauspotential	Zeithorizont	Quelle
33 (20 – 44)	20 Jahre	Warwick et al. (2022); Ocko und Hamburg (2022)
11 ± 5	100 Jahre	Warwick et al. (2022); Ocko und Hamburg (2022)
3,3 ± 1,4	100 Jahre	Field und Derwent (2021)
5 ± 1	100 Jahre	Derwent et al. (2020)
4,3	100 Jahre	Derwent (2018)
5,8	100 Jahre	Derwent et al. (2006)

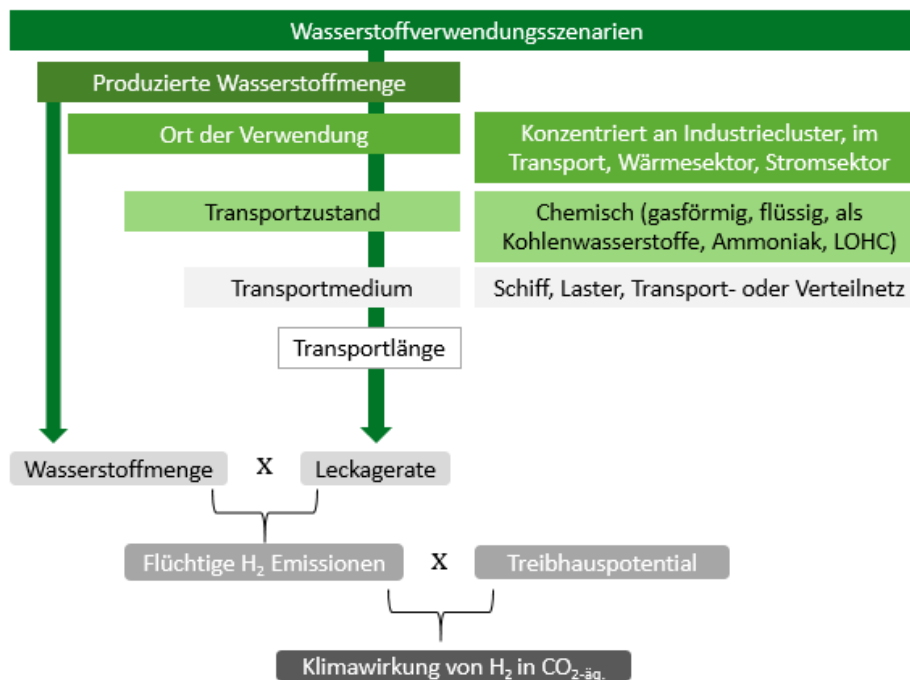
Quelle: wie angegeben

### 3 Einflussfaktoren auf die Höhe zukünftiger Wasserstoffemissionen

Im Zuge der Energiewende und eines verstärkten Einsatzes von Wasserstoff als Energieträger könnten sich die anthropogenen Wasserstoffemissionen ändern. Durch weniger Verbrennung fossiler Energieträger reduzieren sich zwar die Emissionen aus dieser Quelle. Jedoch erhöht sich die Menge an direkt verwendetem Wasserstoff durch neue Anwendungsgebiete. Dieser soll primär nicht aus fossilen Quellen, sondern mittels Elektrolyse aus Wasser und Strom gewonnen werden. Vielfältigere Anwendungsmöglichkeiten wiederum können auch die Transportdistanzen erhöhen, was sich auf die Menge der diffusen Emissionen auswirkt. Auch eine gesteigerte Biomassenutzung kann je nach Verbrennungsmethode die Emissionen erhöhen.

Der absolute Wert diffuser Emissionen von Wasserstoff ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig, die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zusammengefasst sind. Unter Emissionen werden in dieser Studie der unbeabsichtigte oder beabsichtigte Verlust von Wasserstoff in der Wertschöpfungskette und dessen Freisetzung in die Atmosphäre verstanden, etwa durch Leckagen an Betriebsmitteln wie Verdichtern oder Ventilstationen, Diffusion durch Leitungen und Ventile, bei Wartungsarbeiten oder durch Verdampfen während des Speicherns.

**Abbildung 1: Einflussfaktoren auf die flüchtigen Emissionen von Wasserstoff**



Quelle: eigene Darstellung.

## 4 Studien zur Abschätzung der zukünftigen globalen diffusen Wasserstoffemissionen

Der Gehalt an Wasserstoff in der Troposphäre beträgt nach Vogel et al. (2012) ca. 530 ppbv, verursacht zu ca. 40-50 % durch anthropogene Intervention - etwa durch die Verbrennung von fossilen oder biogenen Brennstoffen in gleichen Anteilen (vgl. auch Feck (2009)). Durch die Zunahme der Verbrennung fossiler Brennstoffe ist die Konzentration von Wasserstoff in der Atmosphäre während des 20. Jahrhunderts um ca. 37 % gestiegen (Patterson et al. 2020). Die Produktions- und Abbaurate schwankt heutzutage um Werte um ca. 76 Mt H<sub>2</sub>/a, woraus sich eine H<sub>2</sub>-Lebensdauer von ca. 2,2 ± 0,2 Jahren ergibt. Die Lebensdauer von H<sub>2</sub> ist für eine relativ homogene Verteilung in der Troposphäre ausreichend (Vogel et al. 2012). Ca. 30 % des Wasserstoffs werden über die Reaktion mit OH entfernt, 70 % über Senken im Boden. Die Gesamtlast in der Troposphäre beträgt 165 ± 8 Mt H<sub>2</sub> (Pieterse et al. 2013).

Flüchtige Wasserstoffemissionen wurden bereits in mehreren Studien analysiert. Viele der Studien wurden bereits zu Beginn der 2000er Jahre veröffentlicht. Einige der Studien gehen noch von einer breiten zukünftigen Anwendung von Wasserstoff aus, bspw. in Brennstoffzellen-PKWs (Bond et al. 2011). In Warwick et al. (2004) und Tromp et al. (2003) werden alle fossilen Technologien durch wasserstoffbasierte ersetzt. In neueren Szenarienstudien wird die Rolle von Wasserstoff im Vergleich dazu vornehmlich in der Industrie, im Langstreckentransport und als Speicher im Stromsektor gesehen (Agora Energiewende 2021; Fraunhofer ISI et al. 2021; SRU 2021), was die absolute Menge an Wasserstoff im Umlauf, die absolute Menge an Anwendergeräten und auch die Transportwege des Wasserstoffs beeinflusst. Die Annahme einer Emissionsrate von 20 % aus Tromp et al. (2003) wurde bereits als überschätzend eingestuft (Vogel et al. 2012). Tabelle 2 zeigt Beispiele abgeschätzter H<sub>2</sub>-Emissionsraten aus der Literatur.

**Tabelle 2: Emissionsraten und ihre Auswirkungen auf die H<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre**

Geografischer Kontext	H <sub>2</sub> -Emissionsrate Min	H <sub>2</sub> -Emissionsrate Max	H <sub>2</sub> -Emissionsrate in Mt/a, (Jahr)	Konzentration in der Atmosphäre (ppmv)	Quelle
Global	3%	10 %	ca. 600-800 <sup>a,c</sup>	0,65-1,1	Schultz et al. (2003)
Global	1%	12 %	2600 <sup>a</sup>	0,55-1,40	Warwick et al. (2004)
Global	1 %		2500 <sup>a</sup>	Keine Angabe	Derwent et al. (2006)
Global	2 %	12,8 %	349-1875 (2050) 2750 (2080)	Keine Angabe	Feck (2009)
Global	0,3 %	10 %	Keine Angabe	Keine Angabe	van Ruijven et al. (2011)
Global	0,5 %		225 (2050) 1692 (2100)	Keine Angabe	Bond et al. (2011)
Global	1%	10 %	Max. 2750 (2080)	0,65-2,3	Vogel et al. (2012)
Europa	0,1%	4 %	Keine Angabe	Keine Angabe	Popa et al. (2015)
Großbritannien	1 %		Keine Angabe	+0,4 ppb	Derwent (2018)
Global	0,31%	5,26 %	667 (2050)	Keine Angabe	Cooper et al. (2021)

Quelle: wie angegeben. Die H<sub>2</sub>-Menge wurde von Mt/a in EJ mit dem H<sub>2</sub>-Heizwert von 120 MJ/kg umgerechnet.

<sup>a</sup> Keine Jahresangabe.

<sup>b</sup> Annahme: alle fossilen Verbrennungsanlagen werden mit Brennstoffzellen ersetzt.

<sup>c</sup> Annahme: 50% aller fossilen Verbrennungsanlagen werden mit Brennstoffzellen ersetzt.

Einzelne Studien untersuchen die Klimaauswirkungen von H<sub>2</sub>-Emissionen in einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft. Nach Derwent et al. (2006) emittiere die globale Wasserstoffwirtschaft bei einer Emissionsrate von 1 % 25 Mt H<sub>2</sub>/a - dies macht bei einem THP von 5,8 eine Klimawirkung von 150 Mt. CO<sub>2</sub>/a aus. Zum Zeitpunkt der Studie waren dies 0.6 % der Emissionen des fossilen Energiesystems. Feck (2009) analysiert mehrere Szenarien für 2050 und 2080. Das "Worst-Case"-Szenario produziert bei einer Wasserstoffnutzung von 332 EJ und einer Emissionsrate von 9 % Wasserstoffemissionen in Höhe von 317 Mt/a in 2080. Damit wäre die Wasserstoffwirtschaft für 78 % der jährlichen Gesamtwasserstoffemissionen verantwortlich. Die verbleibenden Emissionen entstehen durch natürliche H<sub>2</sub>-Quellen und biogene und fossile Verbrennung (Feck 2009).

In Bond et al. (2011) wird geschätzt, dass sich die anthropogenen H<sub>2</sub>-Emissionen von 2010 bis 2050 netto reduzieren, da die neuen Emissionen der grünen Wasserstoffwirtschaft durch das reduzierte fossile H<sub>2</sub> ausgeglichen werden. Bis 2100 kommt es dann jedoch zu einer Nettozunahme der H<sub>2</sub>-Emissionen. Popa et al. (2015) berechnen H<sub>2</sub>-Emissionen für sechs europäische Szenarien zwischen 2015 und 2020, in denen die Emissionen von ca. 1,1 Mt/a auf bis zu 4,5 Mt/a im Szenario mit einer Emissionsrate von 4 % steigen.

Je nach Ausgestaltung der zukünftigen Energieversorgung ergibt sich eine unterschiedliche H<sub>2</sub>-Produktionsmenge sowie unterschiedliche Anwendungsgebiete. Nach van Ruijven et al. (2011) haben Wertschöpfungsketten mit flüssigem H<sub>2</sub>, Straßentransport und häufigem Wechsel zwischen Transportmedia höhere Emissionsraten. Da sich Emissionen vor allem an Betriebsmitteln wie Kompressoren oder Ventilen von Rohrleitungen ergeben (Feck 2009), wird

es einen Unterschied machen, ob Wasserstoff in Szenarien nur über das Transportnetz zu zentralen Verarbeitungsstandorten der Industrie geleitet wird, oder über das Verteilnetz zu verschiedensten Anwendungsorten.

Tabelle 3 stellt die flüchtigen Wasserstoffemissionen über die gesamte Wertschöpfungskette aus zwei Studien gegenüber (Feck 2009; Cooper et al. 2021). Nach Feck (2009) sind Wasserstoffemissionen für Druckwasserstoff vor allem während Produktion und Transport relevant, für Flüssigwasserstoff vor allem während der Speicherung. Aber auch hier kommt es auf die spezifischen Speicherbedingungen an (z.B. können Emissionen aufgefangen und rückverflüssigt werden). Die Wasserstoffemissionen aus ehemaligen Erdgaspipelines seien etwa dreimal so hoch wie die von Erdgas<sup>1</sup>. In Zukunft könnte die Emissionsrate durch technische Optimierungen für Druckwasserstoff auf insgesamt 1,7% und für Flüssigwasserstoff auf 1,6 % reduziert werden (Feck 2009).

In einer aktuelleren Studie von Cooper et al. (2021) werden für verschiedene Wasserstoff-wertschöpfungsketten H<sub>2</sub>-Emissionen berechnet. Zwei Elektrolysewertschöpfungsketten werden beispielhaft in Tabelle 3 dargestellt. Für viele der Einflussparameter, wie etwa der Schlupf während Kompression, Speicherung, Transport und Verteilung gibt es weiterhin nur wenige Messungen und Studien. Cooper et al. (2021) ziehen daher zur Abschätzung Werte für Erdgas heran. Diese wurden im Hinblick auf die Art der Emissionen, den Durchfluss und der physikalischen Eigenschaften der Gase an Wasserstoff angepasst. Für die flüchtigen Emissionen während der Produktion werden die Werte von Feck (2009) herangezogen. Um die Auswirkungen einer globalen Wasserstoffwirtschaft zu ermitteln, werden die H<sub>2</sub>-Emissionen basierend auf einem globalen Wasserstoffverbrauch von 80 EJ in 2050 hochgerechnet. Es ergibt sich eine äquivalente CO<sub>2</sub>-Menge mit einer großen Spannweite zwischen 9 und 138 Mt. CO<sub>2</sub>. Auch hier wird die Auswirkung im Vergleich zu den globalen Emissionen in 2050 als gering eingeschätzt (Cooper et al. 2021).

**Tabelle 3: Wasserstoffemissionen entlang der Vorkette nach Feck (2009) und Cooper et al. (2021)**

Feck (2009)	Druckwasserstoff		Flüssigwasserstoff		Cooper et al. (2021)	"North Sea" Druckwasserstoff		"Australia green" Flüssigwasserstoff	
	Min.	Max.	Min.	Max.		Min.	Max.	Min.	Max.
Herstellung	0,1 %	4,0 %	0,1 %	1,0 %	Herstellung (Elektrolyse)	0,10 %	4,00 %	0,10 %	4,00 %
Konditionierung	0,1 %	0,5 %	0,1 %	1,0 %	Konditionierung	k.A.	k.A.	0,14 %	0,95 %
Transport	1,5 %	4,8 %	0,3 %	1,0 %	Schiff	n.a.	n.a.	0,00 %	0,10 %
					Regasifizierung	n.a.	n.a.	0,00 %	0,00 %
Speicherung	0,1 %	0,1 %	5,0 %	10,0 %	Übertragung + Speicherung	0,04 %	0,06 %	0,02 %	0,05 %
					Verteilung	0,30 %	0,03 %	0,05 %	0,16 %
Nutzung	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %					
<b>Akkumulierte H<sub>2</sub>-Emissionsrate</b>	<b>1,9 %</b>	<b>9,2 %</b>	<b>5,6 %</b>	<b>12,8 %</b>	<b>Akkumul. H<sub>2</sub>-Emissionsrate</b>	<b>0,44 %</b>	<b>4,09 %</b>	<b>0,31 %</b>	<b>5,26 %</b>

k.A. = keine Angabe; n.a. = nicht anwendbar

Quelle: Feck (2009) und Cooper et al. (2021).

<sup>1</sup> Auf Basis der höheren Diffusivität von Wasserstoff (0,61 cm/s) im Vergleich zu Erdgas (0,16 cm/s).

## 5 Abschätzung der nationalen Wasserstoffemissionen und deren Treibhauswirkung

Im Folgenden wird eine Abschätzung der diffusen Wasserstoffemissionen der Energiewende in Deutschland auf Basis eigener Berechnungen durchgeführt. In Riemer et al. (2021) wurden bereits die Gesamtemissionen von Wasserstoffwertschöpfungsketten in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten berechnet. Hierfür wurden CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>- und auch bereits H<sub>2</sub>-Emissionen ermittelt. Für die H<sub>2</sub>-Emissionen wurde ein 100-jähriges THP von 4,3 (Derwent 2018) und eine Emissionsrate von 4,9 %<sup>2</sup> verwendet. Es wurde davon ausgegangen, dass sich die diffusen H<sub>2</sub>-Emissionen auf den Transport des Wasserstoffs (Transportweg 2.000 km) beschränken. Da immer von der gleichen Transportdistanz und -art ausgegangen wurde, ergaben sich für alle berechneten Fälle H<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 1,7 g CO<sub>2</sub>-äq./MJ H<sub>2</sub>. Der Wert wurde im Folgenden um eine Sensitivitätsanalyse mit einem minimalen und maximalen Wert für das 100-jährige THP und die Emissionsrate von Wasserstoff ergänzt (Tabelle 4). Für das THP wurden die minimalen und maximalen Werte aus den Forschungsergebnissen in Tabelle 1 verwendet. Für die Emissionsrate wurde auf Basis der Literaturbandbreite in Tabelle 2 ein durchschnittlicher Wert von 1 % für die untere Grenze und 10 % für die obere Grenze, übereinstimmend mit den angenommenen Bandbreite aus der Analyse von Vogel et al. (2012), gewählt.

**Tabelle 4: Treibhauspotentialwerte von Wasserstoff aus der Literatur**

Treibhausgaspotential	Einheit	Basisfall	Min.	Max.	Quelle
100-jähriges THP	kg CO <sub>2</sub> -äq./kg H <sub>2</sub>	4,3	1,9	16	Siehe Tabelle 1
Emissionsrate	%	5	1	10	Siehe Tabelle 2
Diffuse Emissionen H <sub>2</sub> *	g CO <sub>2</sub> -äq./MJ H <sub>2</sub>	1,7	0,16	5,2	

\* Umgerechnet mit dem Wasserstoffheizwert von 120 MJ/kg.

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf Tabelle 1 und Tabelle 2

Die **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** zeigt für verschiedene Wasserstoffherstellungstechniken in zwei "Welten" die resultierenden Gesamtemissionen und gibt an, welchen Anteil die Wasserstoffemissionen dazu beitragen. In der fossilen Welt wird die Energie aus der Wertschöpfungskette (z.B. für Prozesswärme oder Kompressoren) noch aus fossilen Quellen gewonnen. In der dekarbonisierten Welt wird entsprechend davon ausgegangen, dass die gesamte Infrastruktur dekarbonisiert ist. Zunächst wird die Bandbreite der Gesamtemissionen aus CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und H<sub>2</sub>, die sich durch den minimalen und maximalen Fall ergeben, berechnet. Daneben wurde für einen Basisfall (Riemer und Wachsmuth 2022) sowie für den Minimal- und Maximalfall ermittelt, wie hoch der Anteil an flüchtigen H<sub>2</sub>-Emissionen an den jeweiligen Gesamtemissionen ist (**Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.**). Es ist erkennbar, dass im zukünftigen Energiesystem der Wasserstoff ausschlaggebend für die verursachten Emissionen ist.

Um die Treibhauswirkungen von Wasserstoffemissionen einschätzen zu können, wird deren Auswirkung auf die Gesamtemissionen in Deutschland in 2050 berechnet. Dazu wurden Daten zum Wasserstoffverbrauch sowie zur THG-Bilanz aus den Langfristszenarien (Fraunhofer ISI et al. 2021) verwendet. Auch hier wird auf Basis von Wasserstoffverbrauch, THP und Emissionsrate eine Bandbreite berechnet. Im Ergebnis müssten Wasserstoffemissionen

<sup>2</sup> Basierend auf Feck 2009 wurde die dreifache angenommene Methanleckage (1,6%) verwendet.

zwischen 0,1 – 33,1 Mt. CO<sub>2</sub>-äq. zusätzlich ausgeglichen werden. Dabei ist zu beachten, dass bei einer breiter gefächerten Nutzung wie im Wasserstoffszenario der Langfristszenarien der Wasserstoff auch über die Verteilnetze transportiert werden muss. Dies erhöht die Anzahl von Wartungsvorgängen und benutzter Betriebsmittel wie Ventile, wodurch mit einer H<sub>2</sub>-Emissionsrate am höheren Ende der Bandbreite zu rechnen ist. Somit multipliziert sich hier ein höherer H<sub>2</sub>-Bedarf mit einer höheren Emissionsrate, was die diffusen Emissionen deutlich erhöht.

**Tabelle 5: Anteil H<sub>2</sub>-Emissionen an Gesamtemissionen für verschiedene Wasserstoffherstellungsarten**

	Wasserstoffherstellungsart	Gesamtemissionen-Bandbreite (inkl. Vorkette) (g CO <sub>2</sub> -äq./MJ H <sub>2</sub> )		Anteil H <sub>2</sub> -Emissionen an Gesamtemissionen		
		Min	Max	Basisfall	Min	Max
Fossile Welt	Grau (SMR)	132,66	145,83	1,3 %	0,1 %	9,14 %
	Türkis (Methanpyrolyse)	94,62	107,79	1,8 %	0,2 %	12,37 %
	Blau (SMR + CCS)	99,48	112,65	1,7 %	0,2 %	11,84 %
	Grün (Elektrolyse)	48,43	61,60	3,5 %	0,3 %	21,64 %
Dekarbonisierte Welt	Türkis (Methanpyrolyse)	0,95	59,19	69,0 %	17,1 %	22,53 %
	Blau (ATR + CCS)	2,83	14,12	39,5 %	5,7 %	94,45 %
	Grün (Elektrolyse)	0,16	16,00	99,9 %	98,9 %	>99,9 %

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf Riemer et al. (2021).

Um die aus Wasserstoff resultierenden Emissionen ins Verhältnis zu setzen, werden diese in Tabelle 6 mit den durch Senken auszugleichenden, residualen THG-Emissionen aus der Studie Klimaneutrales Deutschland 2045 (Prognos et al. 2021) verglichen.

**Tabelle 6: Treibhauswirkung von Wasserstoffemissionen im Vergleich zu den zu auszugleichenden Emissionen in Deutschland (2045)**

	Einheit	Min	Med	Max	Quelle
H <sub>2</sub> -Verbrauch	Mt H <sub>2</sub> /Jahr	3,1	7,9	20,7	Fraunhofer ISI et al. (2021)
H <sub>2</sub> -Emissionsrate	%	1,0	5,0	10,0	Siehe Tabelle 2
Absolute H <sub>2</sub> -Emissionen	Mt H <sub>2</sub> /Jahr	0,03	0,39	2,07	
H <sub>2</sub> -Treibhauspotential	Mt CO <sub>2</sub> -äq./Mt H <sub>2</sub>	1,9	4,3	16,0	Siehe Tabelle 1
Absolute H <sub>2</sub> -Emissionen in CO <sub>2</sub> -Äquivalenten	Mt CO <sub>2</sub> -äq./Jahr	0,06	1,7	33,1	
Durch Senken auszugleichende residuale THG-Emissionen in THG-neutralem Szenario	Mt CO <sub>2</sub> -äq.	63			Prognos et al. (2021)

Quelle: Eigene Berechnungen soweit nicht anders angegeben

## 6 Fazit

Wasserstoff verursacht in der Atmosphäre eine indirekte Treibhauswirkung. In welcher Höhe, hängt vom Umfang der absoluten Wasserstoffemissionen ab. Diese wiederum werden von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst: von der Höhe der Produktion von Wasserstoff in der zukünftigen Wasserstoffwirtschaft, der Emissionsrate in den gewählten Wertschöpfungsketten sowie der verbleibenden Verbrennung fossiler und biogener Energieträger. Viele der Einflussparameter sind heute noch nicht eindeutig quantifizierbar, was eine Aussage über die möglichen Auswirkungen von Wasserstoffemissionen erschwert. Auch können die berechneten Emissionen nicht in nationalen Emissionsinventaren aufgeführt werden, da Wasserstoff nicht auf der Liste der Klimagase des Pariser Klimaschutzabkommen und der der Klimarahmenkonventionen §12 steht.

Der untersuchten Studien u. A. von Vogel et al. (2012), Cooper et al. (2021), Derwent (2018), Derwent et al. (2020), Field und Derwent (2021) kommen zu der Schlussfolgerung, dass in Bezug auf die Klimawirkung die Vorteile der Wasserstoffnutzung dessen Nachteile überwiegen. Die absolute Anzahl an Studien im Peer-Review sind jedoch begrenzt, und daher sind nach Derwent (2018) und Warwick et al. (2022) die Auswirkungen von Wasserstoff in der Atmosphäre noch nicht eindeutig quantifizierbar. Weiterhin entstammen die publizierten Quellen zur Quantifizierung des THP von Wasserstoff von wenigen Forschungsgruppen. Für einen breiten und transparenten wissenschaftlichen Konsens wären Analysen weiterer Forschungsgruppen wünschenswert.

Nach Riemer et al. (2021) liegt die durch diffuse Wasserstoffemissionen ausgelöste Treibhauswirkung je nach Länge des Transportwegs zwischen 0,1 und 5 g CO<sub>2-äq.</sub> pro MJ H<sub>2</sub>. Wird der Energiebedarf der Wertschöpfungskette noch fossil bereitgestellt, ist dieser Wert im Vergleich zu den Emissionen von CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> gering. In einer zukünftigen Energieversorgung mit deutlich größeren Anwendungsbereichen für Wasserstoff als heute fallen die Emissionen deutlich mehr ins Gewicht. Um ihre Auswirkung für Deutschland abzuschätzen, wurden die H<sub>2</sub>-Emissionen für die Wasserstoffnachfragen auf Basis der Langfristszenarien berechnet. Es fallen Emissionen des indirekten Treibhausgases zwischen 0,1 – 33,1 Mt. CO<sub>2-äq.</sub> an, welche ausgeglichen werden müssen. Die Kontrolle der diffusen Wasserstoffemissionen in einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft wird neben den Umweltfolgen auch aus ökonomischer Sicht aufgrund der hohen Produktionskosten von grünem Wasserstoff essentiell notwendig werden.



Bei einer breiten Anwendung von Wasserstoff, also beispielsweise auch im Gebäudesektor, kann prinzipiell von höheren Emissionen ausgegangen werden. Hier besteht grundsätzlich höheres Potential für Leckagen an Betriebsmitteln wie Verdichtern oder Ventilstationen, Diffusion durch Leitungen und Ventile, und ähnliche. Wird Wasserstoff vorwiegend an Industriestandorten konzentriert eingesetzt ist mit deutlich weniger Emissionen zu rechnen.



---

## 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  
/umweltbundesamt.de  
/umweltbundesamt

### Autoren, Institutionen

Matia Riemer, Jakob Wachsmuth  
Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI  
Im Rahmen des Forschungsvorhaben „Transformation der Gasinfrastruktur zum Klimaschutz“ (FKZ 3720435030).  
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

**Fertigstellung:** 10/2022

## Literaturverzeichnis

- Agora Energiewende, Agora Industry (2021): 12 Insights on Hydrogen.
- Bauer, Christian; Treyer, Karin; Antonini, Cristina; Bergerson, Joule; Gazzani, Matteo; Gencer, Emre et al. (2021): On the climate impacts of blue hydrogen production. In: *Sustainable Energy Fuels* 6 (1), S. 66–75. DOI: 10.1039/D1SE01508G.
- BMWi (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Bond, S. W.; Gül, T.; Reimann, S.; Buchmann, B.; Wokaun, A. (2011): Emissions of anthropogenic hydrogen to the atmosphere during the potential transition to an increasingly H<sub>2</sub>-intensive economy. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (1), S. 1122–1135. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.10.016.
- Cooper, Jasmin; Dubey, Luke; Bakkaloglu, Semra; Hawkes, Adam (2021): Hydrogen Emissions from the Hydrogen Value Chain- Emissions Profile and Impact to Global Warming.
- Derwent, R. G. (2018): HYDROGEN FOR HEATING: ATMOSPHERIC IMPACTS. BEIS Research Paper Number 2018: no. 21. Hg. v. Department for Business, Energy and Industrial Strategy.
- Derwent, Richard; Simmonds, Peter; O'Doherty, Simon; Manning, Alistair; Collins, William; Johnson, Colin et al. (2006): Global Environmental Impacts of the Hydrogen Economy. Online verfügbar unter [https://www.geos.ed.ac.uk/~dstevens/Presentations/Papers/derwent\\_ijhr06.pdf](https://www.geos.ed.ac.uk/~dstevens/Presentations/Papers/derwent_ijhr06.pdf).
- Derwent, Richard G.; Stevenson, David S.; Utembe, Steven R.; Jenkin, Michael E.; Khan, Anwar H.; Shallcross, Dudley E. (2020): Global modelling studies of hydrogen and its isotopomers using STOCHEM-CRI: Likely radiative forcing consequences of a future hydrogen economy. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (15), S. 9211–9221. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.125.
- Feck, T. (2009): Wasserstoff-Emissionen und ihre Auswirkungen auf den arktischen Ozonverlust. Risikoanalyse einer globalen Wasserstoffwirtschaft. Schriften des Forschungszentrums Jülich. Volume 51 (Reihe Energie & Umwelt, ISBN 978-3-89336-593-7).
- Field, R. A.; Derwent, R. G. (2021): 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. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (58), S. 30190–30203. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.120.
- Fraunhofer ISI; Consentec; ifeu; TU Berlin (2021): Langfristszenarien 3. Kurzbericht. Auftraggeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Online verfügbar unter [https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS\\_Kurzbericht\\_final\\_v5.pdf](https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS_Kurzbericht_final_v5.pdf).

- Howarth, Robert W.; Jacobson, Mark Z. (2021): How green is blue hydrogen? In: *Energy Sci Eng* 9 (10), S. 1676–1687. DOI: 10.1002/ese3.956.
- Ocko, Ilissa B.; Hamburg, Steven P. (2022): Climate consequences of hydrogen emissions. In: *Atmos. Chem. Phys.* 22 (14), S. 9349–9368. DOI: 10.5194/acp-22-9349-2022.
- Parkinson, B.; Balcombe, P.; Speirs, J. F.; Hawkes, A. D.; Hellgardt, K. (2019): Levelized cost of CO<sub>2</sub> mitigation from hydrogen production routes. In: *Energy Environ. Sci.* 12 (1), S. 19–40. DOI: 10.1039/C8EE02079E.
- Patterson, J. D.; Aydin, M.; Crotwell, A. M.; Petron, G.; Severinghaus, J. P.; Saltzman, E. S. (2020): Atmospheric History of H<sub>2</sub> Over the Past Century Reconstructed From South Pole Firn Air. In: *Geophysical Research Letters* 47 (14). DOI: 10.1029/2020GL087787.
- Pearman, Graeme; Prather, Michael (2020): Don't rush into a hydrogen economy until we know all the risks to our climate. In: *The Conversation* 2020, 09.08.2020.
- Pieterse, G.; Krol, M. C.; Batenburg, A. M.; M. Brenninkmeijer, C. A.; Popa, M. E.; O'Doherty, S. et al. (2013): Reassessing the variability in atmospheric H<sub>2</sub> using the two-way nested TM5 model. In: *J. Geophys. Res. Atmos.* 118 (9), S. 3764–3780. DOI: 10.1002/jgrd.50204.
- Popa, M. E.; Segers, A. J.; van der Denier Gon, H.A.C.; Krol, M. C.; Visschedijk, A.J.H.; Schaap, M.; Röckmann, T. (2015): Impact of a future H<sub>2</sub> transportation on atmospheric pollution in Europe. In: *Atmospheric Environment* 113, S. 208–222. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.03.022.
- Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.
- Riemer, Matia; Wachsmuth, Jakob (2022): Welche Treibhausgasemissionen verursacht die Wasserstoffproduktion? Vergleich der Klimawirkungen verschiedener Wasserstoffarten entlang der Wertschöpfungskette. Factsheet. Unter Mitarbeit von Benjamin Pfluger und Stella Oberle. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Schultz, Martin G.; Diehl, Thomas; Brasseur, Guy P.; Zittel, Werner (2003): Air pollution and climate-forcing impacts of a global hydrogen economy. In: *Science (New York, N.Y.)* 302 (5645), S. 624–627. DOI: 10.1126/science.1089527.
- SRU (2021): Wasserstoff im Klimaschutz. Klasse statt Masse. Stellungnahme. Hg. v. Sachverständigenrat für Umweltfragen.
- Tromp, Tracey K.; Shia, Run-Lie; Allen, Mark; Eiler, John M.; Yung, Y. L. (2003): Potential environmental impact of a hydrogen economy on the stratosphere. In: *Science (New York, N.Y.)* 300 (5626), S. 1740–1742. DOI: 10.1126/science.1085169.
- van Ruijven, Bas; Lamarque, Jean-Francois; van Vuuren, Detlef P.; Kram, Tom; Eerens, Hans (2011): Emission scenarios for a global hydrogen economy and the consequences for global air pollution. In: *Global Environmental Change* 21 (3), S. 983–994. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2011.03.013.
- Vogel, Bärbel; Feck, Thomas; Groß, Jens-Uwe; Riese, Martin (2012): Impact of a possible future global hydrogen economy on Arctic stratospheric ozone loss. In: *Energy Environ. Sci.* 5 (4), S. 6445. DOI: 10.1039/C2EE03181G.
- Warwick, N.; Griffiths, P.; Keeble, J.; Archibald, A.; Pyle, J. (2022): Atmospheric implications of increased hydrogen use. Department for Business, Energy and Industrial Strategy. Online verfügbar unter <https://www.gov.uk/government/publications/atmospheric-implications-of-increased-hydrogen-use>.
- Warwick, N. J.; Bekki, S.; Nisbet, E. G.; Pyle, J. A. (2004): Impact of a hydrogen economy on the stratosphere and troposphere studied in a 2-D model. In: *Geophys. Res. Lett.* 31 (5), n/a-n/a. DOI: 10.1029/2003GL019224.