

Stand: 3. Dezember 2024

Technische Ansätze zur Entfernung von Methan aus der Atmosphäre (methane removal)

Faktencheck und Diskussion



Zusammenfassung

Methan (CH_4) ist ein Treibhausgas mit einer etwa 30-fachen Klimawirksamkeit im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid (CO_2). Die kurzfristige Klimawirksamkeit (über einen Zeitraum von 20 Jahren) ist sogar bis zu 86-mal höher als CO_2 . Methan wird in der Atmosphäre durch natürliche chemische Reaktionen im Zeitraum mehrerer Jahre zu CO_2 oxidiert. Die maximale treibhauswirksame Verweildauer von CH_4 in der Luft beträgt etwa 12,4 Jahre (Ehhalt et al. 2018; Abernethy et al. 2021). Dadurch verringert sich die Klimawirksamkeit einer Mengeneinheit an emittiertem CH_4 , während es in der Atmosphäre für CO_2 keinen chemischen Selbstreinigungsmechanismen gibt¹. Die natürlichen Selbstreinigungsmechanismen der Atmosphäre reichen allerdings nicht aus, um den Anstieg der atmosphärischen CH_4 -Konzentration zu kompensieren, da die Methanemissionen aus anthropogenen Quellen zunehmen und die Freisetzung von Methan aus geologischen Speichern durch die Klimaerwärmung beschleunigt wird. Dadurch ist die CH_4 -Konzentration in der Atmosphäre von ca. 0,7 ppm (parts per Million Luftmoleküle) in vorindustrieller Zeit auf etwa 2 ppm gestiegen und wird voraussichtlich weiter zunehmen. Infolgedessen nimmt auch der Beitrag von CH_4 zur Klimaerwärmung zu. Außerdem nimmt die Senkenleistung in der Atmosphäre mit steigender CH_4 -Konzentration ab, da die Neubildungsrate von Hydroxylradikalen überschritten wird.

Vor diesem Hintergrund werden in der Literatur verschiedene technologische Ansätze zur beschleunigten Entfernung von Methan aus der Atmosphäre diskutiert. Diese Ideen lehnen sich an die technisch bereits weiter gediehenen Verfahren für Carbon Dioxide Removal (CDR) bzw. Negativemissionstechnologien für CO_2 an. Dabei besteht die größte Herausforderung darin, das in der Luft vorhandene Methan trotz der relativ geringen Konzentration von 2 ppm wirksam zu chemischen oder physikalischen Reaktionen anzuregen. Im Gegensatz zu CO_2 mit einer deutlich höheren atmosphärischen Konzentration von derzeit ca. 420 ppm ist CH_4 in der Luft nicht nur wesentlich stärker verdünnt, sondern auch chemisch weniger reaktiv.

Gegenwärtig werden vor allem die folgenden Methoden zur Entfernung von Methan aus der Atmosphäre in Betracht gezogen:

1. **Thermisch-katalytische Oxidation:** Bei diesem Verfahren werden Katalysatoren eingesetzt, um das Methan mittels chemischer Reaktion bei hohen Temperaturen von mehreren 100°C zu weniger klimawirksamen Kohlendioxid umzuwandeln. Dieser Ansatz ist jedoch nur für CH_4 -Konzentrationen von über 5.000 ppm (0,5 vol%) in der Luft relevant.
2. **Photokatalytische Oxidation:** Bei diesem Verfahren wird mithilfe von (Sonnen-)Licht ein Katalysator aktiviert, der das Methan in der Atmosphäre schrittweise oxidiert. Dies ist ein natürlicher Vorgang in der Atmosphäre und ist auch bei geringen Methankonzentrationen von < 2 ppm wirksam. Technische Ansätze zur Methanentfernung zielen darauf ab, größere

¹ CO_2 wird teilweise durch Photosynthese in Biomasse umgewandelt oder in Gewässern zu Kohlensäure und anschließend mineralisch gebunden. Diese Mechanismen sind wiederum für CH_4 nicht wirksam, solange es nicht zu CO_2 oxidiert worden ist.

Mengen an katalytisch wirkenden Substanzen in die Luft einzubringen. Als Katalysator eignen sich gasförmige Hydroxyl- oder Chlornradikale oder Feststoffe wie z. B. Titandioxid.

3. **Biologische Methanentfernung:** Bestimmte Bakterienarten (sogenannte Methanotrophe) können Methan metabolisieren und in Kohlendioxid oder Methanol für die industrielle Nutzung umwandeln. Dieser Ansatz ist jedoch nur für CH_4 -Konzentrationen von über 500 ppm in der Luft relevant.
4. **Anreicherung mit Zeolithen oder anderen porösen Feststoffen:** Zeolithe sind Mineralien, die Methan aus der Luft absorbieren können. Wenn sie mit einer geringen Menge Kupfer behandelt werden, absorbieren Zeolithe Methan sehr effektiv, selbst bei niedrigen atmosphärischen Konzentrationen um 2 ppm.

Während die thermische Oxidation von Methan eine bereits seit Jahrzehnten praktizierte Technologie darstellt (Abfackeln von Raffinerieabgasen bei der Mineralölförderung) funktioniert diese Technik nur bei nennenswert hohen Methankonzentrationen über 500 ppm. Hingegen sind die oben genannten technologische Ansätze für die Entfernung von Methan aus der Atmosphäre bei einer Konzentration von etwa 2 ppm insgesamt noch in frühen Entwicklungsstadien und daher in absehbarer Zeit nicht anwendungsreif.

Ziel dieses Arbeitspapiers ist es, den Entwicklungsstand der technischen Ansätze zur Entfernung von Methan aus der Atmosphäre systematisch aufzubereiten. Der Fokus liegt dabei auf Technologien, die geeignet sind, Methan bei der aktuellen mittleren atmosphärischen Konzentration von ca. 2 ppm aus der Atmosphäre zu entfernen.

Leitfrage: Welche Ansätze zur Entfernung von Methan gibt es und welche Potenziale und Kosten sind damit verbunden?

Die Informationen wurden mittels Literaturrecherche in wissenschaftlichen Publikationen zusammengetragen. Dabei wurde zur Einschätzung des technologischen Entwicklungsstadiums der jeweiligen Konzepte der Maßstab der Technologiereifegrade (TRL) angewendet (Europäische Kommission 2014).

1 Hintergrund

Die aktuelle klimapolitische Diskussion steht unter dem Paradigma der Vermeidung einer globalen Klimaerwärmung von mehr als 1,5°C durch die Reduktion von Treibhausgasemissionen. Im Mittelpunkt steht dabei das Treibhausgas (THG) Kohlendioxid (CO₂), das derzeit mengenmäßig den größten Anteil am anthropogenen Klimawandel hat. Daneben sind aber auch andere Treibhausgase aufgrund ihrer hohen Klimawirksamkeit von Bedeutung: Insbesondere Methan (mit der 30-fachen Klimawirksamkeit von CO₂ über 100 Jahre), Lachgas (ca. 265-fach) und verschiedene Fluorkohlenwasserstoffe (bis zu 24.000-fach). Auch diese THG sind Gegenstand von Bemühungen zur Emissionsreduktion (Umweltbundesamt 2022). Dieses Primat der Klimapolitik basiert sowohl auf der Umsetzung von technischen Maßnahmen zur Begrenzung von THG-Emissionen als auch auf sozioökonomischen Ansätzen zur Reduktion der emissionsverursachenden Produktions- und Konsumprozesse (Vermeidung).

Allerdings mehren sich Stimmen, die auf die Notwendigkeit einer Suche nach weitergehenden Lösungen verweisen. Dabei wird argumentiert, dass die technischen und sozioökonomischen Maßnahmen zur Reduktion der THG-Emissionen nicht ausreichen werden (bzw. nicht schnell genug umsetzbar sind), um das 1,5°-Ziel des Übereinkommens von Paris einzuhalten. Außerdem wird auf die hohen Kosten der verschiedenen Minderungsstrategien verwiesen und auch auf die Tatsache, dass eine komplette Vermeidung anthropogener THG-Emissionen bspw. im Landwirtschaftssektor nicht umsetzbar sein wird. Demzufolge verbleiben schwer vermeidbare Restemissionen von THG, die mit technischen Mitteln aus Emissionsquellen abgeschieden und durch geologische Einlagerung von der Atmosphäre ferngehalten werden sollen.

Seit einigen Jahren wird die Option untersucht, bereits emittiertes CO₂ aus der Atmosphäre zu entfernen. Hierzu werden verschiedene Negativemissionstechnologien (NET) zur Entfernung von CO₂ in geringen Konzentrationen (derzeit ca. 420 ppm) aus der Luft entwickelt und erprobt. Beispiele sind Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS), BECCS (ein CCS-Verfahren mit vorgeschalteter biogener Kohlenstoffabscheidung in Form von Biomasse) und beschleunigte Verwitterung von Gestein. Diese auch als Carbon Dioxide Removal (CDR) bezeichneten Ansätze zur technisch beschleunigten Entfernung von Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre werden derzeit als mögliche Ergänzung zur Minderung schwer vermeidbarer CO₂-Emissionen diskutiert. Sie gelten als eine Variante des nachsorgenden Klimaschutzes, sind aber wegen ihrer vergleichsweise hohen Kosten und Energiebedarfe sowie technischer und sozioökonomischer Risiken umstritten.

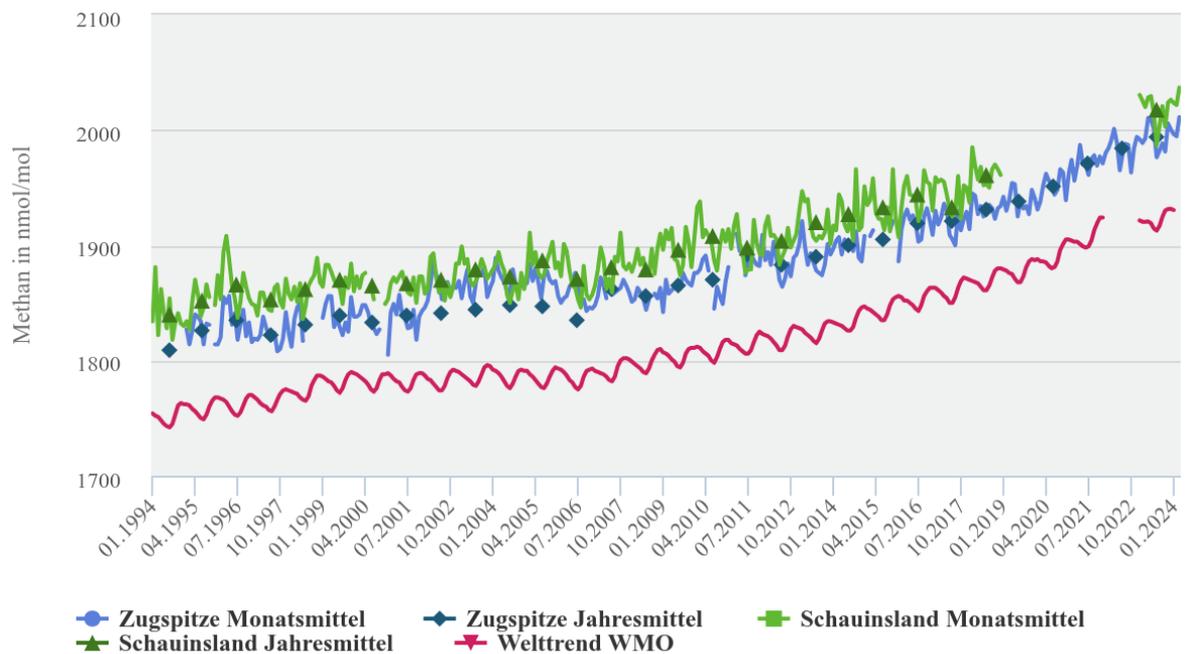
Vor dem Hintergrund der für die CO₂-Abscheidung aus der Atmosphäre entwickelten NET hat sich eine Diskussion darüber entwickelt, ob es Ansätze gibt, auch Methan aus der Atmosphäre zu entfernen (methane removal). Im Gegensatz zu etablierten Technologien zur Behandlung methanhaltiger Abgase (Abfackeln) bei deutlich höheren Konzentrationen stehen die hier betrachteten Ansätze vor dem Problem, ein chemisch schlechter trennbares THG bei deutlich geringeren atmosphärischen Konzentrationen als CO₂ mit technischen Mitteln aus der Luft zu entfernen. Außerdem wird CH₄ in der Atmosphäre durch natürliche Oxidationsprozesse mit einer mittleren Verweildauer von etwa 12 Jahren in CO₂ umgewandelt, so dass technische Ansätze zur Methanentfernung deutlich schneller ablaufen müssten, um effizient zu sein².

Hinzu kommt die Gefahr einer zusätzlichen Freisetzung von Methan aus Permafrostböden und marinen Sedimenten als Folge des durch die fortschreitende Klimaerwärmung gesteigerten, mikrobiellen Abbaus organischen Kohlenstoffs (Glikson 2018). Während derartige natürliche Methanreservoirs bereits heute instabil sind und die Methanfreisetzung aus ihnen bereits im

² Allerdings ist die Verweildauer der zusätzlichen Methanmengen in der Atmosphäre umso länger, je größer die Menge der Methanfreisetzung ist. Dies liegt daran, dass die natürlichen Mengen an photokatalytisch gebildeten Hydroxylradikalen in der Luft, die die notwendigen Reaktionspartner für die Oxidation von CH₄ zu CO₂ sind, übermäßig aufgebraucht werden.

Gänge ist, kann das Erreichen klimarelevanter Kippunkte zu einer irreversiblen Freisetzung extrem großer Mengen von natürlichem Methan in kurzer Zeit führen. Diese THG-Emissionen aus natürlichen Methanspeichern tragen zu einer positiven Klimarückkopplung bei, bei der Treibhausgasemissionen zu zusätzlicher Erwärmung führen, die wiederum mehr Methan aus abschmelzenden Permafrostböden freisetzt. Dieser Kohlenstoffverlust im Boden ist über mehrere Jahrhunderte hinweg irreversibel (Winkelmann et al. 2023). Dies birgt die Gefahr eines sprunghaften Anstiegs der treibhauswirksamen Methankonzentration in der Atmosphäre und damit die Gefahr eines sich beschleunigenden Anstiegs der globalen Klimaerwärmung (Glikson 2018; Winkelmann et al. 2023).

Abbildung 1: Zeitreihe der Methan-Konzentration in der Atmosphäre

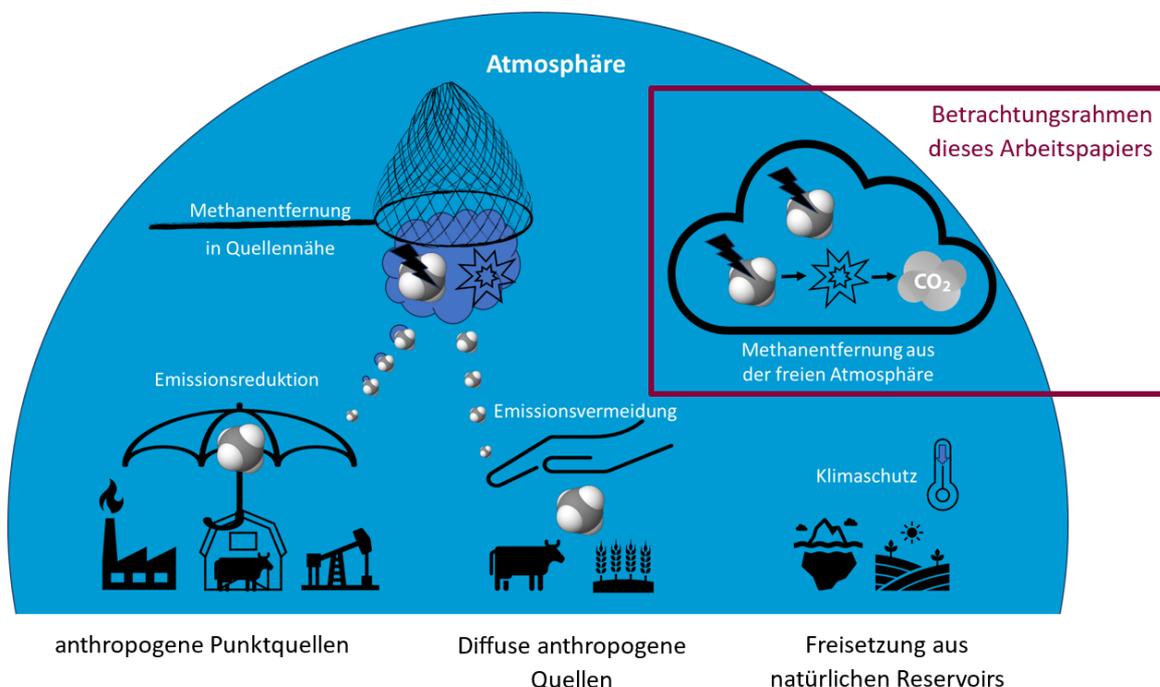


Quelle: (Umweltbundesamt 2024)

2 Beschreibung von Ansätzen zur Minderung der Methankonzentration in der Atmosphäre

Der Betrachtungsrahmen dieses Arbeitspapiers umfasst verschiedene Technologien zur Entfernung von Methan aus der Atmosphäre (siehe Abbildung 2 – rot umrahmt). Dabei gibt es verschiedene Überschneidungen zu anderen technologischen Konzepten zur Methanentfernung an Quellennähe, wo das THG zwar bereits in die Luft entwichen ist, aber noch lokal in höheren Konzentrationen vorliegt. Solche Ansätze werden im Zusammenhang mit diffusen landwirtschaftlichen Quellen oder Leckagen an Erdgasinfrastrukturen diskutiert.

Abbildung 2: Betrachtungsrahmen der Ansätze für zur Methanentfernung aus der Atmosphäre



Erläuterung: siehe nachfolgenden Text
Quelle: Öko-Institut

Die in Abbildung 2 schematisch dargestellten Ansätze zur Minderung des Anstiegs der Methankonzentration in der Atmosphäre lassen sich grob nach ihrer Stellung in der Ursache-Wirkungskette³ einordnen. Da Methan auch durch natürliche Prozesse in die Atmosphäre gelangt, müssen die anthropogen verursachten Wirkungszusammenhänge der Methanemissionen und die daraus abzuleitenden Minderungsmaßnahmen kategorisiert werden. Dazu gehören auch verstärkende Effekte auf natürliche Prozesse, die direkt oder indirekt durch menschliche Aktivitäten verursacht werden.

- Vermeidung der Methanentstehung: technische Maßnahmen und Bewirtschaftungsmethoden zur Unterbindung biologischer Prozesse der Umwandlung von Biomasse in Methan außerhalb geschlossener Systeme.

³ Die Ursache-Wirkungskette ist die Abfolge von Effekten, die zu einer Klimaerwärmung beitragen. Zu den Ursachen gehören die Entstehung von CH₄ infolge menschlicher Aktivitäten oder die Freisetzung von CH₄ aus natürlichen Reservoirs, die bisher stabil waren. Die Wirkung des freigesetzten Methans ist die Absorption von solarer Wärmerückstrahlung, was zu einem atmosphärischen Temperaturanstieg führt.

- ▶ Anthropogene Punktquellen: Dazu gehören Leckagen an Bohrlöchern, Pipelines und Industrieanlagen zur Verarbeitung fossiler Brennstoffe, Kohlebergwerke, aber auch Abwasserkläranlagen, Viehställe und Güllesilos. Am Ort solcher eng lokalisierbaren Emissionsquellen liegt die Methankonzentrationen hoch genug, um konventionelle technische Verfahren zur Emissionsreduktion von CH₄ einsetzen zu können. Derartige Maßnahmen zur Minderung der Methanemissionen (in Abbildung 2 durch einen Schirm symbolisiert) setzen entweder präventiv (Vermeidung von Leckagen) oder nachsorgend (Auffangen des CH₄ und Nutzung oder thermische Oxidation durch Abfackeln) an. Bestehende Technologien zur thermischen Oxidation von Methan eignen sich nur für den Einsatz an anthropogenen Punktquellen mit sehr hohen Methankonzentrationen von über 5 vol% (z. B. Abfackeln von Erdölförder- und Raffineriegas; Deponiegasbehandlung). Diese Technologien stellen jedoch Maßnahmen zur Emissionsminderung dar und tragen nicht zur Entfernung von Methan aus der Atmosphäre bei.
- ▶ Diffuse anthropogene Quellen: In diese Kategorie fallen landwirtschaftliche Aktivitäten in der Fläche (z. B. Freilandhaltung, Reisanbau). Auch Landnutzungsänderungen und unsachgemäße Bewirtschaftung können zu diffusen Methanemissionen führen. Diese sind durch niedrigere Methankonzentrationen gekennzeichnet, die technisch schwer zu kontrollieren sind. Emissionsminderungsmaßnahmen (in Abbildung 2 durch eine Hand symbolisiert) zielen daher eher auf die Vermeidung der Methanbildung durch Reduktion der verursachenden Prozesse (z. B. Viehhaltung). Es gibt jedoch auch Überlegungen zu technischen Minderungsmaßnahmen für CH₄ aus diffusen Quellen, die sich die im Vergleich zur atmosphärischen Hintergrundkonzentration erhöhte Methankonzentration in Quellnähe zunutze machen.
- ▶ Freisetzung aus natürlichen Quellen: Natürlich vorkommende Methan-Reservoirs (terrestrische Permafrostböden, marine Methanhydrate) könnten durch anthropogene Einflüsse, insbesondere die globale Erwärmung, instabil werden und zu sprunghaften diffusen Emissionen großen Ausmaßes führen. Bisher gibt es keine Konzepte zur Verhinderung solcher Methanfreisetzungsvorgänge, abgesehen von der Vermeidung der Erwärmung der betroffenen Methan-Reservoirs durch präventiven Klimaschutz.
- ▶ Methanemissionen aus Punktquellen und diffusen Quellen haben in Quellennähe je nach Umgebungsbedingungen teilweise noch eine deutlich höhere Konzentration als im Durchschnitt der freien Atmosphäre (ca. 1,922 ppm). So kann die bodennahe Methankonzentration in der Umgebung von Industrieanlagen deutlich höher sein als im Atmosphärendurchschnitt, beispielsweise um die 500 ppm (He et al. 2023).
- ▶ Maßnahmen zur Methanreduktion in Quellennähe (in Abbildung 2 durch ein Köcher symbolisiert) werden in der Literatur als Alternative oder Ergänzung für Maßnahmen zur Emissionsminderung (1) oder -vermeidung (2) diskutiert. Diese Konzepte stützen sich auf die Annahme, dass solche Technologien relativ unabhängig von den spezifischen Bedingungen der verschiedenen Methanquellen eingesetzt werden können und daher leichter für eine Massen-anwendung zu skalieren sind.
- ▶ Geoengineering-Ansätze zur Entfernung von Methan aus der Atmosphäre im Sinne von Negativemissionen (methane removal) haben den Charakter einer Schadensbegrenzung. Statt die Schadensursache (d. h. die Freisetzung von Methan) zu vermeiden, soll die Klimaer-

wärmung durch die Umwandlung von CH₄ in das weniger treibhauswirksame CO₂ abgemildert werden. Die natürliche treibhausgaswirksame Verweildauer von Methan in der Atmosphäre beträgt ca. 12 Jahre. In dieser Zeit wird CH₄ über Zwischenstufen in CO₂ umgewandelt (Wahlen 1993; Abernethy et al. 2021). Die hier betrachteten Technologien zur Methanentfernung zielen darauf ab, diese Verweildauer zu verkürzen. Da der Treibhauseffekt von CH₄ in der Atmosphäre durch die Absorption der solaren Wärmerückstrahlung in den Weltraum sofort einsetzt, sobald das Gas in die Luft gelangt, geht es bei diesen Ansätzen darum, bereits emittiertes CH₄ möglichst schnell wieder zu entfernen. Beispielsweise modellieren Abernethy et al. (2021) die Klimaeffekte einer angenommenen Verkürzung der treibhauswirksamen Verweildauer auf 6,9 bzw. 8,1 Jahre.

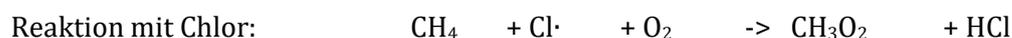
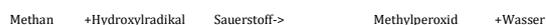
2.1 Konzepte zur Entfernung von Methan aus der Atmosphäre im Forschungs- und Entwicklungsstadium (TRL < 5)

In der Literatur werden eine Reihe von Ansätzen zur direkten Methanentfernung (methane removal) aus der Atmosphäre diskutiert, die im Sinne von Negativemissionen bzw. Methansenken genutzt werden könnten (vgl. Nisbet-Jones et al., 2022). Solche Ansätze haben im Hinblick auf die erforderlichen großskaligen Eingriffe in die Atmosphäre den Charakter von Geoengineering und sind noch weit von einer praktischen Einsatzfähigkeit entfernt.

Methan wird unter natürlichen Umständen zum größten Teil durch chemische Reaktionen mit dem photolytisch entstehenden Hydroxylradikal (OH) und zu einem geringeren Teil durch Reaktion mit photolytisch entstehendem atomarem Chlor aus der Atmosphäre entfernt. In der Literatur werden die folgenden grundsätzlichen Mechanismen diskutiert:

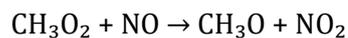
- ▶ **Photokatalytische Oxidation mit Hydroxylradikal in der Gasphase:** Verschiedene technische Eingriffe in die Atmosphäre sollen die photokatalytische Bildung des Hydroxylradikals anregen, um die CH₄-Senkenleistung der Atmosphäre zu steigern.
- ▶ **Chlorvermittelte atmosphärische Methanentfernung:** Einbringen von Chlor oder Chlorverbindungen in die Atmosphäre, welche über zahlreiche Zwischenreaktionen eine Oxidation des Methans zu CO₂ und Wasser beschleunigen (Zhang et al. 2022).

Diese beiden natürlich in der Atmosphäre stattfindenden chemischen Reaktionswege werden durch Sonnenlicht aktiviert, wobei Radikale (Hydroxylradikal und Chlorradikale) entstehen, die beide als Katalysator für die Bildung des Methylperoxidradikals (CH₃O₂) wirken. Li et al. (2023) geben folgendes Schema der photokatalytischen Reaktion an:



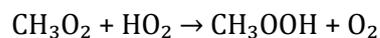
Der natürlich in der Atmosphäre stattfindende weitere Reaktionsprozess des Methylperoxi-Radikals läuft wie folgt ab: Das Zwischenprodukt Methoxid (CH_3O) ist in der Atmosphärenchemie als wichtiger Einflussfaktor auf den stratosphärischen Ozonabbau bekannt. Der Abbau des Methylperoxi-Radikals (CH_3O_2) in der Atmosphäre erfolgt durch verschiedene chemische Reaktionen, die hauptsächlich durch die Anwesenheit anderer Radikale beeinflusst werden. Unter dem Einfluss von Sonnenlicht nimmt das Methylperoxi-Radikal an verschiedenen photochemischen Prozessen teil, die letztendlich zu dessen Abbau beitragen (Onel et al. 2017).

- A) Die Reaktion mit Stickstoffmonoxid (NO) ist einer der Hauptwege für den Abbau von CH_3O_2 , wobei das Methoxid (CH_3O) und Stickstoffdioxid (NO_2) entstehen:



Methylperoxi-Radikal + Stickstoffmonoxid → Methoxid + Stickstoffdioxid

- B) Alternativ erfolgt eine Reaktion mit Hydroperoxyradikal (HO_2), die zur Bildung von Methanolperoxid (CH_3OOH) und Sauerstoff (O_2) führt. In der Troposphäre ist diese Reaktion weniger verbreitet, spielt aber in bestimmten Umgebungen eine Rolle:



Methylperoxi-Radikal + Hydroperoxyradikal → Methanolperoxid + Sauerstoff

- C) Reaktion des Methoxyradikals mit anderen organischen Peroxyradikalen führt zu verschiedenen organischen Verbindungen. Diese Reaktion ist im Vergleich zu den anderen Wegen weniger bedeutend, kann aber unter bestimmten Bedingungen auftreten:

- a. Selbsterstörung (Disproportionierung): $2 \text{CH}_3\text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$ (Methanol) + HCHO (Formaldehyd) + O_2

Die als Ansätze zur technisch induzierten Entfernung von CH_4 aus der Atmosphäre diskutierten Verfahren basieren auf der Idee, die Bildung von Hydroxylradikalen in der Atmosphäre anzuregen, um den Abbau von CH_4 bei atmosphärischen Konzentrationen zu beschleunigen. Die Verstärkung dieses grundsätzlichen Mechanismus der photokatalytischen Selbstreinigung der Atmosphäre mittels technischer Interventionen ist wissenschaftlich untersucht, aber weiterhin mit Unsicherheiten behaftet. Gleichwohl wird der Geoengineering-Ansatz einer technisch induzierten Verstärkung der photokatalytischen CH_4 -Oxidation in der Atmosphäre in der Literatur überwiegend als vielversprechend angesehen. Allerdings erfordert der photokatalytische Ansatz das Einbringen großer Mengen photokatalytisch wirksamer Substanzen in Form von Aerosolen in die Atmosphäre. Im einfachsten Fall ist dies Wasserdampf, der als Quelle für die direkte photokatalytische Bildung von Hydroxylradikalen dient.

Daneben kann die photokatalytische Spaltung von Wasserdampf durch katalytisch wirksame Substanzen wie Stickoxide (NO_x) und leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC) über den Umweg der Bildung von Ozon und Wasserstoffperoxid (H_2O_2) beschleunigt werden. Dazu müssen sowohl Wasser als auch die Katalysatorsubstanzen (NO_x , H_2O_2) in großen Mengen in die Atmosphäre eingetragen und verteilt werden. Dazu erforderliche Technologien und Support-Infrastrukturen sind jedoch noch weit von einer Anwendungsreife entfernt und zum großen Teil eher spekulativer Natur. Bislang gelten NO_x , VOC und bodennahes Ozon als Luftschadstoffe, die seit Jahrzehnten Gegenstand von technischen und politischen Maßnahmen zur Luftreinhaltung sind. Eine Anwendung derartiger Ansätze zur Methanentfernung stünde im direkten Widerspruch zu

geltenden gesetzlichen Regelungen des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG) und der TA Luft (Bundesregierung 2021).

- ▶ Die **photokatalytische Oxidation an Festkörper-Oberflächen** kann durch den Kontakt großer Luftmengen mit sonnenbeschienenen, pigmenthaltigen Oberflächen erfolgen. Als katalytisch aktives Pigment eignet sich z. B. Titandioxid.
- ▶ **Adsorption von Methan an Zeolithen oder anderen porösen Feststoffen:** Zeolithe sind Mineralien, die Methan aus der Luft absorbieren können. Mit Kupfer behandelte Zeolithe absorbieren Methan selbst bei niedrigen atmosphärischen Konzentrationen sehr effektiv. Zum Zweck der CH₄-Entnahme müssen erhebliche Volumina an Luft mit dem porösen Feststoff kontaktiert werden, was enorme technische Anlagen und hohen Ressourcenaufwand erforderlich macht.
- ▶ **Biologische Methanentfernung:** Methanotrophe Bakterienarten können CH₄ metabolisieren und in Kohlendioxid oder Methanol für die industrielle Nutzung umwandeln (He et al. 2023). Dieser Ansatz funktioniert jedoch nicht bei atmosphärischer CH₄-Konzentration. Optimale Methankonzentrationen von ca. 500 ppm finden sich in unmittelbarer Nähe zu Methanquellen (Wang und He 2023).
- ▶ **Abtrennung durch Membranen:** Bei dieser Technik wird eine Membran verwendet, um CH₄ von anderen Gasen zu trennen. Nach gegenwärtigem Stand der Technik funktioniert das nur bei erhöhten Methankonzentrationen effektiv.

Tabelle 1: Auswahl von Ansätzen zur Methanentfernung aus der Atmosphäre im Stadium der Forschung und Entwicklung

Technologie*	Typ	Technologie-reifegrad
Photokatalytische Oxidation mit Hydroxylradikal	Geoengineering	5
Adsorption von Methan an Zeolithen	Geoengineering	4
Solares Einstrahlungsmanagement	Geoengineering	3
Ausbringen von eisenhaltigen Aerosolen in die Luft	Geoengineering	2
Chlorvermittelte Photokatalyse	Geoengineering	2
Methanotrophe Bakterien	Quellennahes Auffangen von CH ₄	2-3
Photokatalytische Verfahren an Festkörperoberflächen	Quellennahes Auffangen von CH ₄	k.A.

*Die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und stellt auch **keine inhaltliche Wertung** der Methoden dar.
Quelle: (Mundra und Lockley 2024)

2.1.1 Photokatalytische Oxidation in der Gasphase

2.1.1.1 Photokatalytische Oxidation mit Hydroxylradikal in der Gasphase

Wang et al. (2022) diskutieren zwei hypothetische Verfahren zur Anregung der photokatalytischen Bildung von Hydroxylradikal in der Troposphäre:

1. Einleitung von Wasserdampf in die Troposphäre mit Hilfe von **Fallwindkraftwerken** (Downdraft Energy Towers). Fallwindkraftwerke arbeiten, indem sie Wasser aus großen

vertikalen Schloten in die Atmosphäre sprühen. Dieses Wasser verdunstet und erzeugt einen Sog von oben nach unten, der zur Energiegewinnung durch Windturbinen genutzt werden kann. Solche Türme sind besonders effektiv in heißen und trockenen Regionen, in denen Wasser schnell verdunstet. Dadurch erhöht sich die Wasserdampfkonzentration in der Luft, was unter Einwirkung von Sonnenlicht zur vermehrten Bildung von Hydroxylradikalen in der Atmosphäre beitragen kann (Wang et al. 2022). Der vorgeschlagene Mechanismus der Bildung von Hydroxylradikal aus Wasserdampf ist eher ein Nebeneffekt dieses bisher ebenfalls nicht erprobten Technologie-Konzepts zur Erzeugung regenerativer Energie. Ming et al. (2022) befassen sich ebenfalls mit verschiedenen Methoden zur Entfernung von Methan (CH_4) aus der Atmosphäre. Zur Erzeugung von Hydroxylradikalen als natürliche Methansenke werden hier ebenfalls Fallwindkraftwerke vorgeschlagen, welche zusätzlichen Wasserdampf in der Troposphäre verteilen sollen, um mittels natürlicher UV-Strahlung oder künstlicher UV-Lichtquellen zusätzliche Mengen an Hydroxylradikalen in die Atmosphäre zu bringen. Jedoch werden diese Ideen nicht weiter vertieft oder evaluiert. Es wird lediglich auf Start-Up-Unternehmen verwiesen, die diese Technologien zur photokatalytischen Oxidation von CH_4 an Punktquellen erproben.

2. Nutzung von **künstlicher UV-Strahlung** zur Bildung von Hydroxylradikal. Wang et al. (2022) diskutieren den Einsatz von UV-Lichtquellen zur Erzeugung von Hydroxylradikal direkt in der Atmosphäre in verschiedenen Höhen zwischen 6 und 12 km. Die Idee ist, die Atmosphäre mit Hilfe von Luftschiffen oder Segelflugzeugen künstlich mit UV-B-Licht aus solarbetriebenen UV-Lichtquellen zu bestrahlen. Die künstliche UV-Bestrahlung würde zu einer zusätzlichen photokatalytischen Bildung von Ozon und Hydroxylradikal führen (ebd.). Allerdings handelt es sich bei diesen Ansätzen bisher eher um Gedankenspiele, die sich in verschiedenen Artikeln und Patenten wiederfinden, ohne dass eine praktische Erprobung auch nur in Form eines Prototyps erkennbar wäre.

2.1.1.2 Chlorvermittelte atmosphärische Methanentfernung in der Gasphase

Li et al. (2023) untersuchten die Auswirkungen des Eintrags von zusätzlichem molekularem Chlor in die Atmosphäre als Methode zur Methanentfernung. Chlor beeinflusst die chemische Lebensdauer von CH_4 in der Atmosphäre. Es wurden verschiedene Szenarien für die Freisetzung von Chlor modelliert. Die Studie ergab, dass eine Erhöhung der Chloremissionen nichtlineare Effekte auf die atmosphärische Methankonzentration nach sich zieht: Unterhalb eines Schwellenwerts von 90 Tg Cl/Jahr kann die Zugabe von Chlor die Methanbelastung aufgrund von Wechselwirkungen mit anderen atmosphärischen Komponenten wie Ozon (O_3) und Hydroxylradikalen (OH) zunächst erhöhen. Der Grund dafür ist, dass Chlor Ozon abbauen kann, was wiederum die Konzentration von Hydroxylradikalen beeinflusst, die für die Methanoxidation entscheidend sind. Erst oberhalb einer Schwelle von 90 Tg Cl/Jahr an zusätzlicher Freisetzung von Chlor, beginnt die Methankonzentration in der Atmosphäre deutlich zu sinken. Der Methanabbau aufgrund von Chlorreaktionen beginnt dann, den induzierten Verlust an Hydroxylradikalen zu übertreffen. So könnte beispielsweise ein Szenario mit einer Emission von 1.880 Tg Cl/Jahr die Methanbelastung um bis zu 70 % verringern.

Ming et al. (2022) berichten von Experimenten zur Nutzung von Natriumchlorid-haltigen Seewasser-Aerosolen als Quelle von Chlor. Dazu wäre die Anreicherung von Verbrennungsabgasen erforderlich, z. B. aus Schiffsmotoren mit Eisensalzen, welche die photokatalytische Aufspaltung von NaCl, wie es in marinen Aerosolen (Gischt) enthalten ist, begünstigt. Es werden keine Angaben zur Technologiereife dieser Idee gemacht.

2.1.2 Photokatalytische Oxidation an Festkörper-Oberflächen

Huang et al. (2021) und Zhang et al. (2022) befassen sich mit dem Einsatz von photokatalytisch wirksamen Substanzen zur Oxidation von CH_4 in der Luft, wie beispielsweise Titandioxid (TiO_2),

Zinkoxid (ZnO), Galliumoxid (Ga₂O₃) und anderen Verbindungen. Diese Katalysatoren müssen zur Gewährleistung einer effektiven Kontaktierung mit niedrig konzentriertem CH₄ auf ein poröses oder wabenförmiges Trägermaterial wie z. B. Zeolithe oder Aktivkohle aufgebracht werden, welches zusätzlich einen Lichtzutritt gewährleistet.

Die derzeitigen Entwicklungen zum Einsatz von Titandioxid-Photokatalysatoren für die CH₄-Oxidation konzentrieren sich auf die Nutzung in der Grundstoffchemie, in der CH₄ in hohen Konzentrationen vorkommt. In diesen Fällen ist eine "Über"-Oxidation von CH₄ zu CO₂ unerwünscht. Zhang et al. (2022) argumentieren, dass der Einsatz von Photokatalysatoren, die in der chemischen Industrie als zu stark angesehen werden, für die CH₄-Entfernung bei geringen Konzentrationen genau richtig sein könnte. Dies bleibt jedoch spekulativ, da es bislang keine Forschungsergebnisse über die photokatalytische Oxidation bei ~2 ppm atmosphärischen Methans (CH₄) gibt.

Voraussetzung für den Einsatz von Festkörper-Photokatalysatoren zur CH₄-Entfernung bei atmosphärischen Konzentrationen wäre der Kontakt großer Luftmengen mit bestrahlten Katalysatoroberflächen. Bei einer CH₄-Konzentration von 2 ppm ist für die Entfernung von 1 t CH₄ ein Luftdurchsatz von 700 Mio. m³ erforderlich. Verschiedene Autor*innen bringen hierzu den Einsatz solarer Aufwindkraftwerke (Solar Updraft Towers) ins Spiel, die als Photoreaktoren konzipiert werden könnten. Aufwindkraftwerke erzeugen einen im Vergleich zu den oben genannten Fallwindkraftwerken einen umgekehrten Sog (von unten nach oben). Damit soll ein konstanter Transport großer Luft-Volumina entlang photokatalytisch beschichteter Oberflächen oder Filterpakete am Einzugsbereich der Kamine ermöglicht werden, ohne dass hierzu zusätzliche Energie für die Luftumwälzung erforderlich wäre (Im Gegenteil: Der thermische Auftrieb kann zur Energiegewinnung genutzt werden). Demonstratoren solarer Aufwindkraftwerke wurden bereits in Spanien und der VR China errichtet und werden zur regenerativen Stromerzeugung genutzt (TRL8). Allerdings ist die Kombination mit photokatalytischen Festkörper-Katalysatoren für den CH₄-Abbau bislang nicht erprobt. Es ist daher unklar, ob diese Verfahren im Praxiseinsatz zu nennenswerten CH₄-Abbauraten beitragen kann. Modellrechnungen scheinen die Wirksamkeit solcher Konstrukte zur CH₄-Entfernung im Rahmen der Modellparameter für das Beispiel Manzanares (Spanien) zu belegen (Ming et al. 2021).

Adsorption von Methan an Zeolithen

Methan lässt sich aufgrund seiner unpolaren Molekülstruktur bei niedrigen atmosphärischen Konzentrationen um 2 ppm deutlich schwieriger anreichern oder chemisch binden als das schwach saure CO₂ (Jackson et al. 2019). Daher ist eine chemische Gaswäsche mit Aminen, wie es beim DACCS-Verfahren für CO₂ angewendet wird, bei Methan nicht möglich. Auch andere flüssige Lösungsmittel weisen keine ausreichende Affinität zu Methan auf (Kim et al. 2013). Stattdessen wurden nanoporöse Zeolithe aufgrund ihrer günstigen Sorptionskapazität und Selektivität als Kandidaten für die Aufkonzentrierung von Methan in industriellen Anwendungen identifiziert. Während in industriellen Prozessen eine katalytische Teiloxidation von CH₄ zu Methanol (CH₃OH) angestrebt wird, ist für die atmosphärische Methanabscheidung eine vollständige Oxidation zu CO₂ erwünscht. Dazu werden Zeolithe mit katalytisch aktivem Kupfer oder Eisen ausgerüstet und in porösen Polymernetzwerken stabilisiert. Über die konkrete technische Umsetzbarkeit und die Kosten dieses Ansatzes bleiben sowohl Kim et al. (2013) als auch Jackson et al. (2019) jedoch unspezifisch.

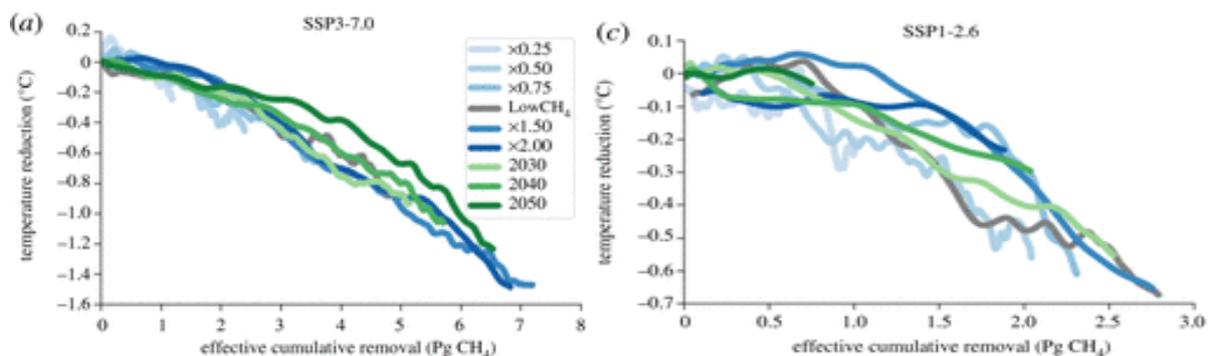
Brenneis et al. (2022) beschreiben die Entwicklung von Kupfer-dotiertem Zeolith, mit dessen Hilfe schwach konzentriertes CH₄ bei relativ niedrigen Temperaturen um 300°C in CO₂ umgewandelt werden kann. Durch ein zweistufiges Verfahren mit einer Aktivierung bei 450°C und einer Reaktion bei 200°C wurde ein Umwandlungsgrad von CH₄ in CO₂ von über 60 % erreicht. Es wurde festgestellt, dass sich der Ansatz zur Methanentfernung bei „subbrennbaren“ CH₄-Konzentrationen eignet, wobei hiermit vermutlich quellennahes CH₄ gemeint ist.

2.2 Unsicherheiten und Risiken der Ansätze für Entfernung von Methan aus der Atmosphäre

2.2.1 Wirksamkeit der Methanentfernung für den Klimaschutz

Die in Abschnitt 2.1 vorgestellten Ansätze zur geotechnischen Methanentfernung aus der Atmosphäre bezwecken vor allem eine Beschleunigung der natürlichen Abbauprozesse des CH_4 zu CO_2 . Dadurch verringert sich die Zeitspanne, in der die höhere Treibhauswirksamkeit des CH_4 zur Klimaerwärmung beiträgt. Wenn sich die treibhauswirksame Verweildauer des CH_4 von normalerweise 12,4 Jahren durch technisch induzierte Methanentfernung verkürzt, lässt sich durch Simulationsrechnungen mit numerischen Klimamodellen ein mildernder Effekt auf die Klimaerwärmung aufzeigen. Jones et al. (2018) haben berechnet, dass eine Verringerung der Methankonzentration um 2 % pro Jahr zu einer Temperatursenkung von etwa $0,5^\circ\text{C}$ bis zum Jahr 2100 führt. Abernethy et al. (2021) haben modelliert, dass jedes effektiv entfernte Petagramm (=Gigatonne) Methan eine mittlere Reduktion der globalen Oberflächentemperatur von $0,21 \pm 0,04^\circ\text{C}$ und eine mittlere Reduktion der globalen Konzentration von troposphärischem (bodennahem) Ozon von $1,0 \pm 0,2$ ppm bewirkt⁴. Jedoch unterscheiden sich die Ergebnisse dieser Modellrechnungen sehr stark in Abhängigkeit der verwendeten Modellszenarien. Darüber hinaus sind die Ergebnisse nur für extrem hohe Mengen von entferntem Methan als richtungssicher einzuschätzen (siehe Abbildung 3). Für praktisch realistische Ansätze zur Methanentfernung in einer Größenordnung von deutlich unter dem Gigatonnenbereich zeigen die Modellrechnungen keinen signifikanten Einfluss auf die Atmosphärentemperatur (in manchen Szenarien sogar eine leichte Zunahme im Bereich unter 1 Pg CH_4).

Abbildung 3: Simulationsergebnisse für die Klimawirkungen einer Methanentfernung im Vergleich zweier Szenarien



Quelle: Abernethy et al. (2021)

2.2.2 Unterschiede zwischen Methanentfernung und Carbon Dioxid Removal (CDR)

Aus infrastruktureller Perspektive unterscheiden sich die technologischen Ansätze zur atmosphärischen Methanentfernung erheblich von den Technologien zur Kohlendioxidentnahme (Carbon Dioxide Removal - CDR). Die CDR-Technologien zur Entfernung von CO_2 aus der Atmosphäre, wie z. B. DACCS oder BECCS, beruhen auf einer Entnahme des CO_2 aus der Luft – kombiniert mit anschließendem Transport und Speicherung des CO_2 , z. B. in geologischen Lagerstätten. Im Gegensatz dazu erfolgen bei den diskutierten Geoengineering-Technologien zur Methanentfernung keine Abscheidung und Speicherung des Methans. Stattdessen wird das Methan bei den meisten Verfahren über verschiedene Zwischenschritte direkt in der Atmosphäre chemisch in

⁴ Methan ist zusammen mit anderen flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) und Stickoxiden ein Baustein für die Entstehung von bodennahem Ozon bei hoher UV-Einstrahlung im Sonnenlicht (Sommersmog). Eine Reduktion des gesundheitsschädlichen Ozons in Bodennähe wäre ein zusätzlicher positiver Effekt.

das weniger klimawirksame CO₂ umgewandelt, welches jedoch für zehntausende Jahre in der Atmosphäre verbleibt. Eine Abscheidung und Speicherung als CH₄ ist bis auf wenige Ausnahmen nicht vorgesehen. Unklar ist, ob die Ansätze zur Methanabtrennung mit CDR-Verfahren zur Abtrennung des entstehenden CO₂ kombiniert werden können. Angesichts der erheblichen Konzentrationsunterschiede der beiden Treibhausgase in der Atmosphäre (2 ppm für CH₄ vs. 420 ppm für CO₂) erscheint ein kombinierter Betrieb beider Ansätze mit dem Ziel der Speicherung nicht zielführend.

Allerdings erfordern Ansätze zur Erzeugung negativer Emissionen für beide THG erhebliche infrastrukturelle Aufwendungen, um nennenswerte Effekte zur Begrenzung der globalen Erwärmung erzielen zu können.

2.2.3 Andere Risiken

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden keine Studien gefunden, die für die in diesem Arbeitspapier betrachteten Ansätze zur Entfernung von Methan aus der Atmosphäre eine detailliertere Risikoanalyse oder Lebenszyklusanalyse durchgeführt haben. Dies ist angesichts des geringen technologischen Reifegrades dieser Ansätze nicht verwunderlich. Gleichwohl wäre es in einem frühen Stadium der Technologieentwicklung sinnvoll, die Risiken und Kosten solcher Entwicklungspfade parallel zur technologischen Innovation zu betrachten, um ggf. rechtzeitig fundierte Entscheidungen über weitere Investitionen in die Entwicklungsarbeit treffen zu können. Die fehlende oder eher oberflächliche Reflexion möglicher Neben- und Folgewirkungen einer notwendigerweise global hochskalierten Geoengineering-Technologie unterstreicht die geringe Praxisrelevanz der hier vorgestellten Ansätze. In einigen der ausgewerteten Studien wurden folgende Risikoaspekte angeschnitten, aber nicht vertiefend untersucht.

Die photokatalytische Oxidation von Methan kann eine Reihe von Auswirkungen auf andere Atmosphärenbestandteile nach sich ziehen. Beim **Ansatz mit Hydroxylradikal** gilt zu bedenken:

- ▶ **Bildung von bodennahem Ozon:** Bei der Oxidation von Methan in der Troposphäre entsteht in Gegenwart von Stickoxiden durch photochemische Prozesse Ozon. Dieses Gas ist ein starkes Treibhausgas und gilt gleichzeitig als gesundheitsgefährdender Luftschadstoff, wenn Ozon in bewohnten Gebieten auftritt. Es kann zu Entzündungen der Atemwege, Asthma, Einschränkung der Lungenfunktion und Beeinträchtigung der körperlichen Leistungsfähigkeit führen.
- ▶ **Verringerung der natürlich in der Atmosphäre vorhandenen Menge an Hydroxylradikal:** Da die Methanemissionen weltweit steigen, sinkt der Pegel an Hydroxylradikal, weil häufiger die Oxidationsreaktion mit Methan stattfindet. Dies kann dazu führen, dass die Halbwertszeit von CH₄ in der Atmosphäre zunimmt und erst nach längerer Zeit abgebaut wird. Durch diesen Effekt steigt die Klimawirksamkeit des CH₄.
- ▶ Der Eintrag großer Mengen an Wasserdampf in die Atmosphäre über das natürliche Maß hinaus kann je nach Art des Eintrags und der Ausbreitungsdynamik in der Atmosphäre die Klimaerwärmung verstärken, da Wasserdampf als Treibhausgas wirkt.

Die **Nutzung von Chlor** als Ausgangsstoff zur Entfernung von Methan aus der Atmosphäre kann zu folgenden Nebenwirkungen führen:

- ▶ Die Reaktion führt zur Bildung von Methylchlorid, das selbst ein Treibhausgas ist, wenn auch weniger potent als CH_4 . Darüber hinaus kann Chlorwasserstoff (HCl), welches als Nebenprodukt in die Atmosphäre gelangt, zur Versauerung von Niederschlag (Saurer Regen) beitragen.
- ▶ Freie Chloratome sind als Auslöser für den stratosphärischen Ozonabbau bekannt, was letztlich zur Entstehung von polaren Ozonlöchern beiträgt. Hohe Halogenkonzentrationen in der Stratosphäre begünstigen den Ozonabbau und werden daher als unerwünscht betrachtet. Eine mögliche Schädigung der Ozonschicht stellt ein ernsthaftes Umweltproblem dar. Der Eintrag von Chlor in die Atmosphäre, beispielsweise aus Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW), wurde durch die Umsetzung des Montrealer Protokolls zum Schutz der Ozonschicht erfolgreich unterbunden. Eine gezielte Freisetzung von Chlor in der o.g. Größenordnung zum Zwecke der Methanentfernung birgt die Gefahr, diesen Erfolg zunichtezumachen und die jahrzehntelangen Anstrengungen zur Emissionsreduktion von Ozonschicht-zerstörenden Stoffen ad absurdum zu führen. Es bedarf daher einer gründlichen Risikoabwägung dieser Geoengineering-Idee, um eine Verfrachtung des Chlors in die Stratosphäre auszuschließen.
- ▶ Sicherheitsbedenken gegenüber dem Einsatz von Chlor: Da es sich um ein hochgiftiges und reaktives Gas handelt, können Unfälle beim Transport und bei der Ausbringung von Chlor erhebliche Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt haben. Aus diesen Gründen ist die troposphärische Ausbringung von Chlor in besiedelten Gebieten nicht sinnvoll. In der Literatur wird deshalb eine Ausbringung in entlegenen Gebieten (Ozeane) in Erwägung gezogen. Es ist jedoch unklar, ob eine Verfrachtung durch Wind in bewohnte Gebiete ausgeschlossen werden kann.
- ▶ Energieaufwand für die Chlorproduktion: Chlor wird durch Elektrolyse von Natriumchlorid hergestellt, wo es bisher als Nebenprodukt bei der Herstellung von Natriumhydroxid anfällt. Ein Einsatz von Chlor im Rahmen von Geoengineering zur CH_4 -Entfernung würde den Bedarf an Chlor deutlich erhöhen, so dass zusätzliche Kapazitäten zur Chlorproduktion geschaffen werden müssten. Dadurch würde sich der Energieaufwand für die Chlorproduktion vervielfachen.

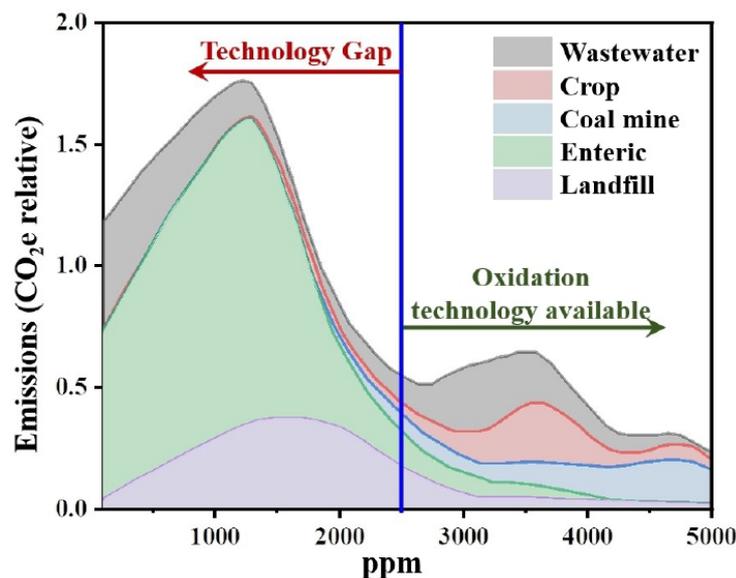
3 Schlussfolgerungen

Die in diesem Arbeitspapier betrachteten Technologien zur direkten Entfernung von Methan aus der Atmosphäre befinden sich in einem frühen technologischen Entwicklungsstadium und sind nicht anwendungsreif. Es handelt sich zum größten Teil um eher konzeptuelle Ideen mit einem Technologiereifegrad (TRL) von 1 oder 2 (Technologiekonzept formuliert) mit wenigen experimentellen Studien im Labormaßstab (TRL 3-4). Auch wenn einzelne technologische Komponenten der verschiedenen Ansätze bereits für andere Anwendungen verfügbar sind (z. B. Aufwindkraftwerke), ist die technologische Reife von geotechnischen Gesamtkonzepten zur Methanentfernung noch weit von einer Erprobung (TRL 6-7) entfernt.

In Anbetracht der erheblichen Vorlaufzeit zur Weiterentwicklung und Hochskalierung der verschiedenen Ansätze zur atmosphärischen Methanentfernung erscheint ein nennenswerter Beitrag zum Klimaschutz fraglich.

Zhang et al. (2022) beschreiben die technologische Lücke in der Verfügbarkeit anwendbarer Technologien zur Methanentfernung. Demnach tragen weltweit die weitaus meisten CH_4 -Emissionen aus anthropogen verursachten Quellen zum Anstieg der atmosphärischen Konzentration bei, während verfügbare Technologien zur Emissionsreduktion hauptsächlich bei wesentlich höheren CH_4 Konzentrationen oberhalb von etwa 2500 ppm wirksam sind (Abbildung 4). Für atmosphärische CH_4 -Konzentration um die 2 ppm gibt es nach Kenntnis dieser Autor*innen keine ausgereifte Technologie zur Entfernung von CH_4 .

Abbildung 4: Lücke in der Verfügbarkeit von Technologien zu Entfernung von Methan aus der Atmosphäre



Quelle: (Zhang et al. 2022)

Die Herausforderung der atmosphärischen Methanentfernung besteht darin, dass Methan viel stärker verdünnt ist als CO_2 , was die Abscheidung technisch sehr aufwändig und unwirtschaftlich macht (Lackner 2020).

In Anbetracht des niedrigen Technologiereifegrads der verschiedenen Ansätze zur atmosphärischen CH_4 -Entfernung sind jegliche Annahmen über die Gestaltung und zukünftigen Betriebsbedingungen solcher Technologien eher hypothetischer Natur. Daher sind bei diesen Ansätzen keine realistischen Abschätzungen der Kosten pro Tonne zu entfernendes Methan möglich bzw. mit hohen Unsicherheiten behaftet. Jackson et al. (2019) nehmen an, dass die Kosten für die

Entfernung von CH_4 aufgrund der höheren atmosphärischen Verdünnung deutlich höher sein werden als die Kosten für die Entfernung von CO_2 aus der Atmosphäre. Zudem sind die sozio-ökonomischen Auswirkungen und die damit verbundene gesellschaftliche Akzeptanz von Geoengineering-Ansätzen in der Atmosphäre bisher nur unzureichend geklärt.

Darüber hinaus bestehen Bedenken, dass die diskutierten Geoengineering-Ansätze mit erheblichen Risiken verbunden sein könnten. So besteht noch große Unsicherheit über die ökologischen und gesundheitlichen Nebenwirkungen der Freisetzung großer Mengen an Chlor oder anderen Chemikalien zur Bildung photokatalytisch wirksamer Radikale. Dies gilt auch für den Eintrag großer Mengen an Wasserdampf in die Atmosphäre (Wasserdampf ist das wichtigste Treibhausgas in der Erdatmosphäre). Je nach Art des Eintrags und der Ausbreitungsdynamik in der Atmosphäre können solche massiven Eingriffe in die natürlichen atmosphärischen Prozesse zu unerwarteten Auswirkungen führen.

Vor diesem Hintergrund erscheint es umso wichtiger, Ansätze zur Vermeidung der Methanentstehung und Emissionsreduktion konsequent und großskalig anzuwenden, da diese bereits einen hohen Technologiereifegrad haben und sofort umsetzbar sind. Es ist technisch und ökonomisch sinnvoller, die Methanfreisetzung an der Quelle zu stoppen als das stark verdünnte Treibhausgas nachträglich wieder aus der Atmosphäre zu entfernen. Dazu ist es notwendig, die Entstehung von CH_4 infolge anthropogener Aktivitäten zu unterbinden (Prävention) oder die Freisetzung von vorhandenem CH_4 zu verringern (Emissionsreduktion).

Gleichwohl könnten Ansätze zur direkten Entfernung von CH_4 aus der Atmosphäre in Zukunft an Bedeutung gewinnen. In einem Szenario, in dem alle internationalen Bemühungen zum vorbeugenden Klimaschutz durch Vermeidung von Treibhausgasemissionen scheitern und sich die globale Erwärmung beschleunigt, ist es denkbar, dass instabile terrestrische (Permafrostböden) und marine (Methanhydrate) Methanspeicher kollabieren. Im Falle einer solchen Entwicklung könnte versucht werden, den Folgen der gesteigerten Erderwärmung durch den Einsatz von Technologien zur direkten Entfernung von CH_4 aus der Atmosphäre entgegenzuwirken (Lackner 2020). Dazu müssten geeignete Geoengineering-Technologien in kurzer Zeit zur Einsatzreife gebracht und global hochskaliert werden. Der notwendige Umfang einer solchen Entwicklung und des Einsatzes von Geoengineering-Technologien ist bislang schwer planbar, da das Auftreten von Kippeffekten im Erd-Klimasystem und weiteren Auswirkungen des fortschreitenden Klimawandels mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Es ist daher fraglich, ob Technologien zur Methanentfernung rechtzeitig und in ausreichendem Umfang entwickelt werden, um dem fortwährenden Anstieg der atmosphärischen Methankonzentration wirksam begegnen zu können. Angesichts der unsicheren Erfolgsaussichten des Einsatzes solcher Verfahren erscheint es aus heutiger Sicht wirkungsvoller, die negativen Auswirkungen der Erderwärmung, inklusive des Erreichens klimatischer Kipppunkte, durch präventive Klimaschutzmaßnahmen, also die Minderung von Treibhausgasemissionen wie CH_4 und CO_2 , zu vermeiden.

4 Literaturverzeichnis

- Abernethy, S.; O'Connor, F. M.; Jones, C. D.; Jackson, R. B. (2021): Methane removal and the proportional reductions in surface temperature and ozone. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 379 (2210), S. 20210104. DOI: 10.1098/rsta.2021.0104.
- Brenneis, Rebecca J.; Johnson, Eric P.; Shi, Wenbo; Plata, Desiree L. (2022): Atmospheric- and Low-Level Methane Abatement via an Earth-Abundant Catalyst. In: *ACS environmental Au* 2 (3), S. 223–231. DOI: 10.1021/acsenvironau.1c00034.
- Bundesregierung (2021): Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft. TA Luft, vom 18.08.2021. Online verfügbar unter https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_18082021_IGI25025005.htm.
- Ehhalt, D.; Prather, M.; Dentener, F.; R. Derwent; E. Dlugokencky; E. Holland et al. (2018): Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases. Hg. v. IPCC. IPCC. Online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/TAR-04.pdf>.
- Europäische Kommission (2014): Technology readiness levels (TRL). HORIZON 2020 – WORK PROGRAMME 2014-2015 General Annexes. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf.
- Glikson, Andrew (2018): The methane time bomb. In: *Energy Procedia* 146, S. 23–29. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.004.
- He, Lian; Groom, Joseph D.; Wilson, Erin H.; Fernandez, Janette; Konopka, Michael C.; Beck, David A. C.; Lidstrom, Mary E. (2023): A methanotrophic bacterium to enable methane removal for climate mitigation. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 120 (35), e2310046120. DOI: 10.1073/pnas.2310046120.
- Huang, Yanfang; Shao, Yimin; Bai, Yang; Yuan, Qingchun; Ming, Tingzhen; Davies, Philip et al. (2021): Feasibility of Solar Updraft Towers as Photocatalytic Reactors for Removal of Atmospheric Methane-The Role of Catalysts and Rate Limiting Steps. In: *Frontiers in chemistry* 9, S. 745347. DOI: 10.3389/fchem.2021.745347.
- Jackson, R. B.; Solomon, E. I.; Canadell, J. G.; Cargnello, M.; Field, C. B. (2019): Methane removal and atmospheric restoration. In: *Nature Sustainability* 2 (6), S. 436–438. DOI: 10.1038/s41893-019-0299-x.
- Jones, Andy; Haywood, James M.; Jones, Chris D. (2018): Can reducing black carbon and methane below RCP2.6 levels keep global warming below 1.5 °C? In: *Atmos. Sci. Lett.* 19 (6), e821. DOI: 10.1002/asl.821.
- Kim, Jihan; Maiti, Amitesh; Lin, Li-Chiang; Stolaroff, Joshua K.; Smit, Berend; Aines, Roger D. (2013): New materials for methane capture from dilute and medium-concentration sources. In: *Nature communications* 4, S. 1694. DOI: 10.1038/ncomms2697.
- Lackner, K. S. (2020): Practical constraints on atmospheric methane removal. In: *Nature Sustainability* 3 (357).
- Li, Q.; Meidan, D.; Hess, P.; Añel, J. A.; Cuevas, C. A.; Doney, Scott et al. (2023): Global environmental implications of atmospheric methane removal through chlorine-mediated chemistry-climate interactions. In: *Nat Commun* 14 (1), S. 4045. DOI: 10.1038/s41467-023-39794-7.
- Ming, T.; Li, W.; Yuan, Q.; Davies, P.; Richter, R.; Peng, C. et al. (2022): Perspectives on removal of atmospheric methane. In: *Advances in Applied Energy* 5, S. 100085. DOI: 10.1016/j.adapen.2022.100085.
- Ming, T.; Gui, Haoyu; Shi, Tianhao; Xiong, Hanbing; Wu, Yongjia; Shao, Yimin et al. (2021): Solar chimney power plant integrated with a photocatalytic reactor to remove atmospheric methane: A numerical analysis. In: *Solar Energy* 226, S. 101–111. DOI: 10.1016/j.solener.2021.08.024.
- Mundra, I.; Lockley, A. (2024): Emergent methane mitigation and removal approaches: A review. In: *Atmospheric Environment: X* 21, S. 100223. DOI: 10.1016/j.aea.2023.100223.

Nisbet-Jones, Peter B. R.; Fernandez, Julianne M.; Fisher, Rebecca E.; France, James L.; Lowry, David; Waltham, David A. et al. (2022): Is the destruction or removal of atmospheric methane a worthwhile option? In: *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 380 (2215), S. 20210108. DOI: 10.1098/rsta.2021.0108.

Onel, Lavinia; Brennan, Alexander; Seakins, Paul W.; Whalley, Lisa; Heard, Dwayne E. (2017): A new method for atmospheric detection of the CH₃O₂ radical. In: *Atmos. Meas. Tech.* 10 (10), S. 3985–4000. DOI: 10.5194/amt-10-3985-2017.

Umweltbundesamt (2022): Unterschätztes Treibhausgas Methan. Quellen, Wirkungen, Minderungsoptionen. Hg. v. UBA. UBA. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_pos_methanminderung_bf.pdf, zuletzt geprüft am 11.07.2024.

Umweltbundesamt (2024): Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen. Methan. Hg. v. Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid->, zuletzt aktualisiert am 17.05.2024, zuletzt geprüft am 07.07.2024.

Wahlen, M. (1993): The Global Methane Cycle. In: *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 21 (1), S. 407–426. DOI: 10.1146/annurev.ea.21.050193.002203.

Wang, J.; He, Q. P. (2023): Methane Removal from Air: Challenges and Opportunities. In: *Methane* 2 (4), S. 404–414. DOI: 10.3390/methane2040027.

Wang, Y.; Ming, T.; Li, W.; Yuan, Q.; Richter, R.; Davies, P.; Caillol, S. (2022): Atmospheric removal of methane by enhancing the natural hydroxyl radical sink. In: *Greenhouse Gases* 12 (6), S. 784–795. DOI: 10.1002/ghg.2191.

Winkelmann, R.; Steinert, N. J.; Armstrong McKay D.I.; Brovkin, V.; Kääb, A.; Notz, D. (2023): Global Tipping Points Report 2023. Chapter 1.2 Tipping points in the cryosphere. University of Exeter. Online verfügbar unter <https://global-tipping-points.org/section1/1-earth-system-tipping-points/1-2-tipping-points-in-the-cryosphere/>, zuletzt geprüft am 12.07.2024.

Zhang, Jie; Wang, Yuyin; Wang, Yun; Bai, Yang; Feng, Xin; Zhu, Jiahua et al. (2022): Solar Driven Gas Phase Advanced Oxidation Processes for Methane Removal - Challenges and Perspectives. In: *Chemistry (Weinheim an der Bergstrasse, Germany)* 28 (64), e202201984. DOI: 10.1002/chem.202201984.

Abkürzungsverzeichnis

CCS	Carbon Capture and Storage
CDR	Carbon Dioxide Removal
CO₂	Kohlendioxid
BECC(S)	Verfahren zur CO ₂ -Abtrennung aus Verbrennungsabgasen mit vorgeschalteter biogener Kohlenstoffabscheidung in Form von Biomasse, das „S“ steht für eine optionale Speicherung des CO ₂
DACC(S)	Direct Air Carbon Capture (and Storage)
HCl	Chlorwasserstoff (Salzsäure),
k.A	Keine Angaben vorhanden
mol	Mol (Stoffmenge)
NaCl	Natriumchlorid
NET	Negativemissionstechnologien
nmol	Nano-Mol
ppm	Parts per Million (Teile per Millionen Teilchen)
THG	Treibhausgase
UV	Ultraviolettes Licht
TRL	Technologiereifegrad
CH₄	Methan
LDAR	Lecksuche und Reparatur
RTO	Regenerative thermische Oxidation
vol%	Volumen-Prozent

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de
[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)
[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Andreas R. Köhler, Öko-Institut e.V.
Wolfram Jörß, Öko-Institut e.V.



Stand: Dezember/2024

Dieses Factsheet ist Teil des Vorhabens „Treibhausgasneutralität in der EU und in Deutschland: Die Konzeption einer Zielarchitektur unter Berücksichtigung von Senken“ (FKZ FKZ 3722 41 502 0). Die Inhalte entsprechen nicht zwingend der Position des Umweltbundesamtes.