

MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Vom Treibhauseffekt zu Carbon Capture: Chemische Hintergründe und
unterrichtspraktische Experimente zu Kohlenstoffdioxid

verfasst von | submitted by

Johannes Brandstätter BEd

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Master of Education (MEd)

Wien | Vienna, 2026

Studienkennzahl lt. Studienblatt |
Degree programme code as it appears on the
student record sheet:

UA 199 504 511 02

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree
programme as it appears on the student
record sheet:

Masterstudium Lehramt Sek (AB) Unterrichtsfach
Chemie Unterrichtsfach Geschichte und Politische
Bildung

Betreut von | Supervisor:

emer. o. Univ.-Prof. Dr. Dr. Bernhard Keppler

Mitbetreut von | Co-Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Günter Trettenhahn

“The good thing about science is that it’s true, whether or not you believe in it”
- Neil deGrasse Tyson

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während dem Fertigstellen meiner Masterarbeit unterstützt und begleitet haben - sei es während den vielen Stunden in diversen Bibliotheken in Wien, im Labor oder bei der Planung und Durchführung der Experimente.

Ebenso möchte ich all jenen Wegbegleiter*innen danken, die ich während dem Studium kennenlernen durfte und mit denen ich gelernt, gestaunt oder gefeiert habe, egal ob im Labor, zu Hause oder auf der Uni. Auch in manchen frustrierenden Momenten wart ihr immer für mich da und es hat sich gezeigt, dass man gemeinsam alles schaffen kann.

Einen weiteren herzlichen Dank möchte ich meinem Masterarbeitsbetreuer Ass.-Prof. Mag. Dr. Günter Trettenhahn aussprechen, der mir in diversen Gesprächen mit fachlichem Rat zur Seite stand und mir die notwendige Zeit gab, um neben dem Unterrichten diese Masterarbeit abzuschließen.

Ein besonderer Dank geht an meine Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben, und zwar nicht nur finanziell, sondern auch als fachliche und emotionale Stütze. Danke, dass ich euch bei jedem Problem kontaktieren konnte, dass ihr immer an mich geglaubt habt und mir die notwendigen Ressourcen zum Abschluss dieses Studiums gegeben habt.

Zu guter Letzt ein riesiger Dank an meine Freundin Verena, die mich während intensiven Prüfungs- oder Laborphasen komplett entlastet hat, damit ich mich auf das Lernen konzentrieren konnte. Außerdem hat sie durch das Korrekturlesen vermutlich mehr über Chemie gelernt, als ihr lieb war und mich stets im Studium zum Weitermachen motiviert.

Ohne die Unterstützung all dieser wundervollen Menschen würde ich heute diese Zeilen nicht schreiben können. Daher von Herzen: **Danke!**

Abstract

Die globale Erwärmung und die zentrale Rolle von Kohlendioxid machen es notwendig, nicht nur die naturwissenschaftliche Forschung, sondern auch den schulischen Unterricht stärker auf den Klimawandel auszurichten. Ziel dieser Arbeit war es zu untersuchen, bei welchen Themengebieten des österreichischen Chemielehrplans für die AHS-Sekundarstufe II Experimente zu CO₂ eingebunden werden können. Dafür wurden die fachlichen Grundlagen zum Treibhauseffekt sowie zu Carbon Capture and Storage (CCS) und Carbon Capture and Utilization (CCU) aufgearbeitet. Auf dieser Basis entstanden acht Experimente, die adaptiert und didaktisch aufbereitet wurden.

Die Experimente ermöglichen die Behandlung zentraler Basiskonzepte der Chemie, darunter das Stoff-Teilchen-Konzept, das Struktur-Eigenschafts-Konzept, das Donator-Akzeptor-Konzept sowie das Gleichgewichtskonzept. Darüber hinaus eröffnen sie vielfältige Möglichkeiten für fächerübergreifende Lernzugänge.

Die Ergebnisse zeigen, dass Experimente zu CO₂ in hohem Maße vielseitig einsetzbar sind und sich auf zahlreiche Themenfelder des österreichischen Lehrplans übertragen lassen. Neben der Förderung fachlicher Kompetenzen leisten sie auch einen Beitrag zur Bildung für nachhaltige Entwicklung, indem sie Schüler*innen die Relevanz chemischer Prozesse für aktuelle gesellschaftliche Herausforderungen verdeutlichen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	9
2. Treibhauseffekt	11
2.1. Natürlicher Treibhauseffekt	12
2.2. Anthropogener Treibhauseffekt	13
2.2.1. Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	14
2.2.2. Methan (CH ₄)	17
2.2.3. Lachgas (N ₂ O)	21
2.2.4. Halogenhaltige Treibhausgase.	22
3. Carbon Capture	24
3.1. Kohlenstoffkreislauf	25
3.2. Carbon Capture and Storage (CCS)	27
3.2.1. Pre-Combustion-Abscheidung	28
3.2.2. Post-Combustion-Abscheidung	30
3.2.3. Oxyfuel-Verfahren	32
3.2.4. Carbon Dioxide Removal (CDR)	34
3.3. Anwendungsbeispiele von Carbon Capture and Storage (CCS)	36
3.4. Carbon Capture and Utilization (CCU)	39
3.4.1. Ameisensäure.....	40
3.4.2. Methan (Synthetic Natural Gas, SNG)	41
3.4.3. Methanol	41
3.4.4. Harnstoff	42
3.4.5. Synthesegas (Syngas) und Fischer-Tropsch-Synthese (FTS)	42
3.4.6. Polycarbonate.....	43
3.5. Fazit zu CCS und CCU	44
4. Experimente im Schulunterricht.....	46
4.1. Das Brausetablettengas	50

4.2.	Sprudel unter Druck: CO ₂ im Mineralwasser	55
4.3.	Erst klar, dann trüb	59
4.4.	Alkoholische Gärung	62
4.5.	Einfluss von CO ₂ auf den pH-Wert.....	67
4.6.	Experiment zum Treibhauseffekt.....	71
4.7.	Reduktion von Kupfer(II)-oxid.....	78
4.8.	Carbon Capture – Der Kohlenstoffdioxid-Handschuh	83
5.	Fazit	88
6.	Literaturverzeichnis.....	90
7.	Abbildungsverzeichnis.....	98
8.	Tabellenverzeichnis.....	101
9.	Verwendete Hilfsmittel	102

1. Einleitung

Der Klimawandel zählt zu den größten existenziellen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Steigende Treibhausgasemissionen führen bereits heute zu spürbaren Veränderungen des globalen Klimasystems. Seit Beginn der Industrialisierung haben anthropogene Treibhausgasemissionen die globale Mitteltemperatur bis 2024 bereits um 1,46 °C ansteigen lassen. (Lindsey & Dahlman, 2025) Allein im Jahr 2019 wurden durch die Nutzung fossiler Energieträger, Entwaldung und andere anthropogene Aktivitäten rund 43 Milliarden Tonnen Kohlenstoffdioxid¹ freigesetzt, was zu einer weiteren Beschleunigung des Klimawandels beitrug. Gleichzeitig nahmen Extremwetterereignisse wie Stürme, Hitzewellen und Überschwemmungen zu und zwangen über sieben Millionen Menschen, ihre Heimat zu verlassen (Jackson et al., 2020).

Ein Blick in die Erdgeschichte verdeutlicht die Brisanz dieser Entwicklung. Vor etwa vier Millionen Jahren war es auf der Erde rund 2–3 °C wärmer als heute, was zu einem weitgehenden Abschmelzen der Eisschilde in Grönland und der Westantarktis führte. Der Meeresspiegel lag damals um 10–20 Meter höher als heute – ein Szenario, das bis zum Ende dieses Jahrhunderts nicht ausgeschlossen werden kann, wenn die globale Temperatur weiter ansteigt (Jackson et al., 2020).

Diese globalen Entwicklungen machen deutlich, dass die Auseinandersetzung mit dem Klimawandel und den zugrunde liegenden naturwissenschaftlichen Mechanismen nicht nur gesellschaftlich, sondern auch bildungspolitisch von großer Bedeutung ist. Naturwissenschaftlicher Unterricht, insbesondere das Fach Chemie, bietet hier einen besonderen Zugang, da zentrale Konzepte wie das Stoff-Teilchen-Konzept, das Struktur-Eigenschafts-Konzept oder Gleichgewichtsreaktionen anhand des Themas Kohlenstoffdioxid anschaulich und lebensnah vermittelt werden können. Experimente eröffnen Schüler*innen dabei die Möglichkeit, abstrakte Zusammenhänge praktisch zu erfahren und deren Relevanz für Umwelt und Gesellschaft kritisch zu reflektieren.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie Experimente zu Kohlenstoffdioxid im österreichischen Chemielehrplan der Sekundarstufe II sinnvoll eingebettet werden können. Ziel dieser Arbeit ist es daher, fachliche Grundlagen, aktuelle Technologien wie

¹ Für Kohlenstoffdioxid werden in dieser Arbeit auch folgende Synonyme benutzt: CO₂ oder Kohlendioxid.

Carbon Capture and Storage (CCS) sowie Carbon Capture and Utilization (CCU) darzustellen und diese mit geeigneten Unterrichtsexperimenten zu verknüpfen. Daraus ergibt sich die leitende Forschungsfrage dieser Arbeit: *Zu welchen Themengebieten des österreichischen Chemielehrplans in der Sekundarstufe II können Experimente zu Kohlenstoffdioxid sinnvoll eingebaut werden?*

Der Aufbau dieser Arbeit gliedert sich wie folgt: Kapitel 2 behandelt die naturwissenschaftlichen Grundlagen des Treibhauseffekts und der relevanten Treibhausgase. In Kapitel 3 werden verschiedene Verfahren zur Abscheidung, Speicherung und Nutzung von CO₂ dargestellt. Kapitel 4 widmet sich der Einbettung der Experimente in den österreichischen Lehrplan, wobei jedes Experiment samt Lösungsvorschlag daran anschließt. Kapitel 5 schließt die Masterarbeit mit einem Gesamtfazit ab und fasst die Erkenntnisse der Arbeit zusammen.

2. Treibhauseffekt

1681 stellte Edme Mariotte fest, dass Sonnenlicht durch Glas hindurchtritt, während Wärme nicht entweichen kann, was das Prinzip des Treibhauseffekts vorwegnahm. Die Erkenntnis, dass das Klima der Erde durch die Konzentration von Treibhausgasen beeinflusst werden kann, ist über 100 Jahre alt. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts zeigten einfache Experimente (durch John Tyndall oder Eunice Newton Foote), dass die Erdatmosphäre selbst in der Lage ist, Wärme einzufangen. Joseph Fourier erkannte 1824, dass die Atmosphäre die Abstrahlung von Wärme ins Weltall reduziert, was zur Erwärmung beiträgt. (Le Treut et al., 2007) Dadurch, dass der Energieeintrag durch die Sonneneinstrahlung auf die Erde größer ist, als das, was wieder abgestrahlt wird, kommt es zu einer Erwärmung der bodennahen Luftschichten und der Atmosphäre. (Geldsetzer et al., 2024)

Kurzwellige Strahlung von sichtbarem Licht, Ultraviolettstrahlung und Wärme wird von der Sonne auf die Erde gestrahlt. Die Erdoberfläche absorbiert diese Strahlung und wandelt sie größtenteils in Wärme um, wobei die Erdoberfläche und die Luftmassen darüber erwärmt werden. Die erwärmte Erdoberfläche strahlt die Wärme in Form von längerwelliger Infrarotstrahlung wieder ab. Die Infrarotstrahlung kann durch die Atmosphäre absorbiert werden und strahlt diese wiederum in Richtung Boden, wodurch es zu einem erhöhten Energieeintrag auf die Erdoberfläche kommt. Ohne Atmosphäre würde es auf der Erdoberfläche eine weit niedrigere Temperatur geben. (Geldsetzer et al., 2024)

John Tyndall identifizierte bereits 1859, dass komplexe Moleküle wie Kohlenstoffdioxid für die Absorption von Wärme verantwortlich sind, was entscheidend für Klimaveränderungen sein könnte. In den 1890er Jahren postulierte Svante Arrhenius, dass Schwankungen von CO_2 in der Atmosphäre für die Eiszeiten verantwortlich sein könnten, was sich später bestätigte. Guy Stewart Callendar verband 1938 die Zunahme von CO_2 mit der globalen Erwärmung und stellte fest, dass eine Verdopplung von Kohlendioxid die globale Temperatur um 2°C erhöhen könnte. In den 1970er Jahren wurden weitere Treibhausgase wie Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) und halogenierte Kohlenwasserstoffe (FCKW) als bedeutend erkannt. Gleichzeitig wurde die Rolle von Aerosolen, die Sonnenlicht reflektieren und so die Erdoberfläche abkühlen können,

untersucht. Insgesamt zeigt sich heute ein komplexes Bild der atmosphärischen Bestandteile, die den Klimawandel beeinflussen. (Le Treut et al., 2007)

2.1. Natürlicher Treibhauseffekt

Die durchschnittliche Temperatur auf der Erde kann mithilfe der eingestrahnten Energie durch die Sonne und der Abstrahlung durch die Erdoberfläche berechnet werden. Für diese Berechnung geht man davon aus, dass die eingestrahlte Energie und die abgegebene Wärme gleich groß sind. Die Sonne strahlt mit einer Intensität von $1,37 \text{ kW/m}^2$ auf die Erdoberfläche. Ein Teil der Sonneneinstrahlung wird reflektiert (Albedo) und der Rest gelangt auf die Erdoberfläche. Gäbe es um die Erde keine Atmosphäre, die einen Teil der rückstrahlenden Wärmestrahlung absorbiert, hätte die Erde eine Durchschnittstemperatur von -18°C . (Wadhams, 2020) Durch Treibhausgase wie Methan (CH_4), Lachgas (N_2O), Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O), die langwellige Infrarotstrahlung absorbieren, wird Leben auf der Erde, so wie wir es kennen, erst möglich. (Umweltbundesamt, 2024-a) Die Absorption der Wärmestrahlung führt dazu, dass die Erde um 33°C wärmer ist als ohne Atmosphäre und es auf der Erde eine durchschnittliche Temperatur von $+15^\circ\text{C}$ hat. (Umweltbundesamt, 2021)

Von der Erde abgestrahlte Wärmestrahlung hat einen Wellenlängenbereich von rund $4\text{--}50 \text{ }\mu\text{m}$. Sichtbares Licht hat im Vergleich dazu eine Wellenlänge von $0,4\text{--}0,7 \text{ }\mu\text{m}$. (Abbildung 1) Wasserdampf absorbiert fast die gesamte Wärmestrahlung bis $8 \text{ }\mu\text{m}$ und ab $20 \text{ }\mu\text{m}$, wodurch die Energie nicht in den Orbit entweichen kann. Kohlendioxid in der

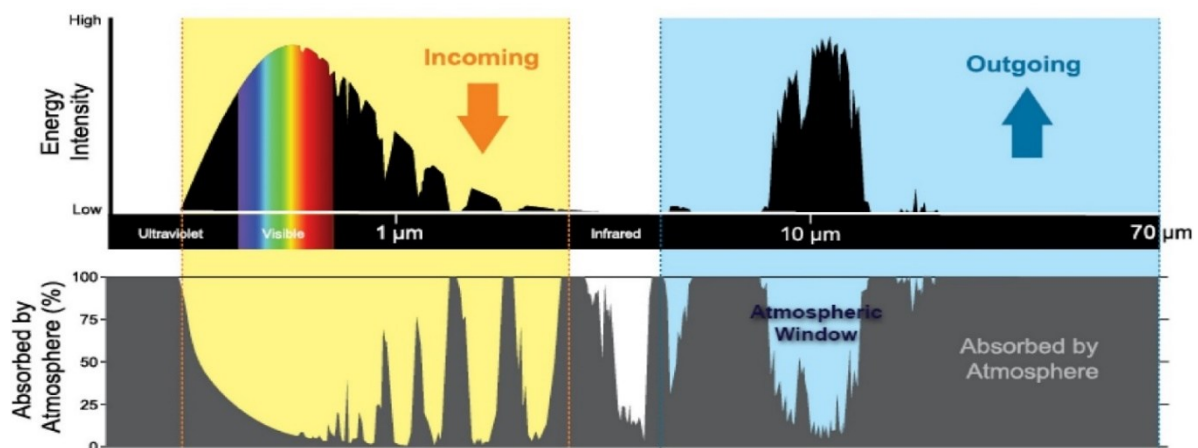


Abbildung 1: Einstrahlende und ausgehende Energie bei unterschiedlichen Wellenlängen. Das „atmosphärische Fenster“ befindet sich bei einer Wellenlänge von circa $10 \text{ }\mu\text{m}$. Ein Wellenlängenbereich in der die Wärmestrahlung der Erde nicht durch Treibhausgase in der Atmosphäre absorbiert wird. Quelle: NOAA (2023).

Atmosphäre nimmt Wärmestrahlung besonders in den Bereichen um 5 μm und 16 μm auf. (Geldsetzer et al., 2024) Die Absorption der Wärmestrahlung im Infrarotbereich beruht auf quantisierten Rotations- und Schwingungsanregungen der Moleküle. Nach den Prinzipien der Quantentheorie können diese Energieänderungen nur in diskreten Schritten erfolgen. Dadurch absorbiert jedes Molekül elektromagnetische Strahlung nur bei bestimmten charakteristischen Frequenzen, die den jeweiligen Rotations- und Vibrationsmoden entsprechen. (Wadhams, 2020) Für die Abstrahlung der Wärmeenergie bleibt ein „Fenster“ (Abbildung 1.) im Spektralbereich von 8 – 13 μm und ein kleineres „Fenster“ bei circa 20 μm . Je höher die Konzentration der Treibhausgase, desto stärker wird auch die Absorption durch diese. (Geldsetzer et al., 2024) Daraus resultierend wird die Konzentration von einigen dieser Treibhausgase genauestens gemessen und ausgewertet. (NASA, o.J.-a)

2.2. Anthropogener Treibhauseffekt

In Kapitel 2.1. zum natürlichen Treibhauseffekt wurden bereits Treibhausgase wie Methan, Lachgas, Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf genannt, die durch den natürlichen Treibhauseffekt dazu beitragen, dass Leben auf der Erde möglich wird. In diesem Kapitel werden Ursachen für den menschengemachten Treibhauseffekt und deren Ursprünge aufgezeigt.

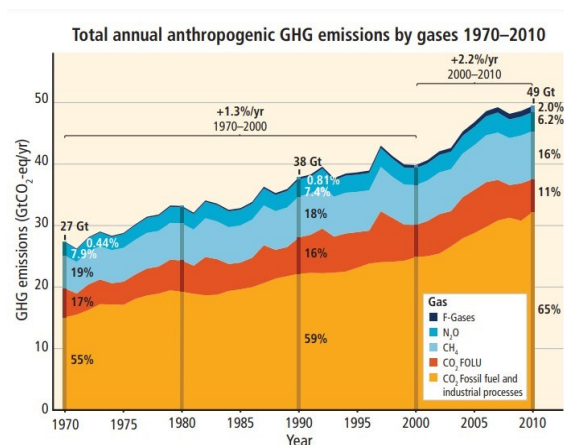


Abbildung 2: jährlicher Ausstoß an Treibhausgasen nach Kategorie. Quelle: (IPCC (2014).

Das Klima auf der Erde wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Darunter zum Beispiel Sonnenzyklen, Vulkanismus, Verschiebung der Erdplatten, Abweichungen im Erdorbit, Veränderung der Erdoberfläche und die Zusammensetzung der Atmosphäre. Neben den oben genannten Treibhausgasen haben auch halogenhaltige Kohlenwasserstoffe ein sehr großes

Treibhauspotential. (Abbildung 2). (Rahmani et al., 2024) Die halogenierten Kohlenwasserstoffe wurden aufgrund ihrer günstigen Eigenschaften (sehr stabil, nicht brennbar, geringe Toxizität) als Kühlmittel, als Triebmittel für Spraydosen, als Inhalt von

Feuerlöschern und vielem mehr verwendet. CFKW² sind sehr reaktionsträge, weshalb sie kaum mit anderen Stoffen reagieren. Durch die Sonneneinstrahlung in der Stratosphäre können sich jedoch Radikale (zum Beispiel Chlorradikale) bilden, die dann mit Ozonmolekülen (O₃) reagieren und so zu einer Abnahme der Ozonschicht führen. Ein einziges Chloratom kann bis zu 100.000 Ozonmoleküle zerstören. Durch die Verwendung der CFKW konnte in den 1980ern eine Abnahme der Ozonhülle festgestellt werden, das sogenannte Ozonloch. (Bruce et al., 2011) Durch die Unterzeichnung des Montrealer Protokolls von 1987 verpflichteten sich die Unterzeichnerstaaten, Reduktionsschritte in der Herstellung und Verwendung von ozonschädigenden Stoffen zu setzen. Neben der Schädigung der Ozonschicht haben CFKW ein sehr hohes Treibhauspotential. Das Treibhauspotential von einigen chlorierten Kohlenwasserstoffen ist auf 100 Jahre betrachtet um das 1.000 – 10.000-Fache höher als bei CO₂. (Umweltbundesamt, 2017)

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die vier wichtigsten anthropogenen Treibhausgase: Kohlenstoffdioxid, Methan, Lachgas und halogenierte Treibhausgase genauer betrachtet. Neben ihrer Konzentration in der Atmosphäre und die Ursache für deren Freisetzung werden auch Abbauwege und die Verweildauer dieser Gase diskutiert.

2.2.1. Kohlenstoffdioxid (CO₂)

Weltweit wird die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bei über 400 Messstationen kontinuierlich gemessen. (Gulev et al., 2019) Seit 1958 wird am Mauna Loa Observatorium auf Hawaii die atmosphärische Kohlendioxidkonzentration kontinuierlich gemessen. Diese Datenreihe gilt als die längste durchgehende Messung ihrer Art und wird zu Ehren des Initiators Charles David Keeling als *Keeling Curve* bezeichnet. Neben der derzeitigen Konzentration an Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre, kann man auch den weltweiten Kohlenstoffkreislauf an der Keeling Kurve beobachten. Von saisonalen Schwankungen abgesehen, kann ein stetiger Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre beobachtet werden. (Le Treut et al., 2007) Lag die Kohlenstoffdioxid Konzentration zu Beginn der Messungen am Mauna Loa noch bei 317 ppm (parts per million), stiegen diese in wenigen Jahrzehnten auf über 400 ppm an (Abbildung 3). Seit 2015 beträgt die globale CO₂-Konzentration über 400 ppm. Bei den aktuellen Messdaten

² CFKW: Abkürzung für Chlorfluorkohlenwasserstoffe, auch bekannt als FCKW – Fluorchlorkohlenwasserstoffe

der Mauna Loa Messstelle von Juni 2024 betrug die CO₂-Konzentration bereits 427 ppm. (NASA, o.J.-a) Um sich einen besseren Überblick über den menschlichen Einfluss zum Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration zu machen, wurde mithilfe von Bohrkernen

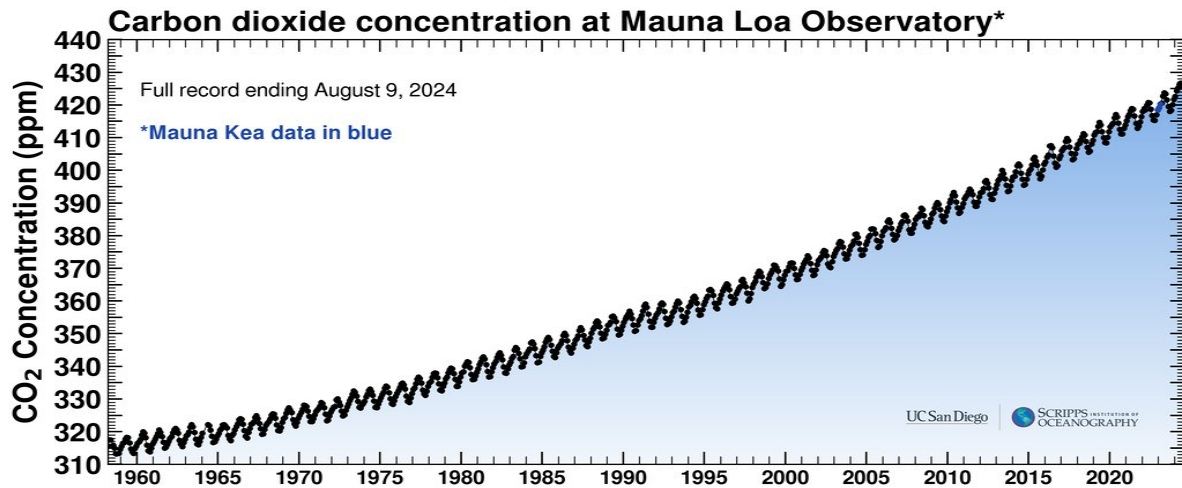


Abbildung 3 Monatliche Kohlenstoffdioxidkonzentration gemessen am Mauna Loa Observatory, Hawaii. Quelle: Scripps Institution of Oceanography (o.J.).

die CO₂-Konzentration der letzten 10.000 Jahre ausgewertet (Abbildung 4). Durch indirekte Messungen, nämlich durch eingeschlossene Luftblasen in Eisproben aus der Antarktis und Grönland, konnte auf eine CO₂-Konzentration von rund 280 ± 20 ppm bis 1750 geschlossen werden. (Le Treut et al., 2007) Seit der industriellen Revolution stieg der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre um über 100 ppm an. Die erste Steigerung um 50 ppm seit 1750 dauerte bis in die 1970er. Seither nimmt die Geschwindigkeit, mit der die CO₂-Konzentration ansteigt, stetig zu. Die zweite Steigerung um 50 ppm wurde bereits in nur

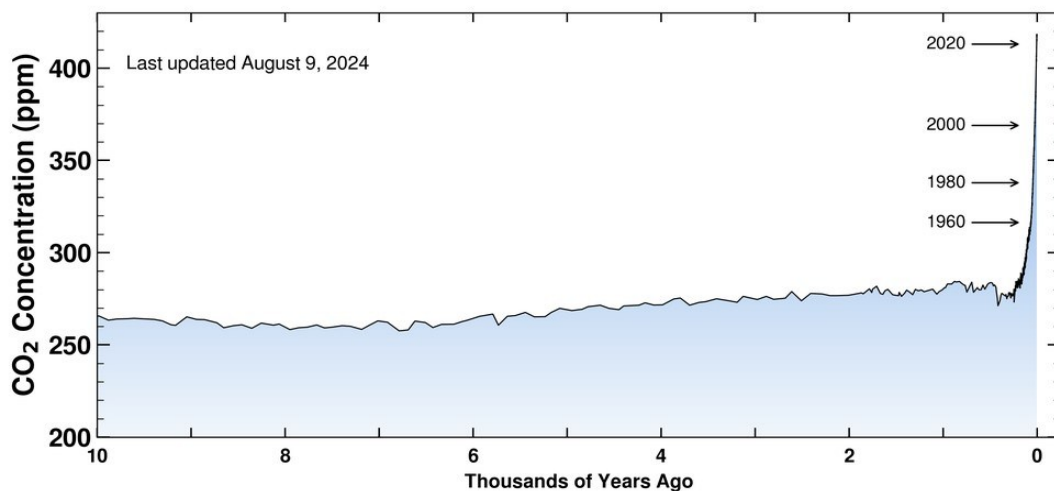


Abbildung 4: CO₂-Konzentration durch (indirekte) Messungen der letzten 10.000 Jahre. Quelle: Scripps Institution of Oceanography (o.J.).

30 Jahren erreicht. (Forster et al., 2007, S.137) Im Zeitraum von 1958 – 2024 stieg die Kohlenstoffdioxidkonzentration um durchschnittlich 1,67 ppm pro Jahr. (NASA, o.J.-a)

Der Anstieg der Kohlendioxidemissionen ist auf den Einsatz fossiler Brennstoffe in der Energiegewinnung, der Zementherstellung, dem Transport und weiteren Industrien zurückzuführen. Zudem verschärft die Abholzung von Wäldern dieses Problem, indem sie Kohlendioxid in die Atmosphäre freisetzt und die Fähigkeit der Pflanzen, CO₂ aufzunehmen, verringert. Neben der Abholzung und Brandrodung trägt auch der natürliche Abbau von Pflanzenbestandteilen zur Freisetzung von Kohlendioxid bei. (Rahmani et al., 2024)

Laut dem IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Assessment Report von 2014 trägt CO₂ zu 76% zu den menschengemachten Treibhausgasemissionen bei. Von den Gesamtemissionen im Jahr 2010 entfielen 16% auf Methan, 6,2% auf Lachgas und 2,0% auf fluorierte Gase. Seit den 1970er Jahren macht Kohlenstoffdioxid rund 75% der anthropogenen Treibhausgasemissionen aus. Der Rest entfällt auf andere Gase. (IPCC, 2014) Um eine bessere Vergleichbarkeit bei den Treibhausgasen und dessen Einfluss auf den Treibhauseffekt zu erreichen, wurde 1990 durch das IPCC das GWP (Global Warming Potential) eingeführt. Mithilfe des GWP kann auf die unterschiedliche Verweildauer und die Stärke des Strahlungsantriebs³ von 1 kg eines Treibhausgases im Vergleich zu 1kg CO₂ eingegangen werden. Es kann ebenfalls als Orientierungshilfe für Investitionen und politische Entscheidungsträger herangezogen werden, um so einen möglichst großen Effekt bei der Einsparung und Vermeidung klimaschädlicher Treibhausgase zu bewirken. (IPCC, 1990, S.19) Die Lebensdauer unterschiedlicher Treibhausgase variiert stark, wodurch man mit Begriffen wie *long-lived gases* (langlebige Gase wie CO₂) und *short-lived gases* (kurzlebige Gase wie CH₄) auf die unterschiedliche Verweildauer in der Atmosphäre hinweisen möchte. Um einen besseren Überblick über die Auswirkungen von Treibhausgasen und deren GWP zu haben, wird meist ein Zeitraum von 20, 100 oder 500 Jahren betrachtet. Für Kohlenstoffdioxid wird für den jeweiligen Zeitraum die Zahl 1 zugewiesen. Alle anderen Stoffe werden im Vergleich zu CO₂ betrachtet. Das kurzlebige Treibhausgas Methan hat eine Verweildauer von 12,4 Jahren (Tabelle 1) in der

³ Strahlungsantrieb: auf Englisch auch *radiative forcing (rf)* bezeichnet die Änderung der Nettoeinstrahlung in W/m² in der Troposphäre. Ein positiver Strahlungsantrieb führt zu einer Erwärmung der Erdatmosphäre. (U.S. Energy Information Administration [EIA], o.J.)

Atmosphäre und wirkt auf 20 Jahre gesehen 84-mal so stark als Treibhausgas wie CO₂. Betrachtet man hingegen einen längeren Zeitraum von 100 Jahre, wirkt CH₄ *nur* noch 28-mal so treibhauswirksam wie Kohlendioxid. Bei langlebigeren Gasen wie N₂O ist der Strahlungsantrieb nach 20 Jahren 264-mal so groß wie bei CO₂ und nach 100 Jahren 285-mal. (IPCC, 2014)

	Verweildauer in der Atmosphäre (Jahre)	Kumulativer Strahlungsantrieb über 20 Jahre	Kumulativer Strahlungsantrieb über 100 Jahre
CO ₂	-*	1	1
CH ₄	12,4	84	28
N ₂ O	121,0	264	265
CF ₄	50.000,0	4880	6630

*Tabelle 1: GWP unterschiedlicher Treibhausgase. *Für CO₂ kann keine einzelne Verweildauer angegeben werden. Quelle: IPCC (2014).*

Aufgrund von komplexer, langwieriger Prozesse ist das Konzept einer einheitlichen atmosphärischen Lebensdauer für CO₂ nicht anwendbar. (ciais et al., 2013) (siehe Kapitel 3.1 Kohlenstoffkreislauf).

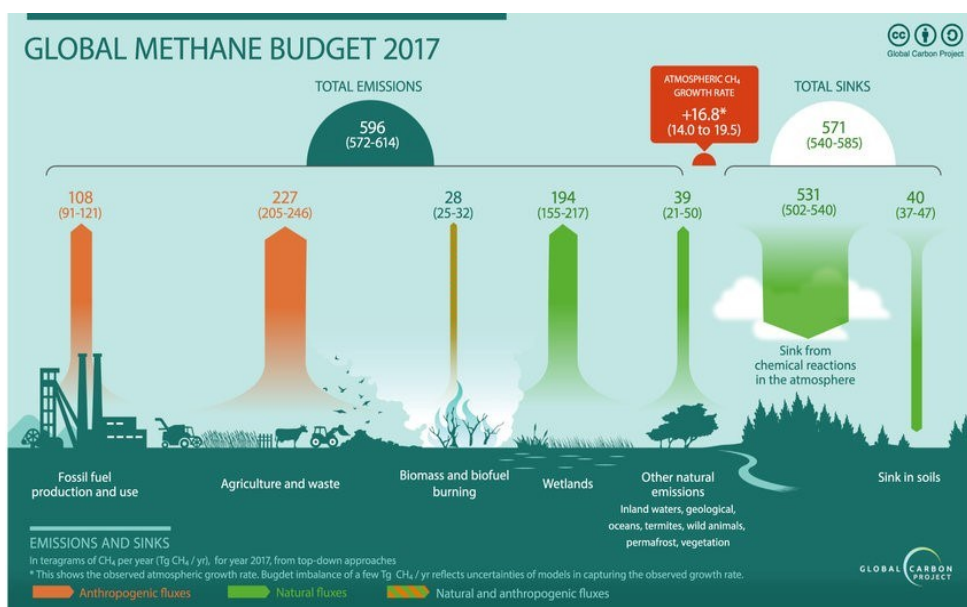
2.2.2. Methan (CH₄)

Das nach Kohlenstoffdioxid zweitwirksamste Treibhausgas mit einem Anteil von 16% der anthropogenen Treibhausgasemissionen im Jahr 2010 war laut dem IPCC Assesment Report von 2014, Methan. Trotz einer nur sehr geringen Konzentration von ~1.875 ppb⁴ (2019) in der Atmosphäre trägt Methan massiv zur Erwärmung des Planeten bei. Die Lebensdauer von CH₄ in der Atmosphäre ist mit 12,4 Jahren nicht sehr lange. Durch die bessere Aufnahmefähigkeit von Wärmestrahlung wirkt Methan trotz seiner kurzen Verweildauer in der Atmosphäre auf 20 Jahre gesehen dennoch 84-mal so stark wie Kohlenstoffdioxid (Tabelle 1). (Jackson et al., 2020) Mithilfe von Bohrkerndaten in Grönland konnte ähnlich wie bei Kohlenstoffdioxid, indirekt auf die Methankonzentration der letzten 1.000 Jahren geschlossen werden. Bis zum 19. Jahrhundert entsprach die Methankonzentration in der Atmosphäre konstant um 700 ppb. Blickt man sogar auf die

⁴ ppb steht für parts per Billion.

letzten 500.000 Jahre zurück, betrug die CH₄-Konzentration in der Atmosphäre nur 400-700 ppm. Durch eine stetige Zunahme und Freisetzung von Methan durch den Menschen stieg die Konzentration auf 1.774 ppb im Jahr 2005 an. (Le Treut et al., 2007) In den letzten 200 Jahren hat sich die CH₄-Konzentration mehr als verdoppelt und erreichte im Februar 2024 einen Wert von 1929 ppb. (NASA, o.J.-b)

2017 gingen rund 60% der gesamten Methanemissionen auf anthropogene Quellen zurück. In fast allen Regionen stiegen die Methanemissionen 2017 im Vergleich zum Vergleichszeitraum von 2000-2006. Der Großteil der Methanemissionen stammte dabei aus Regionen wie China, Afrika, Naher Osten und Südostasien/Ozeanien. Europa war 2017 der einzige Kontinent, der eine Reduktion der Methanemissionen schaffte. (Jackson et al., 2020) Der Anstieg der Methanemissionen wird hauptsächlich auf zwei anthropogene Quellen zurückgeführt: die Landwirtschaft und die Verwendung beziehungsweise Gewinnung fossiler Brennstoffe (Abbildung 5). In der Landwirtschaft ist in den meisten Ländern die Viehhaltung von Wiederkäuern für den Großteil der Methanemissionen verantwortlich. Im Verdauungstrakt der Wiederkäuer herrschen ideale Bedingungen für Mikroorganismen, die dort durch die ständige Zufuhr von Pflanzenmaterial Methan erzeugen. (Saunois et al., 2020) Neben fossilen Brennstoffen und der Landwirtschaft entstehen auch große Mengen an CH₄ durch die Abfallwirtschaft. Im Jahr 2017 machten Landwirtschaft und Abfall 60% des Anstiegs an Methanemissionen aus, während fossile Brennstoffe 40% beitrugen. Die jährlichen Methanemissionen je



Sektor (fossile Brennstoffe, Landwirtschaft und Abfall, anthropogene Quellen, etc.), aber auch die Abnahme von CH₄ können Abbildung 5 entnommen

Abbildung 5: jährliche Methanemissionen und Absorption nach Kategorien. Quelle: Jackson et al. (2020).

werden. (Jackson et al., 2020)

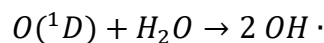
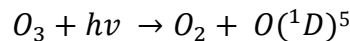
Der landwirtschaftliche Sektor, insbesondere in Südostasien/Ozeanien, Afrika und Südamerika, verzeichnete das größte Emissionswachstum. Die Methanemissionen aus fossilen Brennstoffen nahmen vor allem in China, Nordamerika, Afrika und Südostasien/Ozeanien zu. Neben diesen anthropogenen Ursachen zählen Feuchtgebiete, Sümpfe und Moore zu den größten natürlichen Methanquellen. Sie sind Teil des globalen Kohlenstoffkreislaufs und haben die atmosphärische Methankonzentration über Jahrtausende hinweg geprägt. (Jackson et al., 2020)

Mit der fortschreitenden Erwärmung rücken jedoch zunehmend zusätzliche Kohlenstoffspeicher in den Blick, die bislang weitgehend stabil waren: Permafrostböden und Methanhydrate (Methanclathrat). Modellierungen zeigen, dass bei einer globalen Erwärmung um 2–4 °C bis 2100 große Teile des oberflächennahen Permafrosts auftauen könnten. (Canadell et al., 2021) Dabei besteht die Gefahr, dass gespeicherter Kohlenstoff in Form von CO₂ und CH₄ freigesetzt wird. Während die Lagerstätten im Permafrost vergleichsweise klein sind, machen die marinen Vorkommen den größten Anteil aus. Ein abruptes, großflächiges Entweichen von Methan aus diesen Clathraten gilt trotz der raschen Erwärmung jedoch als sehr unwahrscheinlich. Aufgrund der langen Zeitskalen der Clathrat-Destabilisierung ist im Verlauf des 21. Jahrhunderts nicht mit einer deutlichen Zunahme dieser Emissionen zu rechnen. Modellierungen prognostizieren höchstens einen zusätzlichen Beitrag von rund 20 ppb atmosphärischem CH₄, entsprechend weniger als 0,2 ppb pro Jahr. (Canadell et al., 2021)

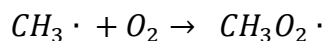
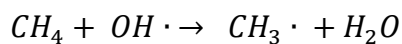
Insgesamt stellt Methan damit ein Treibhausgas mit erheblichem kurzfristigem Erwärmungspotenzial dar. Während die größten Beiträge derzeit aus Landwirtschaft, fossilen Brennstoffen und Feuchtgebieten stammen, muss das Auftauen von Permafrostböden und die mögliche Destabilisierung von Methanhydraten als langfristige Rückkopplung im Klimasystem berücksichtigt werden. Auch wenn ihr Beitrag im 21. Jahrhundert voraussichtlich begrenzt bleibt, besteht wissenschaftlicher Konsens, dass mit zunehmender Erwärmung zusätzliche Emissionen freigesetzt werden und dadurch eine weitere Verstärkung des Klimawandels eintreten kann. (Canadell et al., 2021)

Der hauptsächliche Abbau von CH₄ in der Atmosphäre findet mithilfe von OH-Radikalen (Hydroxyl-Radikale) statt. Diese Reaktion läuft in der Troposphäre (unter 10 km) ab und

ist für etwa 90% des Abbaus von Methan verantwortlich. (Saunois et al., 2020) Die Hydroxyl-Radikale oxidieren viele nicht wasserlösliche Spurengase in unserer Troposphäre und *reinigen* so die Atmosphäre, weshalb sie auch den Beinamen *atmospheric detergent* (atmosphärisches Reinigungsmittel) erhalten haben. Die Hydroxyl-Radikale werden durch die Reaktion von Ozon mit UV-Strahlung gebildet, was wiederum mit Wasserdampf reagiert, wodurch Hydroxyl-Radikale entstehen:



Die gebildeten Hydroxyl-Radikale reagieren mit Methan, wobei Methyl-Radikale gebildet werden. Die Methylradikale reagieren sofort mit Sauerstoff aus der Luft und bilden ein Methylperoxyradikal.



In mehreren Reaktionsschritten wird der Kohlenstoff weiter oxidiert, bis am Ende Kohlenstoffdioxid und Wasser entstehen. (Riedel et al., 2008) Selbst nach dem Abbau von Methan kommt es durch den zusätzlichen Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre zu einem anthropogenen Strahlungsantrieb, das heißt, dass mehr Wärme in der Atmosphäre durch diese Stoffe eingefangen wird und nicht abgestrahlt werden kann. (Myhre et al., 2013)

Gelangt das Methan hingegen bis in die Stratosphäre, wird dieses durch angeregten atomaren Sauerstoff, durch Chloratome oder Fluoratome abgebaut. (Saunois et al., 2020) Neben dem Abbau in der Troposphäre oder Stratosphäre (15-50 km Höhe) kann Methan auch von methanotrophen Bakterien verstoffwechselt werden, die in sauerstoffgesättigten Böden angesiedelt sind. Diese sind nach dem radikalischen Abbau in der Troposphäre der größte Hebel für die Abnahme an Methan in der Atmosphäre. (Saunois et al., 2020)

⁵ O(¹D) Sauerstoffatom im angeregten Zustand

Ggf. als Quelle für die Formel:
https://www.researchgate.net/publication/44159216_Measurement_of_volatile_organic_compounds_and_total_reactivity_in_the_atmosphere
 alternativ: <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-032320-090307>

Durch die jährlichen Emissionen und die Abnahme durch natürliche Senken kommen dennoch jährlich rund 16,8 Tg CH_4 /Jahr⁶ hinzu. (Jackson et al., 2020)

2.2.3. Lachgas (N_2O)

Obwohl Stickstoffmoleküle (N_2) fast 80 Prozent der Atmosphäre ausmachen, ist es für viele Lebewesen oder Pflanzen nicht möglich diesen aus der Atmosphäre zu absorbieren. Erst wenn die Stickstoffmoleküle in eine biologisch verfügbare Form umgewandelt wurden, kann es von Lebewesen verwertet werden. Diesen Prozess nennt man Stickstofffixierung und wird durch Bodenbakterien wie Rhizobien in Leguminosen durchgeführt. Neben dem Stickstoff aus der Luft können auch Düngemittel wie Ammoniak (NH_3) in den Stickstoffkreislauf eingebracht werden. Durch eine Vielzahl an

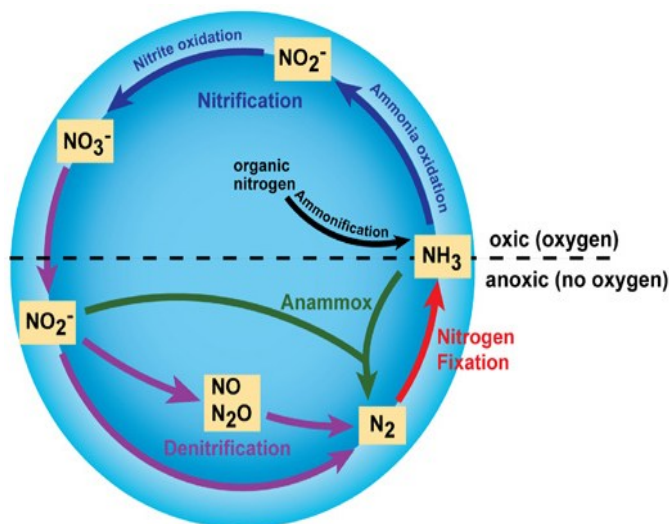


Abbildung 6: Stickstoffkreislauf. Quelle: Bernhard (2010).

Schritten sowohl aerob als auch anaerob durch Nitrifikation und Denitrifikation kann es durch zu viel Stickstoff in Gewässern oder an Land zur Bildung von Lachgas (N_2O) kommen. (Bernhard, 2010)

Lachgas hat eine lange Lebensdauer von rund 121 Jahren (Tabelle 1) und gilt neben CFKW (chlorierte fluorkohlenwasserstoffe) als

eine der hauptverantwortlichen Ursachen für die Zerstörung von Ozon (O_3) in der Stratosphäre. (Tian et al., 2024) Wie im Kapitel 2.2.2. *Methan* angeführt, ist Ozon ein wichtiger Bestandteil für die Bildung von Hydroxyl-radikale, die wiederum als *Reinigungsmittel* in der Atmosphäre wirksam werden und so ein weiteres Erhitzen der Erde verhindern. Durch das Montrealer Protokoll wurde die Verwendung und Produktion von ozonzerstörenden (ozone depleting substances) CFKW streng geregelt und reguliert,

⁶ Tg CH_4 /Jahr Tg steht für Terragramm, was 10^{12} Gramm oder 1 Million Tonnen (Megatonne, Mt) entspricht. Also einer Steigerung von 16,8 Megatonnen CH_4 /Jahr.

was dazu führte, dass Lachgas die größte Ursache für die Zerstörung der Ozonschicht im 21. Jahrhundert sein wird. (Ravishankara et al., 2009)

In den letzten vier Jahrzehnten (1980–2020) sind die jährlichen anthropogenen Lachgas-Emissionen, mit einer Wachstumsrate von 1,33 ppb/Jahr, um 40% gestiegen. Der Großteil dieser Emissionen stammte 2020 aus der Landwirtschaft, die mit 3,9 Tg N pro Jahr den größten Anteil an den anthropogenen Emissionen ausmachte. Ähnlich wie bei anderen Treibhausgasen konnte mithilfe von Eisbohrkernen auf historische Konzentrationen dieser geschlossen werden. Die derzeitige N₂O-Konzentration übersteigt Werte, die seit über 800.000 Jahren auf der Erde nicht beobachtet wurden. Lag die Lachgaskonzentration 1750 noch bei etwa 270 ppb, so stieg dieser Wert in der Troposphäre bis ins Jahr 2022 um fast 25% auf 336 ppb. (Tian et al., 2024)

Weitere direkte anthropogene Quellen wie fossile Brennstoffe, Industrie, Abwässer und Abfall sowie die Biomasseverbrennung tragen ebenfalls zum Anstieg der N₂O-Emissionen bei. Europa, einst der größte Emittent, konnte die Emissionen seit den 1980er Jahren um 31% reduzieren, während die Emissionen in aufstrebenden Volkswirtschaften gestiegen sind, sodass China seit den 2010er Jahren zu den größten Verursachern von Lachgasemissionen zählt. (Tian et al., 2024)

Die in den letzten Jahren beobachteten atmosphärischen N₂O-Konzentrationen liegen über den in allen Szenarien des Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) prognostizierten Werten, die für den 6. IPCC Assessment Report herangezogen wurden, was die Dringlichkeit zur Reduzierung anthropogener N₂O-Emissionen verdeutlicht. (Tian et al., 2024)

Neben den negativen Aspekten von Lachgas spielt die Denitrifizierung sowohl in natürlichen Ökosystemen als auch in der Abwasseraufbereitung dennoch eine wichtige Rolle, indem dadurch schädliche Nitratwerte reduziert und so unerwünschte Algenblüten reduziert werden können. (Bernhard, 2010)

2.2.4. Halogenhaltige Treibhausgase.

Halogenierte Kohlenwasserstoffe (als Sammelbegriff oft FCKW⁷), also Verbindungen aus Kohlenstoff und Elementen aus der 17 Gruppe des Periodensystems, den Halogenen,

⁷ FCKW steht für Fluorchlorkohlenwasserstoff

sind meist sehr starke Treibhausgase. Diese haben oftmals ein GWP, das um das tausend- bis zehntausendfache so stark ist, wie von CO_2 . Neben der um ein vielfach höheren Treibhauswirksamkeit zerstören Chlor- oder Bromatome die Ozonschicht in der Stratosphäre, weshalb diese Verbindungen unter den Namen der ozone depleting substances (ODS) (Ozon abbauende Substanzen) zusammengefasst wurden. Die meisten dieser ODS haben keinen natürlichen Ursprung. Seit der Einführung des Montreal Protokolls 1987 ging die Produktion und die Verwendung dieser Verbindungen signifikant zurück und die Ozonschicht kann sich seither wieder erholen. (Myhre et al., 2013) Wegen der Einschränkungen zur Verwendung und Produktion komplett halogener Kohlenwasserstoffe wurden als Ersatz teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (HCFC) beziehungsweise Flurkohlenwasserstoffe (CFC) verwendet. Durch diese Substitution stieg deren Konzentration in der Atmosphäre seither stark an. (Gulev, 2021)

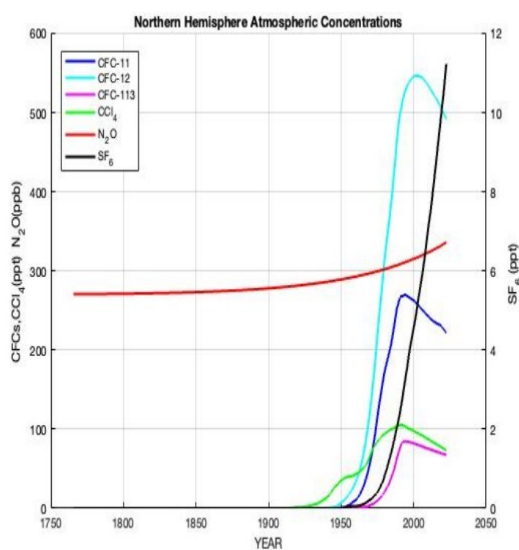


Abbildung 7: durchschnittliche jährliche Konzentration von CFC-11, CFC-12, CFC-113, Tetrachlormethan (CCl_4), Schwefelhexafluorid (SF_6) und Lachgas (N_2O) in der Atmosphäre auf der nördlichen Halbkugel. Quelle: Bullister et al. (2017).

Feuerlöschern. (Gulev, 2021)

Neben den halogenhaltigen Kohlenwasserstoffen nahm auch die Konzentration von halogenhaltigen Verbindungen wie Schwefelhexafluorid (SF_6) und Stickstofftrifluorid (NF_3) in der Atmosphäre zu. SF_6 wird als Isolationsgas in elektrischen Anlagen, oder für die Halbleiterindustrie verwendet. Obwohl bereits Alternativen für dieses sehr treibhauseffektive Gas entwickelt wurden, wird dennoch eher Schwefelhexafluorid

In Abbildung 7 kann der Rückgang von CFC-11, CFC-12, CFC-113 und Tetrachlormethan nach Inkrafttreten des Montreal Protokolls beobachtet werden. SF_6 hingegen stieg im beobachteten Zeitraum von 1750 - 2022 rasant an. (Bullister et al., 2017) Seit 2011 sind die atmosphärischen Konzentrationen der meisten FCKWs weiter gesunken. Die Hauptverwendung für diese halogenierten Verbindungen lag als Kühlmittel für Klimaanlage und Kühlschränken, zum Aufschäumen von Kunststoffen, als Lösungsmittel, als Treibgas oder als Mittel in

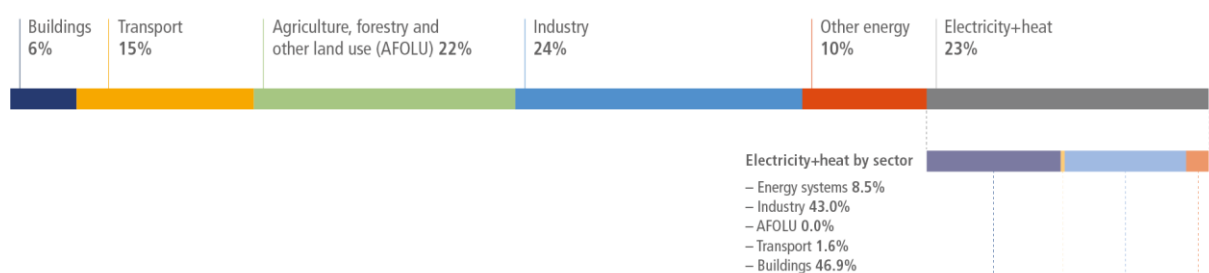
verwendet. Stickstofftrifluorid wird ähnlich wie SF₆ in der Halbleiterindustrie verwendet. Die Konzentration von NF₃ in der Atmosphäre hat sich in den Jahren 2011 – 2019 um 147% auf 2,05 ppt (parts per Trillion) gesteigert. (Gulev, 2021, S.304-305)

Insgesamt ist der effektive Strahlungsantrieb durch halogenierte Treibhausgase bis 2019 um 3,5% gestiegen, wobei dieser Anstieg vor allem durch eine Abnahme der FCKW-Konzentrationen und einen Anstieg ihrer Ersatzstoffe geprägt ist. Der Beitrag halogener Treibhausgase zum Strahlungsantrieb war im Zeitraum 2011–2019 um das Siebenfache geringer als in den 1970er und 1980er Jahren. (Gulev, 2021, S.304-305)

3. Carbon Capture

Das Übereinkommen von Paris, der Pariser Klimakonferenz 2015 zielt darauf ab, eine durchschnittliche Erwärmung der Erde auf ein Maximum von 1,5°C beziehungsweise unter 2°C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu begrenzen. Im Jahr 2019 wurden in den unterschiedlichen Sektoren insgesamt 59 Gigatonnen CO₂-Äquivalente ausgestoßen. Wobei sich die Bereiche in Gebäude, Transport, Land- und Forstwirtschaft sowie andere

Direct emissions by sector (59 GtCO₂-eq)



Direct+indirect emissions by sector (59 GtCO₂-eq)

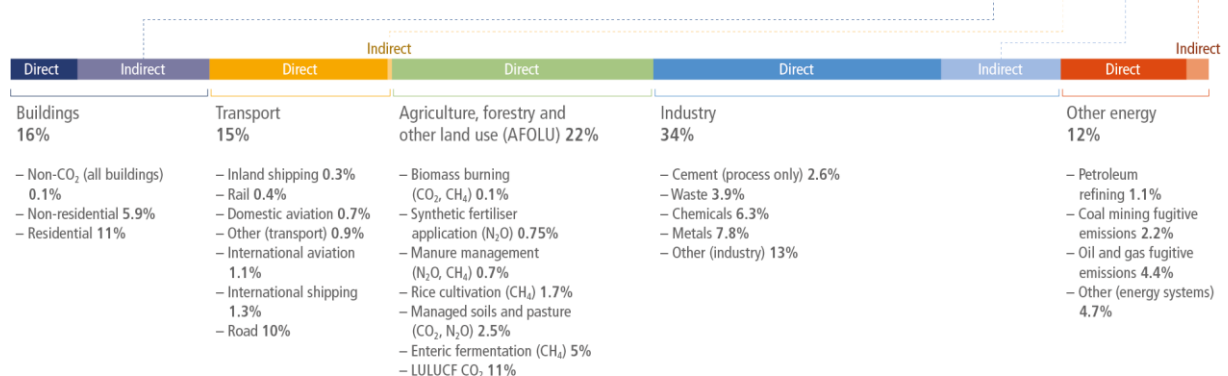


Abbildung 8: Direkte und Indirekte Emissionen in CO₂-Äquivalenten pro Sektor in Prozent für das Jahr 2019. Quelle: Parmesan et al. (2022).

Landnutzung, Industrie, Energie und Heizung und Elektrizität gliedert. Nimmt man nicht nur die direkten Emissionen, sondern rechnet auch den Heiz- und Elektrizitätsbedarf in den unterschiedlichen Sektoren ein, ergibt sich die Aufteilung wie in Grafik 8 dargestellt. (Dhakal et al., 2022)

Vor allem für sogenannte *hard to abate industries* also Bereiche wie die Stahl-, Zement- und Chemieindustrie, also Sektoren, für die es schwer ist, die CO₂-Emissionen zu senken, ist es wichtig, Wege zu finden, um die verursachten Treibhausgase „einzufangen“. Große Hoffnungen werden für diese Sektoren in Technologien wie Carbon Capture and Utilization (CCU) also die CO₂-Abscheidung und Nutzung, oder Carbon Capture and Storage (CCS), die Abscheidung von CO₂ und anschließende Lagerung, gesetzt. Also das Ziel, Technologien zu entwickeln, die zu negativen Emissionen beitragen. Diese Hoffnungen und das steigende Interesse an CCU und CCS-Technologien spiegeln sich auch in den Forschungsschwerpunkten und den Veröffentlichungen in der wissenschaftlichen Community wider. Im Jahr 2023 sind über 46.000 Veröffentlichungen und Publikationen zum Thema Carbon Capture and Utilization oder Carbon Capture and Storage veröffentlicht worden. Weshalb die nachfolgenden Unterkapitel keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit darstellen können, sondern vielmehr einen Einblick in das Forschungsfeld und das Grundkonzept zur Minimierung anthropogener Treibhausgase darlegen soll. (Fang & Hu, 2023)

3.1. Kohlenstoffkreislauf

Bevor man sich den Techniken von CCU und CCS widmen kann, muss man sich den auf der Erde zugrundeliegenden Kohlenstoffkreislauf ansehen und verstehen. CO₂-Moleküle werden im Durchschnitt alle paar Jahre zwischen der Atmosphäre und der Erdoberfläche ausgetauscht. Dieser schnelle CO₂-Kreislauf in der Atmosphäre ist mit einem langsameren Kohlenstoffkreislauf durch Landvegetation, Böden und den oberen Ozean (über Jahrzehnte bis Jahrhunderte) sowie tiefere Böden, die Tiefsee (über Jahrhunderte bis Jahrtausende) und geologische Reservoirs in der Tiefsee und dem oberen Erdmantel (über Millionen Jahre) verbunden. (Ciais et al., 2013)

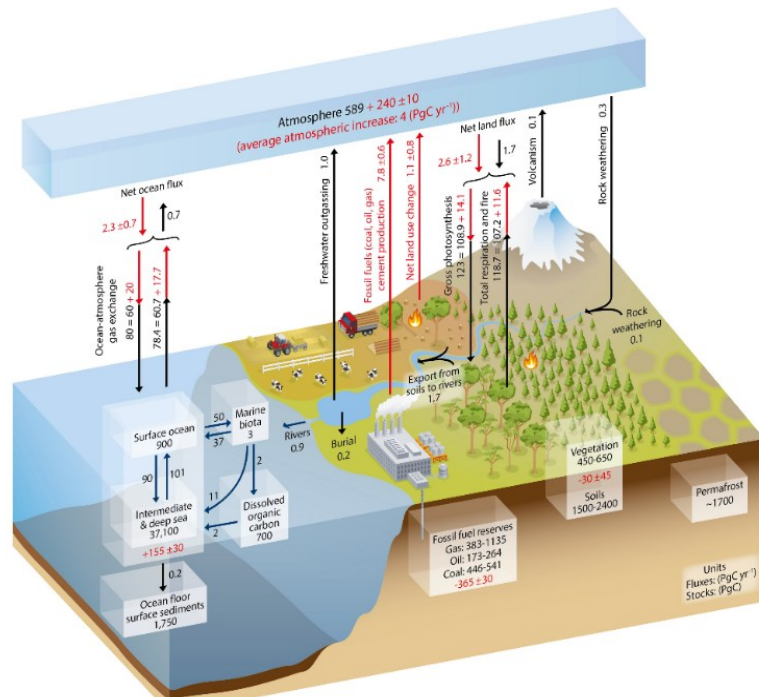


Abbildung 9: vereinfachte Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs. Zahlen und Kohlenstoffvorräte in Petagramm (Pg C). Die Pfeile zeigen die jährlichen Kohlenstoffflüsse. Schwarze Werte und Pfeile repräsentieren vorindustrielle Vorräte und Veränderungen, rote Pfeile und Zahlen den durchschnittlichen jährlichen, vom Menschen verursachten Kohlenstofffluss von 2000 bis 2009. Rote Zahlen in den Reservoirs zeigen die kumulierten anthropogenen Kohlenstoffänderungen seit Beginn der Industrialisierung. Unsicherheiten werden als 90%-Konfidenzintervalle angegeben. Quelle: Ciais et al. (2013).

In der Atmosphäre befinden sich circa 830 Pg C⁸ (Durchschnitt der Jahre 2000 – 2009). Im Vergleich zu anderen Reservoiren auf der Erde macht der atmosphärische Kohlenstoff nur einen kleinen Anteil im gesamten Erdsystem aus.

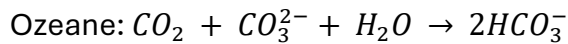
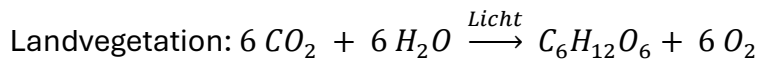
Der Rest ist in anderen Bereichen gebunden (siehe Abbildung 9). In der terrestrischen Biosphäre befinden sich nach Schätzungen des IPCC 450 bis 650 Pg C. Einen weitaus

größeren Kohlenstoffspeicher machen folgende Bereiche aus: Böden und das Erdreich mit 1.500–2.400 Pg C aus, wobei sich in den tropischen Regionen besonders hohe organische Kohlenstoffdichten finden. Arktische Permafrostböden enthalten ebenfalls große Mengen an Kohlenstoff, nämlich bis zu 1.580 Pg C in den oberen 3 Metern und zusätzlich 400 Pg C in tieferen Erdschichten. Der größte Anteil an Kohlenstoff befindet sich in Ozeanen und Sedimenten und beträgt in etwa 40.500 Pg C. (Bruhwiler et al., 2018) Die Kohlenstoffemissionen aus fossilen Brennstoffen und durch Landnutzungsänderungen erhöhen den CO₂-Gehalt in der Atmosphäre rapide. Die vollständige Entfernung des vom Menschen emittierten CO₂ aus der Atmosphäre durch natürliche Prozesse wird einige hunderttausend Jahre dauern. (ciais et al., 2013)

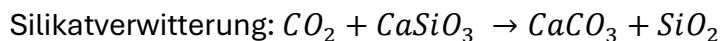
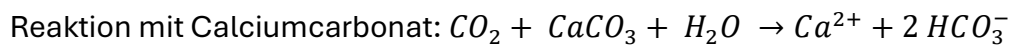
Die Fixierung des Kohlenstoffs setzt sich aus schnellen und langsamen Prozessen zusammen. In der ersten Phase, innerhalb weniger Jahrzehnte, wird etwa ein Drittel bis

⁸ Pg C = Petagramm entspricht 10¹⁵ g Kohlenstoff

die Hälfte des anfänglichen CO_2 -Ausstoßes durch Landvegetation und Ozeane aufgenommen, während der Rest in der Atmosphäre verbleibt. (ciais et al., 2013)



Innerhalb von Jahrhunderten wird das meiste anthropogene CO_2 als zusätzlich gelöstes anorganisches Carbonat⁹ im Ozean gespeichert, was den pH-Wert des Ozeans senkt. Je mehr CO_2 sich bereits in den Ozeanen gelöst hat, desto geringer ist auch die Pufferfähigkeit noch weiteres Kohlenstoffdioxid in die Ozeane aufzunehmen, weshalb mehr CO_2 in der Atmosphäre verbleibt. Nach tausend Jahren bleiben noch circa 15 bis 40% des ursprünglichen CO_2 -Ausstoßes in der Atmosphäre - abhängig von der Menge des freigesetzten Kohlenstoffs. (ciais et al., 2013)



In der zweiten Phase, die sich über mehrere tausend Jahre erstreckt, erhöht sich der pH-Wert der Meere durch die Bildung von Calciumcarbonat (CaCO_3), was die Pufferkapazität der Meere wieder regeneriert, wodurch weiteres CO_2 aus der Atmosphäre entfernt werden kann. Diese Phase reduziert den atmosphärischen CO_2 -Anteil nach etwa 10.000 Jahren wiederum auf 10 bis 25% des ursprünglichen Ausstoßes. In der dritten Phase (mehrere hunderttausend Jahre), wird das restliche CO_2 durch die Verwitterung von Silikatmineralien und magmatischen Gesteins aus der Atmosphäre entfernt, was ein sehr langsamer Prozess ist. (ciais et al., 2013)

3.2. Carbon Capture and Storage (CCS)

Die Technologien zur CO_2 -Abscheidung lassen sich in unterschiedliche Verfahren einteilen. Je nachdem aus welchen Emissionsquellen oder zu welchem Zeitpunkt das CO_2 abgeschieden werden soll, können unterschiedliche Verfahren angewendet werden. Neben der Abscheidung bildet der Transport eine zentrale Schnittstelle zwischen CO_2 -

⁹ gelöstes anorganisches Carbonat auf Englisch *dissolved inorganic carbon* umfasst Kohlensäure, Hydrogencarbonat und Carbonat.

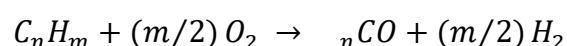
Quelle und den vorgesehenen Speicher- oder Nutzungsorten. Technisch ausgereift sind vor allem Onshore- und Offshore-Pipelines sowie CO₂-Transportschiffe. Straßen- und Schienentransport spielen lediglich eine untergeordnete Rolle. Pipelines gelten aufgrund der fehlenden Toxizität und Brennbarkeit von CO₂ als sichere und bewährte Technologie; bereits 2015 existierten weltweit über 8.000 km CO₂-Pipelines, wovon über 7.200 km in den USA im Rahmen von Enhanced Oil Recovery (EOR) betrieben wurden. In Europa lag die Länge 2013 noch bei rund 500 km. Prognosen der Internationalen Energieagentur gehen davon aus, dass der globale Bedarf bis 2030 auf etwa 100.000 km und bis 2050 auf bis zu 550.000 km ansteigen wird. (Dziejarski et al., 2023)

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für CCS sind international auch sehr unterschiedlich. Während in vielen Teilen der Erde bereits großtechnische Anlagen für CCS in Betrieb sind, ist in Österreich die geologische Speicherung von CO₂ derzeit nur für Forschungszwecke und einem Volumen von unter 100.000 t CO₂ zulässig. (BMK & Klima- und Energiefonds, 2025) Obwohl seit dem Ministerrat Nr. 90/9; am 6. März 2024 politischer Konsens darüber besteht, das generelle Verbot aufzuheben und CCS für *hard to abate industries* unter strengen Bedingungen zuzulassen, wurde bis dato die Rechtslage nicht geändert. (Bundesministerium für Finanzen & Bundesministerium für Klimaschutz, 2024)

Nachfolgend sollen vier unterschiedliche Möglichkeiten für CCS dargestellt werden.

3.2.1. Pre-Combustion-Abscheidung

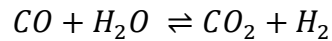
Bei der Pre-Combustion-Abscheidung wird das CO₂ bereits vor der eigentlichen Verbrennung fossiler Brennstoffe entfernt. Kohlenstoffhaltige Energieträger wie Kohle oder Erdgas werden dabei in einem mehrstufigen Prozess chemisch umgesetzt, sodass ein Gasgemisch aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid entsteht. (Ekemezie & Digitemie, 2024) Zunächst erfolgt die Vergasung des Brennstoffs, bei der er einer Teiloxidation unterzogen wird:



In einem zweiten Schritt, der Dampfreformierung, reagiert der Brennstoff mit Wasserdampf zu Kohlenmonoxid und weiterem Wasserstoff:



Anschließend wird in der nachgeschalteten Wassergas-Shift-Reaktion das Kohlenmonoxid in Kohlendioxid umgewandelt, wodurch ein Gasstrom mit hohem Anteil an CO₂ und Wasserstoff resultiert:



Das so aufbereitete Gasgemisch weist einen CO₂-Gehalt von etwa 15–50% auf. Das Kohlendioxid wird anschließend abgetrennt und gespeichert, während der wasserstoffreiche Reststrom als emissionsarmer Brennstoff weiterverwendet werden kann, beispielsweise in integrierten Gas- und Dampfkraftwerken (IGCC) oder in der Wasserstoffproduktion. (Hanson et al., 2024)

Die Pre-Combustion-Abscheidung ist eine technisch ausgereifte Technologie, die seit über 95 Jahren in der Industrie Anwendung findet (Dziejarski et al., 2023) und eine hohe CO₂-Abscheiderate von rund 92–93% erreicht. (Hanson et al., 2024) Aufgrund der hohen CO₂-Konzentration und des damit verbundenen hohen Partialdrucks ist der Energiebedarf für Abscheidung und Kompression deutlich geringer als bei der Post-Combustion-Abscheidung. (Hanson et al., 2024) Die Investitions- und Betriebskosten fallen in der Regel niedriger aus, da kleinere Anlagendimensionen erforderlich sind und kostengünstige physikalische Lösungsmittel genutzt werden können, die sich mit geringem Energieaufwand regenerieren lassen. (Dziejarski et al., 2023) Studien zufolge kann die Pre-Combustion-Abscheidung um bis zu 38–45% günstiger sein als die Post-Combustion-Technologie und um 21–24% günstiger als das Oxyfuel-Verfahren. (Dziejarski et al., 2023) Darüber hinaus bietet sie eine hohe Flexibilität, da sich der Betrieb leicht zwischen Wasserstoffproduktion und Stromerzeugung umstellen lässt. (Ekemezie & Digitemie, 2024) Das erzeugte Synthesegas kann direkt als Brennstoff in Turbinen eingesetzt werden, während aufgereinigter Wasserstoff unter anderem in Brennstoffzellen, im Transportsektor oder als Ausgangsstoff in der chemischen Industrie Verwendung findet. (Hanson et al., 2024) Auch der Wasserverbrauch ist im Vergleich zur Post-Combustion-Technologie geringer. (Dziejarski et al., 2023)

Trotz dieser Vorteile bestehen erhebliche technische und wirtschaftliche Herausforderungen. Die Energieverluste sind höher als bei der Post-Combustion-Abscheidung, da sowohl die Reformierung beziehungsweise Vergasung der Brennstoffe

als auch die Luftzerlegung zusätzlichen Energieaufwand erfordern. (Hanson et al., 2024) Die Notwendigkeit einer vorgeschalteten chemischen Anlage vor der Turbine erhöht die Komplexität und Kosten erheblich, insbesondere bei der Nachrüstung bestehender Anlagen. (Dziejarski et al., 2023) Der Betrieb unter hohem Druck bringt zusätzliche technische Anforderungen und Sicherheitsmaßnahmen mit sich und die komplexen Prozessschritte erhöhen die Anfälligkeit für Betriebsunterbrechungen. (Hanson et al., 2024) Werden nicht-gasförmige Einsatzstoffe verwendet, ist zudem eine aufwendige Gasreinigung erforderlich, um Schadstoffe wie NO_x zu entfernen. (Dziejarski et al., 2023) Die Vergasungsstufe selbst weist weiterhin Optimierungspotenzial auf, ebenso wie die Wärmeübertragung, die durch den hohen Wasserstoffgehalt des Prozessgases erschwert wird. (Hanson et al., 2024) Für die CO_2 -Abscheidung muss das Rauchgas zusätzlich gekühlt werden, was weitere Effizienzverluste verursacht. (Dziejarski et al., 2023) Der Betrieb erfordert darüber hinaus umfangreiche unterstützende Systeme wie Luftzerlegungsanlagen und auch in der Wassergas-Shift-Stufe kommt es zu Wirkungsgradverlusten. (Hanson et al., 2024) Wird ein Absorptionsverfahren eingesetzt, muss die Regenerationstemperatur des Lösungsmittels niedrig gehalten werden, um eine Verschlechterung seiner Qualität zu vermeiden. Hierfür bieten ionische Flüssigkeiten aufgrund ihrer geringen Flüchtigkeit einen vielversprechenden Ansatz. (Dziejarski et al., 2023)

3.2.2. Post-Combustion-Abscheidung

Bei der Post-Combustion-Abscheidung wird Kohlendioxid aus den Abgasen fossiler Brennstoffe entfernt, nachdem die Verbrennung bereits stattgefunden hat. Das Verfahren eignet sich besonders für die Nachrüstung bestehender Kraftwerke, kann aber auch in neuen Anlagen eingesetzt werden. (Hanson et al., 2024) Vor der eigentlichen CO_2 -Abscheidung wird das Rauchgas in mehreren Schritten vorbehandelt. Dazu zählen Denitrifikation, Entschwefelung, Staubabscheidung sowie eine Abkühlung, um die Stabilität der verwendeten Lösungsmittel zu gewährleisten. (García et al., 2022) Das so gereinigte Gasgemisch, bestehend aus CO_2 , H_2O und N_2 , strömt im Gegenstrom durch eine Absorptionssäule und kommt dort mit einem Lösungsmittel wie Monoethanolamin (MEA) in Kontakt. MEA reagiert mit CO_2 über einen Zwitterionen-Zwischenschritt zu

Carbamat, das durch Hydratation zu Hydrogencarbonat- (HCO_3^-) und Carbonationen (CO_3^{2-}) umgesetzt wird. Die Freisetzung des CO_2 und die Regeneration des Lösungsmittels erfolgen anschließend durch thermische Zersetzung des Carbamats. (Lv et al., 2015) Neben der Absorption durch flüssige Lösungsmittel kommen auch Adsorption an Feststoffen, Membrantrennverfahren mit Molekularsieben oder kryogene Verfahren als effektive CO_2 -Abscheidetechnologien zum Einsatz. (García et al., 2022) Da der CO_2 -Gehalt im Abgas mit 10–15% relativ niedrig ist, erfordert das Verfahren einen entsprechend hohen Energie- und Lösungsmittelbedarf. (Hanson et al., 2024)

Die Post-Combustion-Abscheidung gilt als etablierte und gut erforschte Technologie, die sich vergleichsweise einfach in bestehende Anlagen integrieren lässt. (Hanson et al., 2024) Weltweit wird an der Weiterentwicklung von Sorbentien¹⁰ und Abscheidungsapparaturen gearbeitet, um Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit zu erhöhen. Im Vergleich zur Pre-Combustion-Abscheidung weist sie eine höhere thermische Effizienz bei der Umwandlung von Brennstoff in elektrische Energie auf. Die erzielbaren CO_2 -Abscheideraten sind hoch und liegen bei Adsorptionsverfahren typischerweise zwischen 80 und 95%, bei Absorptionsverfahren sogar zwischen 90 und 98%. (Dziejarski et al., 2023) Ein zusätzlicher Vorteil ist die gleichzeitige Abscheidung weiterer Schadstoffe wie Stickoxide (NO_x) und Schwefeloxide (SO_x), was zu einer besseren Umweltbilanz führt. (García et al., 2022) Zudem lässt sich durch hybride Verfahren, beispielsweise die Kombination von Membrantrennung und Druckwechseladsorption, die Effizienz weiter steigern. Zukünftige Verbesserungen bei Staubkohlefeuerungen könnten die CO_2 -Emissionen weiter senken und die Produktivität erhöhen. (Dziejarski et al., 2023)

Gleichzeitig bestehen jedoch erhebliche technische und wirtschaftliche Herausforderungen. Der niedrige CO_2 -Gehalt im Rauchgas bei Umgebungsdruck bedeutet, dass große Gasvolumina bewegt werden müssen, was große Apparateabmessungen und hohe Investitionskosten zur Folge hat. (Hanson et al., 2024) Der geringe CO_2 -Partialdruck in Verbindung mit den hohen Abgastemperaturen erschwert zudem die Anlagenauslegung. (García et al., 2022) Für die Abscheidung werden leistungsstarke chemische Lösungsmittel benötigt, deren Regeneration viel

¹⁰ Sorbentien sind Stoffe, die Flüssigkeiten aufnehmen können.

Energie erfordert. (Hanson et al., 2024) Aminbasierte Verfahren können den Netto-Stromertrag um bis zu 30% senken und den Gesamtwirkungsgrad um rund 11% verringern. Hinzu kommen Korrosionsprobleme, hoher Energieaufwand bei der Lösungsmittelregeneration sowie chemische Zersetzungsprozesse, die zu Lösungsmittelverlusten führen. Besonders Verfahren mit MEA sind kostenintensiv und wurden in der Vergangenheit teilweise eingestellt. (Dziejarski et al., 2023)

Auch wirtschaftlich ist die Technologie anspruchsvoll. Zusätzliche Stromgestehungskosten liegen bei Neubauten um 60–70% und bei Nachrüstungen um 220–250% höher. (Dziejarski et al., 2023) Adsorptionsverfahren reagieren empfindlich auf Verunreinigungen wie NO_x , SO_x und hohe Druckverluste in der Trennstufe mindern die Effizienz. (Hanson et al., 2024) Für hohe Abscheideraten werden große Umwälzvolumina an Sorbentien sowie erhebliche Wassermengen benötigt. Bei Absorptionsverfahren verringert zudem die Dampfabnahme für die Lösungsmittelregeneration den Dampfstrom zur Niederdruckturbine, was die Effizienz und Leistung der Anlage weiter reduziert. (Dziejarski et al., 2023)

3.2.3. Oxyfuel-Verfahren

Beim Oxyfuel-Verfahren wird anstelle von Luft reiner Sauerstoff für die Verbrennung fossiler Brennstoffe eingesetzt. (Talei et al., 2024) Durch den Einsatz von hochreinem Sauerstoff steigen die Verbrennungstemperaturen deutlich an, was neben einer effizienteren Brennstoffnutzung auch zu einer sauberen Abgaszusammensetzung führt. (Raho et al., 2024) Die Verbrennungsprodukte bestehen im Wesentlichen nur aus Kohlendioxid und Wasserdampf. Ein Teil des abgeschiedenen CO_2 wird zur Steuerung des Verbrennungsprozesses zurück in die Brennkammer geleitet, während der restliche Anteil mithilfe von Absorptionsmitteln wie Monoethanolamin (MEA) aus dem Abgas entfernt wird. MEA eignet sich aufgrund seiner hohen Bindekapazität – bis zu 45% seines Eigengewichts – besonders gut für die CO_2 -Abscheidung. (Talei et al., 2024) Durch den hohen CO_2 -Gehalt im Abgas lässt sich nahezu eine vollständige Abscheidung erzielen und dies bei geringerem Energieaufwand im Vergleich zur Post-Combustion-Abscheidung. Zudem ist der Bedarf an Absorptionsmitteln geringer und es entstehen keine NO_x -Emissionen. (Talei et al., 2024) Trotz des Energieaufwands für die Erzeugung

von reinem Sauerstoff kann im Vergleich zu konventioneller Post-Combustion-Technologie eine Energieeinsparung von bis zu 81,42% erreicht werden. (Raho et al., 2024) Die hohe Abgasreinheit reduziert den Bedarf an aufwendigen Reinigungsschritten, sodass auch spezialisierte Absorptionsmittel wie ionische Flüssigkeiten oder aminbasierte Lösungsmittel eingesetzt werden können. (Raho et al., 2024)

Das Oxyfuel-Verfahren kann sowohl in bestehenden als auch in neu errichteten Kraftwerken implementiert werden und erreicht in der Regel CO₂-Abscheideraten von 90–98%. Ein weiterer Vorteil liegt in der breiten Brennstoffflexibilität: Neben fossilen Energieträgern können auch Biomasse oder kommunale Abfälle eingesetzt werden. In Kombination mit Bioenergie (Bioenergy with Carbon Capture and Storage = BECCS) sind so sogar negative CO₂-Emissionen möglich. Modifikationen am Verfahren zielen darauf ab, ökonomische und energetische Verluste zu minimieren, während gleichzeitig hocheffiziente Dampfkraftzyklen ermöglicht werden. (Dziejarski et al., 2023) Der Verzicht auf Luft als Verbrennungsgas reduziert die Stickoxidbildung erheblich. NO_x-Emissionen können so um 60–70% im Vergleich zur Luftverbrennung gesenkt werden. (Talei et al., 2024) Der hohe CO₂-Gehalt im Rauchgas (70–95%) verringert das zu behandelnde Gasvolumen und reduziert dadurch den Energie- und Kostenaufwand für die Abscheidung. Wird das Verfahren bei erhöhtem Druck betrieben, sinkt zudem der Energiebedarf für die CO₂-Kompression. Da keine komplexen chemischen Vor-Ort-Prozesse erforderlich sind, lässt sich das System relativ einfach in bestehende Kraftwerksstrukturen integrieren. (Dziejarski et al., 2023)

Den Vorteilen stehen jedoch deutliche technische und wirtschaftliche Herausforderungen gegenüber. Die Verbrennung in reinem Sauerstoff erzeugt sehr hohe Flammentemperaturen, die den Einsatz spezialisierter und hitzebeständiger Materialien erforderlich machen. (Dziejarski et al., 2023) Ein wesentlicher Kostentreiber ist der hohe Sauerstoffbedarf, der im Vergleich zur Pre-Combustion-Abscheidung deutlich höher liegt. Die Gewinnung von Sauerstoff in Luftzerlegungsanlagen, meist mittels kryogener Destillation, ist kosten- und energieintensiv und wirkt sich erheblich auf den Gesamtwirkungsgrad aus. (Raho et al., 2024) Die Entwicklung alternativer Luftzerlegungstechnologien könnte die Wirtschaftlichkeit verbessern, ebenso wie eine Reduktion der Kosten für die Rauchgasrezirkulation. Der großtechnische Einsatz des Oxyfuel-Verfahrens ist bislang jedoch nicht realisiert, sodass praktische Erfahrungen

fehlen. Schließlich besteht wie bei allen CCS-Technologien das Risiko von CO₂-Leckagen, das bei der Planung der langfristigen Speicherung berücksichtigt werden muss. (Dziejarski et al., 2023)

3.2.4. Carbon Dioxide Removal (CDR)

Zur Entfernung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre stehen sowohl naturbasierte als auch technologische Ansätze zur Verfügung. Zu den naturbasierten Methoden zählen *Afforestation and Reforestation* (AR), bei denen CO₂ langfristig in der Biomasse von Wäldern und in Böden gespeichert wird, sowie die Bodenkohlenstoffspeicherung (*Soil Carbon Sequestration*, SCS) durch humusaufbauende Bewirtschaftungsmethoden. Auch Biokohle (*Biochar*, BC), die durch Pyrolyse aus Biomasse gewonnen wird, kann in Böden eingelagert und dort über Jahrhunderte stabil gebunden werden. (Bui et al., 2022) Diese naturbasierten Maßnahmen werden ergänzt durch technologische Verfahren, die unabhängig von biologischen Prozessen CO₂ aus der Atmosphäre entfernen. Hierzu zählt *Bioenergy with Carbon Capture and Storage* (BECCS), bei dem CO₂ aus der Verbrennung von Biomasse abgeschieden und geologisch gespeichert wird. Weitere Optionen sind die beschleunigte Verwitterung und Ozean-Alkalisierung (*Enhanced Weathering*, EW), die CO₂ chemisch binden und gleichzeitig der Ozeanversauerung entgegenwirken, sowie die Ozeandüngung (*Ocean Fertilisation*, OF), bei der Nährstoffe das Wachstum CO₂-bindender Phytoplanktonpopulationen fördern. Eine weitere technologische Möglichkeit stellt *Direct Air Carbon Capture and Storage* (DACCS) dar, bei der CO₂ direkt aus der Umgebungsluft abgeschieden und anschließend gespeichert wird. Auf letztere Technologie wird im Folgenden näher eingegangen (Bui et al., 2022). Dadurch, dass DAC das Kohlendioxid aus der Umgebungsluft entnimmt, ist diese Technik unabhängig von großen punktuellen Emissionsquellen und kann CO₂ aus zahlreichen kleineren und diffusen Quellen wie Verkehr, Luftfahrt oder Gebäuden abscheiden. Zusätzlich lassen sich mit dieser Technologie auch historische Emissionen aus der Atmosphäre entfernen, was sie zu einem potenziell wichtigen Werkzeug zur Erreichung der Pariser Klimaziele macht. Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre liegt jedoch nur bei etwa 400 ppm, was die thermodynamische Effizienz stark einschränkt und sowohl hohe Anforderungen an Adsorptionsmaterialien als auch einen erheblichen Energieaufwand mit sich bringt. Der

aktuelle Forschungsstand zeigt Fortschritte bei der Entwicklung hocheffizienter chemischer Sorbentien, insbesondere organischer Amine auf porösen Trägermaterialien sowie Metall-organischer Gerüststrukturen (MOFs). 2021 wurde in Island die bislang größte DAC-Anlage zur CO₂-Speicherung errichtet. Dort wird CO₂ aus der Luft gefiltert und anschließend in 700 Metern Tiefe in Basaltformationen verpresst, wo es zu stabilen Carbonaten mineralisiert und so potenziell über mehr als 10.000 Jahre gebunden werden kann. (Zhang et al., 2022)

Zu den wesentlichen Vorteilen von DAC zählt die Standortunabhängigkeit: Die Technologie kann prinzipiell überall installiert werden, idealerweise jedoch in räumlicher Nähe zu einer geeigneten Energiequelle und einem CO₂-Speicherstandort. (Bui et al., 2022) Dies eröffnet die Möglichkeit, CO₂ auch aus emissionsintensiven, aber geographisch abgelegenen Anlagen abzuscheiden, ohne dass eine umfangreiche Transportinfrastruktur erforderlich ist. DAC-Anlagen können zudem direkt neben erneuerbaren Energieerzeugern betrieben werden, um Übertragungsverluste zu minimieren, oder in unmittelbarer Nähe zu Speicherstätten errichtet werden, um Transportkosten und -emissionen zu senken. Im Vergleich zu Negativemissionstechnologien wie Aufforstung oder Bioenergie mit CO₂-Abscheidung (BECCS) benötigt DAC deutlich weniger Landfläche und kann in Regionen eingesetzt werden, die sich nicht für land- oder forstwirtschaftliche Nutzung eignen. Die modulare Bauweise ermöglicht eine schrittweise Skalierung, niedrigere Markteintrittsbarrieren und geringere politische Risiken. In Kombination mit dauerhafter geologischer Speicherung kann DAC somit CO₂ langfristig und verlässlich aus der Atmosphäre entfernen und dabei auch Emissionen aus schwer oder nur sehr teuer zu dekarbonisierenden Sektoren ausgleichen. (Meckling & Biber, 2021)

Trotz dieser Vorteile steht DAC noch vor erheblichen Herausforderungen. Die Kosten liegen aktuell zwischen 100 und 1000 US-Dollar pro abgeschiedener Tonne CO₂, womit die Technologie im Vergleich zu anderen Maßnahmen zur Emissionsminderung sehr teuer ist. Der Markt für das abgeschiedene CO₂, ist bislang begrenzt und konzentriert sich vor allem auf die Nutzung für Enhanced Oil Recovery (EOR), die jedoch weder in großem Maßstab nachhaltig noch als langfristige Klimaschutzmaßnahme tragfähig ist. Die Technologie erfordert häufig aufwendige Infrastruktur, einschließlich einer sicheren Anbindung an Energie- und gegebenenfalls Wasserquellen sowie an geologische

Speicherstätten. Zudem ist der Energiebedarf hoch, was sowohl die Betriebskosten als auch die Klimabilanz beeinflusst, insbesondere wenn keine erneuerbaren Energien verwendet werden. Die wirtschaftliche Etablierung von DAC hängt daher in besonderem Maße von politischer Unterstützung in Form von finanziellen Anreizen, Förderprogrammen und regulatorischen Rahmenbedingungen ab. (Meckling & Biber, 2021)

3.3. Anwendungsbeispiele von Carbon Capture and Storage (CCS)

CO₂ kann entweder physikalisch in geeigneten geologischen Formationen wie tiefen salzhaltigen Aquiferen (4) oder erschöpften Erdöl- und Erdgaslagerstätten (1&2) gespeichert werden (Abbildung 10). (Thiedemann & Wark, 2025) Salzhaltige Aquifere sind tief liegende, salzwassergefüllte Gesteinsformationen, deren Porenräume mit hochsalinen Flüssigkeiten gefüllt sind. Sie befinden sich typischerweise in 800–3000 m Tiefe, deutlich unterhalb trinkwasserführender Schichten und gelten aufgrund ihrer weiten Verbreitung, hohen Speicherkapazität und gut verstandenen geologischen Eigenschaften als eine der vielversprechendsten Optionen für die langfristige CO₂-Speicherung. Nach der Injektion reagiert das CO₂ mit umgebendem Gestein und

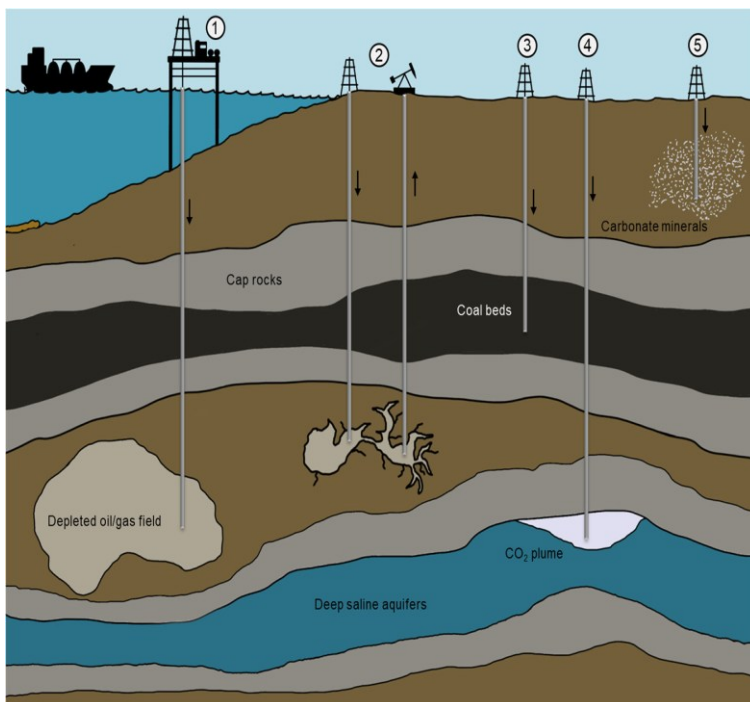


Abbildung 10: vereinfachte Darstellung für unterschiedliche CCS-Möglichkeiten: 1 erschöpftes Erdöl-/Gasfeld, 2 Enhanced Oil Recovery (EOR), 3 Kohleflöze, 4 tiefe salzhaltige Aquifere, 5 Carbonatgestein. Quelle: Thiedemann & Wark (2025).

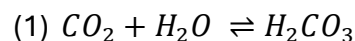
Formationswasser zu stabilen Mineralen, wodurch die Speicherstabilität zusätzlich gesichert wird.

Undurchlässige Deckschichten (Caprocks) verhindern zudem eine Migration in höhere Schichten. (Hanson et al., 2024)

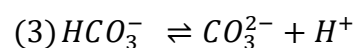
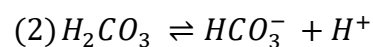
Erste großtechnische Projekte begannen in den 1990er-Jahren, darunter die Injektion von CO₂ und H₂S in Aquifere in Alberta (Kanada) und das

Sleipner-Gasfeld in der Nordsee, das seit 1996 rund 20 Mt CO₂ gespeichert hat. (Thiedemann & Wark, 2025)

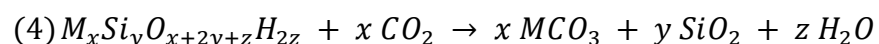
Erschöpfte Erdöl- und Gaslagerstätten stellen ebenfalls attraktive Speicheroptionen dar. Sie verfügen über umfangreiche geologische Erkundungsdaten (u. a. zu Porosität, Permeabilität und Deckschichten) und haben ihre Abdichtungseigenschaften durch die Speicherung von Kohlenwasserstoffen über Millionen Jahre hinweg nachgewiesen. Bestehende Infrastruktur wie Bohrungen, Pipelines und Anlagen kann für die CO₂-Injektion genutzt werden, was Kosten und Umrüstzeiten reduziert. Zudem kann die CO₂-Injektion als Enhanced Oil Recovery (EOR) zur Mobilisierung von Restöl wirtschaftliche Zusatznutzen bringen. (Hanson et al., 2024) Ebenfalls ist eine chemische Bindung durch Injektion in mineralische Formationen (5) möglich, wobei das CO₂ zu stabilen Carbonaten mineralisiert wird. Für die Bildung stabiler Carbonate mit Kohlensäure eignen sich vor allem Gesteine mit einem hohen Gehalt an Calcium-, Magnesium- oder Eisensilikaten (zum Beispiel Basalt). Basalt kommt weltweit häufig vor und bedeckt große Teile des Ozeanbodens und des Festlands. Bei der direkten Carbonatisierung reagiert das CO₂ entweder gasförmig oder – über den Wasserweg – als Kohlensäure mit den Mineralen, wodurch deren Auflösung und die Carbonatbildung gefördert werden. Das CO₂ löst sich zuerst in der Salzwasserlösung und bildet Kohlensäure.



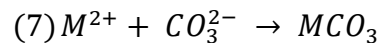
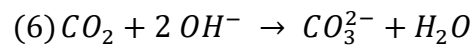
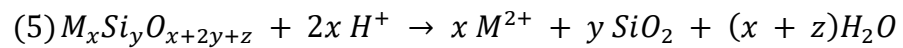
Anschließend zersetzt sich die Kohlensäure mit der Zeit zu Hydrogencarbonat und Carbonat. (Thiedemann & Wark, 2025)



Allgemeine Reaktionsgleichung für die Carbonatisierung von Metallsilikaten mit CO₂ (4)



Neben der direkten Carbonatisierung (Reaktionsgleichungen 1-3) kann diese auch über einen zweistufigen Prozess (5-7) ablaufen: Zunächst werden die Minerale durch die Kohlensäure gelöst, anschließend werden die freigesetzten Metallionen unter alkalischen Bedingungen mit CO₂ zu Carbonaten umgesetzt.



Diese Methode erzielt meist höhere Umwandlungsraten als der direkte Prozess. (Thiedemann & Wark, 2025)

Neben den oben genannten Methoden, können für die Speicherung auch Kohleflöze (Abbildung 10, 4) oder Gashydratlager in Betracht gezogen werden. (Thiedemann & Wark, 2025)

Im Jahr 2024 verzeichnete die Entwicklung von CCS-Anlagen ein deutliches Wachstum. Derzeit sind 50 Anlagen in Betrieb. Bis Juli 2024 befanden sich 44 im Bau und 588 weitere Carbon-Capture and Storage-Anlagen in Planung, was einem Anstieg von 60% gegenüber dem Vorjahr entspricht. Zusammengerechnet würden alle Anlagen ein Einsparvolumen von 416 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr (Mtpa CO₂) aufbringen. (Global CCS Institute, 2024) Ein Beispiel für die Post-Combustion-Abscheidung ist das Boundary Dam Kraftwerk in Kanada. Bei dem Kraftwerk handelt es sich um die weltweit erste integrierte und dauerhaft betriebene Anlage zur CO₂-Abscheidung in einem Kohlekraftwerk. Bei einer Leistung von 120 Megawatt werden jährlich etwa eine Million Tonnen CO₂ abgeschieden. Das abgeschiedene CO₂ wird entweder in unterirdischen Aquiferen gespeichert oder für die tertiäre Erdölgewinnung (EOR) verwendet. (Thiedemann & Wark, 2025) Durch hohe Investitionskosten und technologische Herausforderungen ist das Oxyfuel-Verfahren im Gegensatz zu Post-Combustion-Abscheidungssystemen noch nicht über den Pilotprojektstatus hinweggekommen. Raho et al. (2024) konnten jedoch zeigen, dass Oxyfuel reif für den industriellen Einsatz ist, sich aber erst dann breit durchsetzen wird, wenn die Kosten für die Sauerstofferzeugung sinken, stabile politische Rahmenbedingungen bestehen und erfolgreiche Großprojekte die Praxistauglichkeit belegen.

Das weltweit derzeit größte, sich in Verwendung befindliche Carbon Capture and Storage beziehungsweise Carbon Capture and Utilization Projekt, befindet sich in Brasilien. Die Firma Petrobras betreibt vor der Küste Brasiliens 22 Offshore Plattformen für die Erdölgewinnung. Während der Förderung des Erdöls und Erdgases wird CO₂ frei, welches abgeschieden und anschließend für EOR verwendet wird. Das CO₂ wird über Pipelines

wieder in die Erdöl- oder Erdgaslagerstätte gepumpt, um so den Druck zu erhöhen und mehr Erdöl oder Erdgas zu fördern. Beim Petrobras Santos Basin Pre-Salt Oil Field werden jährlich 10,6 Mtpa CO₂ eingespart. (Global CCS Institute, 2024) Nach eigenen Angaben hat Petrobras 2024 sogar 14,2 Millionen Tonnen CO₂ in das Pre-Salt Santos Basin gepumpt. (Valve World Americas Publisher, 2025) Wenn man das mit den Daten des Global CCS-Institutes vergleicht, würde das bedeuten, dass Petrobras für 28% aller CCUS-Kapazitäten verantwortlich war. (Global CCS Institute, 2024)

Das globale Speicherkapazitätspotenzial wird auf 675–900 Gt CO₂ geschätzt, wobei die Kosten je nach Standort und Tiefe variieren. In Europa liegen sie für Onshore-Lagerstätten in 1–3 km Tiefe zwischen 1,49 und 4,86 USD/t CO₂, für Offshore-Lagerstätten zwischen 4,86 und 10,41 USD/t CO₂. Beispiele aus dem Permian Basin (USA) zeigen vergleichbare Kostenspannen. (Hanson et al., 2024)

3.4. Carbon Capture and Utilization (CCU)

Carbon Capture and Utilization (CCU) bezeichnet Verfahren, bei denen Kohlendioxid aus industriellen Abgasströmen oder punktuellen Emissionsquellen abgeschieden und stofflich genutzt wird. Im Gegensatz zu Carbon Capture and Storage (CCS) erfolgt hierbei keine dauerhafte geologische Speicherung, sondern eine Umwandlung des abgeschiedenen CO₂ in Chemikalien, Energieträger oder Werkstoffe. Die globale CO₂-Nutzung lag im Jahr 2000 bei etwa 150 Mio. t pro Jahr, stieg bis 2015 auf rund 230 Mio. t und wird bis 2025 auf etwa 272 Mio. t prognostiziert. Die größten Abnehmerbranchen sind die Düngemittelindustrie, vor allem für die Harnstoffproduktion, der Ölsektor im Rahmen von Enhanced Oil Recovery (EOR) sowie die Lebensmittel- und Getränkeindustrie. (Dziejarski et al., 2023)

Aufgrund der hohen thermodynamischen Stabilität von CO₂, dessen Gibbs'sche freie Bildungsenthalpie der C–O-Bindung bei –394 kJ mol⁻¹ liegt, erfordert seine Aktivierung erhebliche Energiemengen sowie den Einsatz hochwirksamer Katalysatoren. Zu den wichtigsten Umwandlungswegen zählen elektro-, thermo- und photokatalytische Verfahren, die je nach Katalysator gezielt Kohlenmonoxid, Methan, Methanol oder höhere Kohlenwasserstoffe erzeugen können. Neben Energieträgern umfasst das Spektrum der

CO₂-basierten Produkte auch Harnstoff, Ameisensäure, Polyurethane, Polycarbonate sowie Syngas als Schlüsselzwischenprodukt für die chemische Industrie. (Hanson et al.,

2024)

Die nachfolgenden Beispiele zeigen die Bandbreite potenzieller CO₂-Nutzungswege. Neben der Herstellung chemischer Grundstoffe können auch Polymere oder Baustoffe hergestellt werden. Der technologische Reifegrad dieser Verfahren variiert jedoch erheblich. Abbildung 11 gibt einen Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand unterschiedlicher CCU-Methoden anhand des Technology Readiness Levels (TRL) wieder.

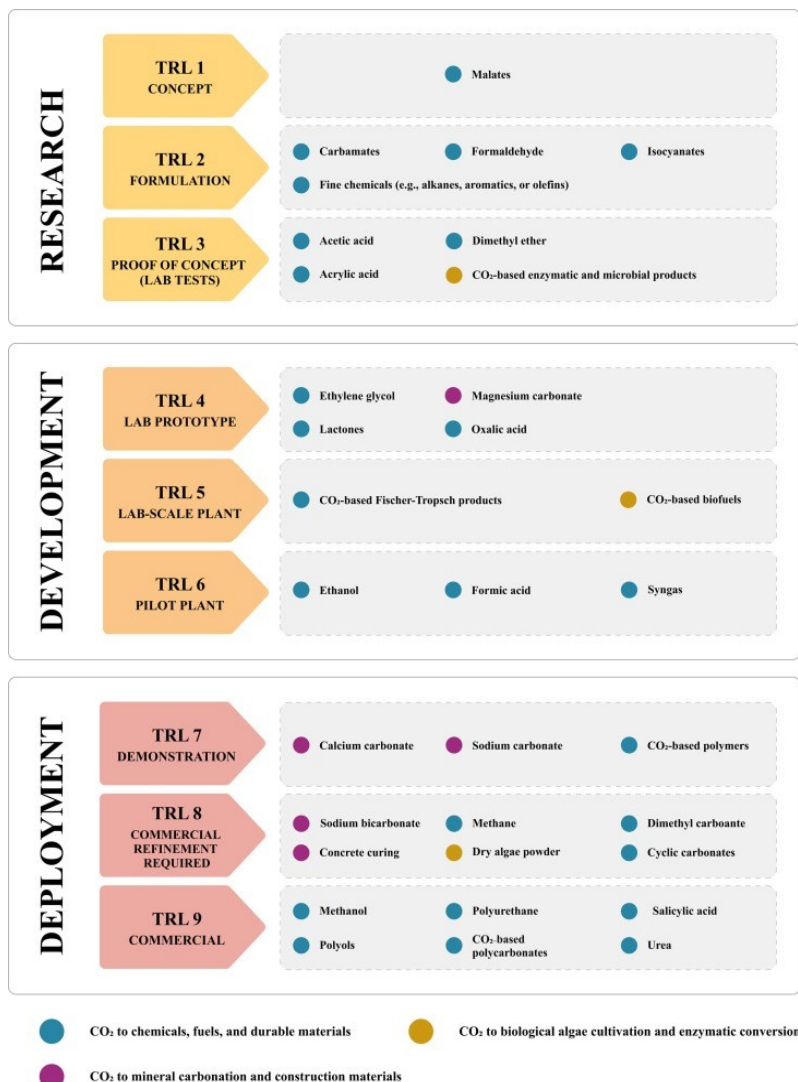


Abbildung 11: Status unterschiedlicher CCU-Methoden. Quelle: Dziejarski et al. (2023).

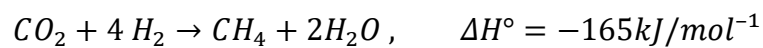
3.4.1. Ameisensäure

Ameisensäure (HCOOH) kann durch elektrochemische Reduktion von CO₂ hergestellt werden, ein Verfahren, das derzeit einen Technologiereifegrad (TRL) von 6 aufweist – also Pilotanlagenstatus. Die weltweite Produktionsmenge beträgt rund 1 Mio. t pro Jahr, wobei die meisten Mengen bislang aus fossilen Rohstoffen über die Hydrolyse von Methylformiat gewonnen werden. CO₂-basierte Verfahren zeichnen sich durch milde Betriebsbedingungen, hohe Prozesswirkungsgrade von bis zu 100% und Elektrolyseure mit einer Lebensdauer von bis zu 25 Jahren aus. (Chauvy & De Weireld, 2020)

Ökobilanzstudien zeigen aber eine große Spannbreite beim CO₂-Fußabdruck, abhängig von der verwendeten Energiequelle. Im Vergleich zur konventionellen Produktion können fossile Rohstoffeinsparungen von bis zu 60% erreicht werden. Entscheidend für die Klimabilanz ist jedoch die Integration erneuerbarer Energien, da nur bei einem dekarbonisierten Stromsystem eine deutliche Emissionsminderung erzielt wird. (Chauvy & De Weireld, 2020)

3.4.2. Methan (Synthetic Natural Gas, SNG)

Methan wird durch die Sabatier-Reaktion aus CO₂ und Wasserstoff synthetisiert:



Die Reaktion ist stark exotherm und erfordert Wärmerückgewinnung für eine effiziente Prozessführung. Sie bildet die Grundlage des Power-to-Gas-Konzepts. Die Wirtschaftlichkeit hängt maßgeblich von den Kosten für grünen Wasserstoff ab, die derzeit die Produktionskosten dominieren. Mit 70–160 €/MWh liegt der Preis für synthetisches Erdgas derzeit noch zwei- bis siebenmal höher als für fossiles Erdgas. (Chauvy & De Weireld, 2020)

Ökobilanzanalysen zeigen jedoch, dass bei Einsatz erneuerbarer Energiequellen deutliche Vorteile entstehen, mit einem CO₂-Fußabdruck von 0,02 bis 1,08 t CO₂-eq pro MWh. Damit stellt die CO₂-Methanisierung eine vielversprechende Option zur Emissionsminderung und Energiespeicherung dar, wenngleich die großskalige Kommerzialisierung aufgrund hoher Kosten und technischer Hürden noch nicht erreicht ist. (Chauvy & De Weireld, 2020)

3.4.3. Methanol

Mit einer globalen Jahresproduktion von rund 70 Mio. t ist Methanol sowohl eine zentrale Plattformchemikalie als auch ein potenzieller Energieträger. Es dient als Ausgangsstoff für Essigsäure, Formaldehyd oder Polyurethane und kann zudem direkt in Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen eingesetzt werden. Die konventionelle Herstellung erfolgt vorwiegend über die Dampfreformierung fossiler Rohstoffe und ist mit

erheblichen Treibhausgasemissionen verbunden. CO₂-basiertes Methanol kann die Emissionen bei Nutzung erneuerbarer Energien um mehr als 50% senken. Ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit ist, wie auch bei der Herstellung von SNG, die Kostenstruktur der Wasserstoffbereitstellung. (Meunier et al., 2020)

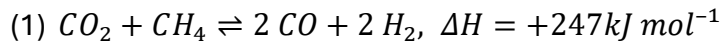
3.4.4. Harnstoff

Harnstoff zählt mit rund 180 Mio. t pro Jahr zu den wichtigsten Stickstoffdüngemitteln weltweit. Konventionell wird er aus CO₂ und Ammoniak hergestellt, wobei zunächst Ammoniumcarbamat gebildet und anschließend zu Harnstoff und Wasser dehydratisiert wird. Der Prozess basiert bislang überwiegend auf fossilen Rohstoffen, wodurch trotz CO₂-Nutzung Netto-Emissionen entstehen. Neuere Konzepte setzen auf eine Substitution fossilen Erdgases durch Syngas aus Biomasse oder die Integration von abgeschiedenem CO₂ in sogenannten „Blue Urea“-Prozessen. Dadurch könnte abgeschiedenes CO₂ in wertvolle Produkte, wie eben Harnstoff, umgesetzt werden. Durch diese Maßnahmen könnten die Treibhausgasemissionen um bis zu 65% reduziert werden. Großindustriell umgesetzt sind diese Verfahren bisher jedoch nicht. (Hanson et al., 2024; Zhang et al., 2020)

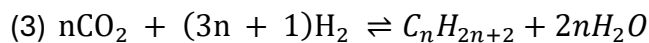
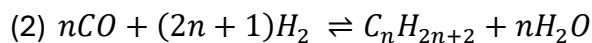
Für eine großskalige Umsetzung sind noch technische und wirtschaftliche Hürden zu überwinden. Neben der hohen Energieintensität ist die nachhaltige Versorgung mit erneuerbaren Energien entscheidend. Insgesamt zeigt sich, dass CO₂-basierter Harnstoff Potenzial für eine nachhaltigere Düngemittelproduktion bietet, jedoch erst nach weitergehender technologischer Entwicklung und unter Einsatz erneuerbarer Energien wirtschaftlich und ökologisch tragfähig sein wird. (Hanson et al., 2024)

3.4.5. Synthesegas (Syngas) und Fischer-Tropsch-Synthese (FTS)

Syngas, bestehend aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, ist ein zentrales Zwischenprodukt der chemischen Industrie und wird in großem Maßstab für die Produktion von Ammoniak, Methanol, Wasserstoff oder flüssigen Kraftstoffen eingesetzt. Es kann durch trockene Reformierung von Methan mit CO₂ hergestellt werden:



Die Reaktion ist stark endotherm und erfordert hohe Temperaturen sowie niedrigen Druck. Syngas kann in der Fischer–Tropsch-Synthese (FTS) zur Herstellung von flüssigen Kohlenwasserstoffen genutzt werden (Gleichung 2). Alternativ ist auch die direkte Umsetzung von CO_2 mit Wasserstoff möglich (Gleichung 3). Je nach Katalysator, Reaktionsbedingungen und Reaktortyp entstehen Produkte vom leichten Kohlenwasserstoffbereich (C_1 – C_4) über mittlere Fraktionen (C_5 – C_{10}) bis hin zu schweren Kohlenwasserstoffen (C_{10} – C_{20}) und Wachsen (C_{20}^+). (Chauvy & De Weireld, 2020)



Die weltweite Nachfrage nach Syngas lag 2016 bei 180 Mio. t für Ammoniak, 85 Mio. t für Methanol, 40 Mio. t für Wasserstoff und 21 Mio. t für Fischer–Tropsch-Kraftstoffe. Die Fischer–Tropsch-Synthese aus fossilem Syngas ist mit einem hohen Technologiereifegrad (TRL 9) kommerziell etabliert und wird weltweit großtechnisch eingesetzt. CO_2 -basierte Ansätze sind derzeit jedoch noch auf einem mittlerem Entwicklungsniveau (TRL 5-6). Umweltanalysen zeigen jedoch, dass CO_2 -basierte Fischer–Tropsch-Kraftstoffe in optimierten Anlagen fossilem Diesel ökologisch überlegen sein können. (Chauvy & De Weireld, 2020)

3.4.6. Polycarbonate

Die konventionelle Herstellung von Polycarbonaten erfolgt überwiegend über die Synthese aus Diolen und Phosgen. CO_2 -basierte Verfahren bieten hierzu eine potenziell nachhaltigere Alternative, da pro Tonne Produkt etwa 0,17 t CO_2 stofflich gebunden werden können. Allerdings weisen die bisher entwickelten CO_2 -basierten Polycarbonate im Vergleich zu Bisphenol-basierten Varianten oftmals geringere mechanische Eigenschaften sowie eine lediglich moderate chemische und thermische Stabilität auf. Die Nutzung von CO_2 als Rohstoff ermöglicht allerdings die Synthese zyklischer Carbonate, welche wiederum zur Produktion aromatischer Polycarbonate verwendet werden können. (Chauvy & De Weireld, 2020)

Ökonomische und ökologische Bewertungen liegen bislang nur in begrenztem Umfang vor. Erste Analysen zeigen jedoch, dass CO₂-basierte Polycarbonate im Vergleich zur konventionellen Produktion von Polyolen eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 11–19% sowie eine Verringerung des fossilen Ressourcenverbrauchs um 13–16% ermöglichen. Damit können CO₂-basierte Polycarbonate sowohl zur Reduzierung der fossilen Rohstoffabhängigkeit als auch zur Minderung von Treibhausgasemissionen beitragen. Gleichwohl besteht weiterhin erheblicher Optimierungsbedarf, insbesondere im Hinblick auf Materialeigenschaften, Prozessstabilität und wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit. (Chauvy & De Weireld, 2020)

3.5. Fazit zu CCS und CCU

CCU-Technologien eröffnen vielfältige Möglichkeiten, fossile Rohstoffe durch CO₂-basierte Verfahren zu substituieren und damit die Abhängigkeit von konventionellen Kohlenstoffquellen zu verringern. Der Entwicklungsstand reicht derzeit von pilotierten elektrochemischen Verfahren, wie der Ameisensäureproduktion, bis hin zu großindustriell etablierten Prozessen wie der Methanol- und Harnstoffherstellung. Entscheidend für die ökologische und ökonomische Tragfähigkeit solcher Technologien ist jedoch der Einsatz erneuerbarer Energien, insbesondere für die Bereitstellung von grünem Wasserstoff. Nur wenn CCU in ein vollständig dekarbonisiertes Energiesystem eingebettet wird, können die Verfahren ihr Potenzial entfalten. Ihre besondere Stärke liegt dabei weniger in einer unmittelbaren Minderung von Treibhausgasemissionen, sondern vielmehr in der Substitution fossiler Rohstoffe sowie in der Bereitstellung chemischer Plattformmoleküle, die als Grundlage für eine klimaneutrale Industrie dienen können. (Hanson et al., 2024)

Die Nutzung von CO₂ wird häufig im Zusammenhang mit Carbon Capture and Storage diskutiert und mit diesem verglichen, insbesondere im Hinblick auf Klimaschutzstrategien. Während CCS nach Analysen der Internationalen Energieagentur (IEA) eine zentrale Rolle für tiefgreifende Emissionsreduktionen im Energiesystem spielt und zudem das Potenzial negativer Emissionen bietet, kann CCU dieses Ziel nicht im gleichen Umfang erfüllen. Dennoch leistet die stoffliche Nutzung von CO₂ einen Beitrag zur Entwicklung kohlenstoffärmerer Produkte und Dienstleistungen und ist daher als

komplementäre Technologie innerhalb eines umfassenden Portfolios sauberer Energielösungen zu betrachten. (International Energy Agency [IEA], 2019)

Für die Speicherung werden vor allem salzhaltige Aquifere und erschöpfte Erdöllagerstätten erprobt und verwendet, wohingegen alternative Methoden noch erhebliche Forschungsbedarfe aufweisen. Die stoffliche Nutzung von CO₂, etwa in der Herstellung von Kunststoffen, synthetischen Treibstoffen oder Syngas, bietet im Vergleich zu Anwendungen als Lösungsmittel oder Wärmeträger ein höheres Reduktionspotenzial und weist teilweise ebenfalls höhere TRLs auf. (Dziejarski et al., 2023)

Synergiepotenziale zwischen CCS und CCU ergeben sich in mehreren Bereichen. So kann die Nachfrage nach CO₂, insbesondere im Rahmen von Enhanced Oil Recovery, eine zusätzliche Einnahmequelle für CCS-Projekte schaffen – EOR hat bislang 14 der 19 großtechnischen CCUS-Projekte finanziell abgesichert. Darüber hinaus fördern kleinere CO₂-Nutzungsoptionen die Erprobung innovativer Abscheidungsverfahren wie Membrantechnologien oder Direct Air Capture, wodurch technologische Weiterentwicklungen und Kostensenkungen beschleunigt werden können. Zudem profitieren kleinere CO₂-Nutzungsströme von Skaleneffekten, wenn sie an großtechnische CCS-Projekte gekoppelt sind. (IEA, 2019)

Darüber hinaus eröffnet die CO₂-Nutzung Chancen durch den Aufbau gemeinsamer Infrastrukturen, insbesondere in industriellen Clustern oder sogenannten CO₂-Hubs, die Transport- und Speicherlösungen bündeln. Solche Strukturen können emissionsintensive Branchen wie die Chemie- oder Stahlindustrie absichern und zugleich neue Geschäftsfelder für CO₂-basierte Anwendungen fördern. Schließlich kann CCU in bestimmten Fällen auch als Übergangslösung dienen, etwa wenn geologische Speicherstätten für CCS nicht rechtzeitig verfügbar, schwer zugänglich oder ökonomisch nicht tragfähig sind. (IEA, 2019)

CCS und CCU können im Übergang zu einem Netto-Null-Emissionssystem beitragen, indem sie helfen die Emissionen bestehender Energieinfrastrukturen zu senken, oder als (Übergangs)lösung für hard to abate industries und die Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre, um nicht vermeidbare Restemissionen auszugleichen. Im Sustainable Development Scenario der IEA zeigt sich, dass die globalen CO₂-Emissionen des

Energiesektors bis 2070 auf einer Netto-Basis auf null reduziert werden können. In diesem Szenario trägt CCUS mit rund 15% zur kumulativen Reduktion der weltweiten Emissionen im Vergleich zum Stated Policies Scenario bei, das die aktuellen nationalen energie- und klimapolitischen Maßnahmen berücksichtigt. (International Energy Agency [IEA], 2020)

Zur Maximierung des Beitrags von CCS und CCU an den Klimaschutz ist eine systematische Erfassung und Dokumentation von Forschungs- und Entwicklungsprojekten über alle Phasen – von der Konzeptentwicklung bis zur industriellen Nutzung – dringend erforderlich. Der Aufbau globaler Datenbanken könnte dabei sowohl als theoretische Grundlage für Projekte mit niedrigem TRL dienen als auch potenzielle Investoren ansprechen. Langfristig würde dies die kommerzielle Implementierung beschleunigen, die Effizienz der Kohlenstoffbewirtschaftung steigern und einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung verschärfter klimapolitischer Vorgaben leisten. (Dziejarski et al., 2023; Zhang et al., 2020)

4. Experimente im Schulunterricht

In den nachfolgenden Seiten finden sich Unterrichtsplanungen, die im Zuge von zwei Laboreinheiten in der 11. Schulstufe in der Sekundarstufe II durchgeführt wurden. Ziel der Unterrichtsplanungen war es, zu unterschiedlichen Aspekten des Lehrplans der Sekundarstufe II Experimente die Kohlenstoffdioxid enthalten zu bearbeiten, um so den Schülerinnen und Schülern die Vielseitigkeit und das häufige Vorkommen von CO₂ im chemischen Kontext zu verdeutlichen. Die Schülerinnen und Schüler sollten durch die Experimente die Stoffeigenschaften und den Atombau von Kohlenstoffdioxid kennenlernen. Neben diesen beiden Punkten sollen auch Säure-Basen-Reaktionen, Redox-Reaktionen, Sauerstoffübertragungsreaktionen, Exotherme Reaktionen, Nachweisreaktionen, das Prinzip von Le Chatelier und Carbon Capture erlernt werden. Alle Kompetenzen und Basiskonzepte beziehen sich dabei auf den österreichischen Lehrplan der AHS für die Sekundarstufe II. (Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung [BMBWF], o.J.)

In der nachfolgenden Tabelle wird grob in Stichworten die Aufgabenstellung der unterschiedlichen Experimente und der didaktische Schwerpunkt erläutert.

Nr.	Experiment	Aufgabenstellung	Didaktischer Schwerpunkt
4.1.	Das Brausetablettengas	Freisetzung und Auffangen eines Gases aus einer Brausetablette bei unterschiedlichen Temperaturen; Volumenbestimmung des entstandenen Gases und Brennprobe	Stoff-Teilchen-Konzept, quantitative Beobachtungen, Konzept der Stoffumwandlung, Gaslöslichkeit
4.2.	Sprudel unter Druck – CO ₂ im Mineralwasser	Sichtbarmachung der Druckabhängigkeit der Gaslöslichkeit von CO ₂ mithilfe einer Spritze und Indikator	Gleichgewichtskonzept (Prinzip von Le-Chatelier), Gaslöslichkeit
4.3.	Erst klar, dann trüb	Nachweis von CO ₂ in der Ausatemluft mithilfe von Kalkwasser	Stoff-Teilchen-Konzept, Anwenden chemischer Fachsprache, Stoffumwandlung
4.4.	Alkoholische Gärung	Zucker durch Hefe in Ethanol und CO ₂ umwandeln, Nachweis des entstandenen Gases (CO ₂) mithilfe von Kalkwasser	Alltagsbezug, Stoff-Teilchen-Konzept, Stoffumwandlung
4.5.	Einfluss von CO ₂ auf den pH-Wert	Veränderung des pH-Werts durch Einleiten von CO ₂ in Wasser mit Indikator	Säure-Base-Gleichgewicht, Donator-Akzeptor-Konzept,
4.6.	Experiment zum Treibhauseffekt	Vergleich des Temperaturverlaufs in normaler und CO ₂ -reicher Atmosphäre	Modellbildung, Struktur-Eigenschafts-Konzept

Nr.	Experiment	Aufgabenstellung	Didaktischer Schwerpunkt
4.7.	Reduktion von Kupfer(II)-oxid	Reduktion von CuO mit Kohlenstoff unter Nachweis der Gasfreisetzung	Donator-Akzeptor-Konzept, Redoxreaktionen,
4.8.	Carbon Capture – Der Kohlenstoffdioxid-handschuh	Veranschaulichung des Konzepts „Carbon Capture“ in einem Modellversuch durch Natronlauge	Stöchiometrie, Säure-Base-Reaktion, Nachhaltigkeit,

Tabelle 2: Auflistung der Experimente mit Übersicht zur Aufgabenstellung und didaktischem Schwerpunkt basierend auf den in Kapitel 4 beschriebenen Experimenten.

Ergänzend zu Tabelle 2 wird in Tabelle 3 eine Übersicht der benötigten Chemikalien und Materialien gegeben, um die Versuche auch für andere Lehrkräfte leicht zugänglich zu machen. Dadurch kann auf einen Blick überprüft werden, ob die erforderlichen Chemikalien und Materialien am jeweiligen Schulstandort vorhanden sind.

Nr.	Experiment	Chemikalien	Geräte
4.1.	Das Brausetablettengas	Brausetabletten, Streichholz, Leitungswasser	2x Standzylinder klein, Plexiglas Deckplatte, Plastikwanne
4.2.	Sprudel unter Druck – CO ₂ im Mineralwasser	Mineralwasser, Bromthymolblau	50 mL Becherglas, 60 mL Spritze, Dreiweghahn
4.3.	Erst klar, dann trüb	Kalkwasserlösung	2x Gaswaschflasche, Verbindungsschlauch
4.4.	Alkoholische Gärung	Destilliertes Wasser, Zucker, Hefe, Kalkwasserlösung	200 mL Erlenmeyerkolben, Gärröhrchen, Glasstab, Waage
4.5.	Einfluss von CO ₂ auf den pH-Wert	Leitungswasser, CO ₂ -Kartusche, Bromthymolblau	50 mL Becherglas, 100 mL Spritze
4.6.	Experiment zum Treibhauseffekt	CO ₂ -Kartusche	2 Gurkengläser + Deckel, Wärmelampe, Temperaturfühler, Laptop, 2 weiße Blätter 3x12cm
4.7.	Reduktion von Kupfer(II)- oxid	Kupfer(II)-oxid, Aktivkohle, Kalkwasserlösung	Reagenzglas (VWR), Reibschale, Stativ, Bunsenbrenner, Waage, Laborboy, 100 mL Becherglas, Stopfen + Schlauch
4.8.	Carbon Capture – Der Kohlenstoffdioxidhandschuh	NaOH-Granalien, CO ₂ -Kartusche,	Gurkenglas, 100 mL Becherglas, Glasstab, Gummihandschuh, Pinzette, Waage

Tabelle 3: Auflistung der benötigten Chemikalien und Geräte für die in Kapitel 4 beschriebenen Experimente.

4.1. Das Brausetablettengas

Im ersten beschriebenen Experiment wird eine Brausetablette zerkleinert und in Leitungswasser gegeben, wobei ein Gas freigesetzt wird, das mittels Standzylindern aufgefangen und quantifiziert wird. Die Schülerinnen und Schüler führen eigenständig das Experiment durch und dokumentieren den Versuchsablauf. Das Experiment soll zur Veranschaulichung des *Stoff-Teilchen-Konzepts* beitragen, indem es den abstrakten Prozess der gasförmigen *Stoffumwandlung* greifbar macht. Die dabei beobachtete Freisetzung eines Gases und die Verdrängung des Wassers, mit anschließender Brennprobe liefern direkte Einblicke in die Art der Stoffumwandlung und fördern das Verständnis für chemische Reaktionen auf molekularer Ebene. Insbesondere wird dabei deutlich, wie physikalische Größen wie Temperatur, das entstehende Gasvolumen beeinflussen – ein Aspekt, der durch die Wiederholung des Versuchs in Warm- und Eiswasser besonders hervorgehoben wird. Zudem fordern alle Experimente den *sicheren Umgang mit chemischen Materialien und Versuchsanordnungen*, wodurch auch Kompetenzen in der präzisen *Anwendung fachspezifischer Terminologie* und der *Durchführung quantitativer Messungen* gefördert werden.

Das Brausetablettengas

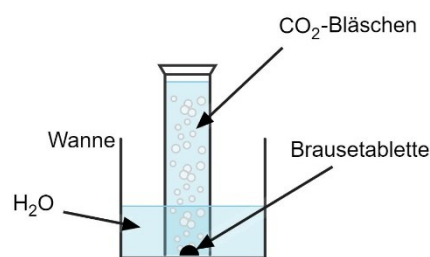
Materialien/Geräte:

- 2x Standzylinder klein
- Plexiglas Deckplatte
- Plastikwanne
- Brausetablette
- Leitungswasser
- Streichholz

Arbeitsvorschrift:

(1) Viertele eine Brausetablette und fülle die Wanne ca. zu einem Drittel mit Leitungswasser.

(2) Hole 2 Standzylinder und fülle einen vollständig mit Wasser. Decke ihn mit der Deckplatte ab und stelle den Standzylinder mit der Öffnung nach unten in die Wanne (siehe Skizze). Entferne die Deckplatte unter Wasser.



(3) Gib ein Viertel der Brausetablette unter die Öffnung und beobachte. Markiere die gebildete Gasmenge mit dem Stift. Verfahre mit dem Rest der Brausetablette genauso (Markieren nicht vergessen!).

Abbildung 12: Aufbau "Brausetablettengas". Quelle: Eigene Darstellung.

(4) Wenn der Zylinder vollständig mit Gas gefüllt ist (eventuell noch ein Brausetablettenstück holen), wird er wieder mit der Deckplatte unter Wasser verschlossen. Danach wird er auf den Tisch gestellt (Öffnung nach oben).

(5) Entzünde das lange Streichholz und halte dieses zuerst in den „leeren“ Zylinder und dann in den „gefüllten“ Zylinder. Gieße dann das Brausetablettengas in den leeren Zylinder und wiederhole die Brennprobe mit dem entzündeten Streichholz.

(6) Wiederhole Punkt 1 – 3 mit Warm- und Eiswasser und notiere dir die Temperatur des Wassers.

Beobachtung Leitungswasser:

Beobachtung Warmwasser:

Beobachtung Eiswasser:

Arbeitsvorschrift (Magyar, Liebhart, Jelinek, Faber & Strnad, 2020)

Arbeitsaufträge:

1. Um welches Gas könnte es sich im Zylinder handeln? Woran hast du das erkannt?

2. Ist der Zylinder tatsächlich leer? Was befindet sich im „leeren“ Zylinder?

3. Auf welche Eigenschaften des Gases kannst du durch das Experiment schließen? (nenne 5)

4. Die Gaslöslichkeit ☐ sinkt ☐ steigt bei höherer Temperatur.

5. Erkläre die unterschiedliche Wasserlöslichkeit folgender Stoffe bei 20°C (denk an den Aufbau der Moleküle)

N₂: 20 mg/L (Linde, 2023-b) NH₃: 531 g/L (Linde, 2023-a) CO₂: 2,0 g/L (Messer, 2020)

6. Recherchiere welchen Einfluss der Treibhauseffekt auf Meere und unsere Atmosphäre in Bezug auf das entstandene Gas haben könnte. Konzentriere dich bei deinen Recherchen auf die Gaslöslichkeit bei unterschiedlichen Temperaturen.

Entsorgung:

Alle Stoffe können über den Abfluss entsorgt werden.

Arbeitsaufträge (adaptiert nach Magyar et al., 2020)

Das Brausetablettengas - Lösung

Materialien/Geräte:

- 2x Standzylinder klein
- Plexiglas Deckplatte
- Plastikwanne
- Brausetablette
- Leitungswasser
- Streichholz

Arbeitsvorschrift:

(1) Viertele eine Brausetablette und fülle die Wanne ca. zu einem Drittel mit Leitungswasser.

(2) Hole 2 Standzylinder und fülle einen vollständig mit Wasser. Decke ihn mit der Deckplatte ab und stelle den Standzylinder mit der Öffnung nach unten in die Wanne (siehe Skizze). Entferne die Deckplatte unter Wasser.

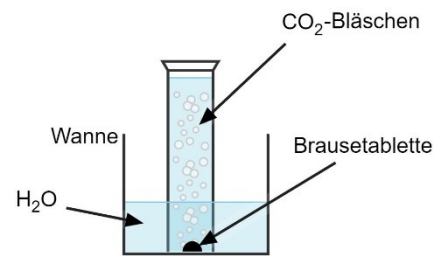


Abbildung 13: Aufbau "Brausetablettengas". Quelle: Eigene Darstellung.

(3) Gib ein Viertel der Brausetablette unter die Öffnung und beobachte. Markiere die gebildete Gasmenge mit dem Stift. Verfahre mit dem Rest der Brausetablette genauso (Markieren nicht vergessen!).

(4) Wenn der Zylinder vollständig mit Gas gefüllt ist (eventuell noch ein Brausetablettenstück holen), wird er wieder mit der Deckplatte unter Wasser verschlossen. Danach wird er auf den Tisch gestellt (Öffnung nach oben).

(5) Entzünde das lange Streichholz und halte dieses zuerst in den „leeren“ Zylinder und dann in den gefüllten Zylinder. Gieße dann das Brausetablettengas in den leeren Zylinder und wiederhole die Brennprobe mit dem entzündeten Streichholz.

(6) Wiederhole Punkt 1 – 3 mit Warm- und Eiswasser und notiere dir die Temperatur des Wassers.

Beobachtung Leitungswasser:

Wasser im Zylinder wird verdrängt. Zuerst kaum eine Gasentwicklung, dann mehr

Beobachtung Warmwasser:

schnellere Gasentwicklung im Zylinder. $\frac{1}{2}$ - $\frac{3}{4}$ Tablette reichen aus, um Zylinder mit Gas zu füllen.

Beobachtung Eiswasser:

sehr langsame Gasentwicklung im Zylinder. 1 $\frac{1}{2}$ Tabletten notwendig, um Zylinder mit Gas zu füllen.

Arbeitsvorschrift (Magyar et al., 2020)

Arbeitsaufträge:

1. Um welches Gas könnte es sich im Zylinder handeln? Woran hast du das erkannt?
Kohlenstoffdioxid (CO_2). Daran erkannt, dass es das Feuer ausgelöscht hat.
2. Ist der Zylinder tatsächlich leer? Was befindet sich im „leeren“ Zylinder? Im „leeren“ Zylinder befindet sich Luft.

3. Auf welche Eigenschaften des Gases kannst du durch das Experiment schließen? (nenne 5)

Schwerer als Luft

geruchlos

Nicht brennbar, erstickt Flammen

(fast) wasserunlöslich

farblos

(Institut für Arbeitsschutz der DGUV, o. J.)

4. Die Gaslöslichkeit sinkt ☒ steigt ☐ bei höherer Temperatur.
5. Erkläre die unterschiedliche Wasserlöslichkeit folgender Stoffe bei 20°C (denk an den Aufbau der Moleküle)

N₂: 20 mg/L (Linde, 2023-b) NH₃: 531 g/L (Linde, 2023-a) CO₂: 2,0 g/L (Messer, 2020)

Sowohl Stickstoff (N₂) als auch Kohlenstoffdioxid (CO₂) sind unpolare Moleküle und daher nur sehr schlecht wasserlöslich. Ammoniak (NH₃) hingegen ist ein polarer Stoff und löst sich daher sehr gut in einem polaren Lösungsmittel wie Wasser (H₂O).

6. Recherchiere welchen Einfluss der Treibhauseffekt auf Meere und unsere Atmosphäre in Bezug auf das entstandene Gas haben könnte. Konzentriere dich bei deinen Recherchen auf die Gaslöslichkeit bei unterschiedlichen Temperaturen.

Meere gehören zu den größten Kohlenstoffsinken, da CO₂ in Meerwasser gelöst werden kann. Die Löslichkeit von Gasen hängt jedoch von der Temperatur ab. Je niedriger die Temperatur ist, desto mehr Gas kann in Wasser gelöst werden (Henry-Gesetz). Steigt jetzt die Meerestemperatur, kommt es zu einer Verringerung der Gaslöslichkeit und mehr CO₂ bleibt in der Atmosphäre. (Umweltbundesamt, 2024-b)

Entsorgung:

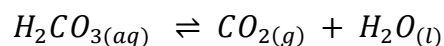
Alle Stoffe können über den Abfluss entsorgt werden.

Arbeitsaufträge (adaptiert nach Magyar et al., 2020)

4.2. Sprudel unter Druck: CO₂ im Mineralwasser

Durch das Erzeugen eines Unterdrucks in der Spritze beobachten die Schülerinnen und Schüler, wie bereits im Mineralwasser gelöstes Gas – vor allem Kohlendioxid, welches in kohlensäurehaltigem Mineralwasser vorkommt – aus der Lösung austritt und Bläschen bildet. Das anschließende Loslassen oder Komprimieren des Spritzenkolbens zeigt, wie sich das gelöste Gas wieder in die Flüssigkeit einlassen kann bzw. umgekehrt freigesetzt wird.

Dieser Versuch fördert das Verständnis grundlegender Konzepte des *Gleichgewichts*, etwa das *Prinzip von Le Chatelier (Prinzip des geringsten Zwangs)*, indem er verdeutlicht, wie ein System auf äußere Einflüsse reagiert: Wird der Druck verringert, verschiebt sich das chemische Gleichgewicht so, dass das in Lösung befindliche Kohlendioxid vermehrt als Gas entweicht, um den veränderten Bedingungen entgegenzuwirken. Dadurch wird auch das Gleichgewicht zwischen Kohlendioxid (g), Wasser (l) und Kohlensäure (aq) nachvollziehbar, das sich folgendermaßen formulieren lässt:



Das Experiment schließt zudem den Vergleich zwischen Mineralwasser und Leitungswasser ein, wodurch die Schülerinnen und Schüler erkennen, wie unterschiedliche Ausgangsbedingungen (wie der initial vorhandene CO₂-Gehalt) den Prozess der *Gaslöslichkeit* beeinflussen.

Sprudel unter Druck: CO₂ im Mineralwasser

Materialien/Geräte:

- 50 mL Becherglas
- 60 mL Spritze
- Dreiweghahn
- Mineralwasser
- Indikator (Bromthymolblau)

Arbeitsvorschrift:

- (1) Fülle circa 25 mL Mineralwasser in ein Becherglas.
- (2) Versetze das Mineralwasser mit ein paar Tropfen Bromthymolblau Indikator.
- (3) Entnimm circa 15 mL des Mineralwassers mit der 60 mL Spritze und verschließe sie anschließend am Dreiweghahn.
- (4) Ziehe nun am Stempel der Spritze und erzeuge so einen Unterdruck.

Arbeitsaufträge:

1. Was kannst du bei der Zugabe des Indikators beobachten? Worauf kannst du daher schließen? _____
2. Was passiert, wenn du den Stempel wieder loslässt oder komprimierst?

3. Führe die Schritte 1-4 auch mit Leitungswasser durch. Passiert das gleiche?

4. Formuliere die Reaktionsgleichung samt Indizes (aq,l,g,s) zur Bildung von Kohlensäure. Wie wird diese hergestellt?
5. Warum kommt es zur Bläschenbildung? Kannst du mithilfe des Prinzips von Le Chatelier (Prinzip des geringsten Zwangs) erklären was/warum etwas passiert?

Entsorgung:

Alle Stoffe können über den Abfluss entsorgt werden.

Idee Arbeitsblatt (adaptiert nach Schilling, 2016; Sieve et al., 2024)

Sprudel unter Druck: CO₂ im Mineralwasser - Lösung

Materialien/Geräte:

- 50 mL Becherglas
- 60 mL Spritze
- Dreiweghahn
- Mineralwasser
- Indikator (Bromthymolblau)

Arbeitsvorschrift:

- (1) Fülle circa 25 mL Mineralwasser in ein Becherglas.
- (2) Versetze das Mineralwasser mit ein paar Tropfen Bromthymolblau Indikator.
- (3) Entnimm circa 15 mL des Mineralwassers mit der 60 mL Spritze und verschließe sie anschließend am Dreiweghahn.
- (4) Ziehe nun am Stempel der Spritze und erzeuge so einen Unterdruck.

Arbeitsaufträge:

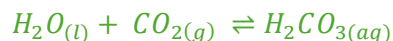
1. Was kannst du bei der Zugabe des Indikators beobachten? Worauf kannst du daher schließen?

Durch das Bromthymolblau färbt sich das Wasser gelb, was auf einen sauren pH-Wert deutet.

2. Was passiert, wenn du den Stempel wieder loslässt oder komprimierst?

Durch das Ziehen am Stempel bilden sich viele Gasbläschen, in der Lösung/am Stempel. Durch Loslassen oder Komprimieren des Stempels gehen diese wieder in Lösung. Es kommt zu einer Umfärbung des Indikators von gelb zu grün. Wird das CO₂ aufgesaugt und erst anschließend Wasser, kann man auch den Stempel hineindrücken und so das Gleichgewicht zu einer erhöhten Löslichkeit von CO₂ in Wasser erhöhen. Bei Leitungswasser führt dies zu einer Umfärbung des Indikators von blau nach gelb.

3. Führe die Schritte 1-4 auch mit Leitungswasser durch. Passiert das gleiche? Leitungswasser ist nach Zugabe von Bromthymolblau-Indikator grün/blau gefärbt. Durch Herausziehen des Stempels kommt es kaum bis gar nicht zur Bläschenbildung.
4. Formuliere die Reaktionsgleichung samt Indizes (aq,l,g,s) zur Bildung von Kohlensäure. Wie wird diese hergestellt?



5. Warum kommt es zur Bläschenbildung? Kannst du mithilfe des Prinzips von Le Chatelier (Prinzip des geringsten Zwangs) erklären was/warum etwas passiert?

Das Prinzip von Le Chatelier (Das Prinzip des geringsten Zwangs) besagt: „Wird auf ein im Gleichgewicht befindliches System ein Zwang ausgeübt, so weicht es aus und ein verlagertes Gleichgewicht stellt sich ein.“ (Mortimer & Müller, 2019) Durch Erzeugung eines Unterdrucks löst sich das Gas aus der Lösung. Bei Überdruck kommt es vermehrt zur Lösung des Gases in Lösung, da das System dem Zwang *ausweichen* möchte.

Entsorgung:

Alle Stoffe können über den Abfluss entsorgt werden.

Idee Arbeitsblatt (adaptiert nach Schilling, 2016; Sieve et al., 2024)

4.3. Erst klar, dann trüb

Im Rahmen des Experiments zur Nachweisreaktion von CO_2 mit Kalkwasser sollen die Schülerinnen und Schüler eine Nachweisreaktion für Kohlenstoffdioxid kennenlernen und dabei *experimentelle Arbeitsmethoden* anwenden. Dabei wurden zwei Gaswaschflaschen so aufgebaut, dass in der einen Flasche eine $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung (Kalkwasser) bereitstand und in die andere über einen Schlauch Ausatemluft eingebracht wurde. Beim vorsichtigen Einblasen der Ausatemluft wurde beobachtet, dass sich in der Kalkwasserlösung ein weißer, trüber Niederschlag bildete. Diese Trübung ist charakteristisch für die Bildung von Calciumcarbonat (CaCO_3), welches als schwerlöslicher Feststoff ausfällt.

Die Schülerinnen und Schüler sollen dabei schlussfolgern, dass die Ausatemluft neben Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2) vermehrt Kohlenstoffdioxid (CO_2) enthält. Aufgrund der beobachteten Trübung sollten die Lernenden darauf schließen, dass das in der Ausatemluft enthaltene CO_2 in die Kalkwasserlösung übergeht und mit Calciumhydroxid reagiert. Somit wurde mittels des klassischen Kalkwasser-Nachweises das Vorhandensein von Kohlendioxid bestätigt. Diese Aufgabenstellung soll das Verständnis für *stoffliche Veränderungen und das Stoff-Teilchen-Konzept* sowie für *Modellbildung und das präzise Arbeiten mit chemischer Fachsprache* fördern. Die Lernenden sollen auch in der Lage sein, die zugrunde liegende chemische Reaktion, die in der zweiten Gaswaschflasche abläuft, aufzustellen. Mithilfe dieses einfachen Experiments können so neben den oben genannten Aspekten auch *chemische Stoffumwandlungen* und der Nachweis von Gasen im Alltag veranschaulicht werden.

Erst klar, dann trüb

Materialien/Geräte:

- 2x Gaswaschflasche
- Ca(OH)_2 -Lösung
- Verbindungsschlauch

Arbeitsvorschrift:

- (1) Nimm zwei Gaswaschflaschen und baue sie wie in der Abbildung abgebildet auf.
- (2) Fülle eine der beiden Gaswaschflaschen mit der von deiner Lehrkraft zur Verfügung gestellten Ca(OH)_2 -Lösung (Kalkwasser) auf.
- (3) Beachte, dass zwischen der Gaswaschflasche mit der Ca(OH)_2 -Lösung und dem Schlauch in den du hineinatmest eine leere Gaswaschflasche hängt.
- (4) Blase nun vorsichtig in den Schlauch hinein und beobachte, was passiert.

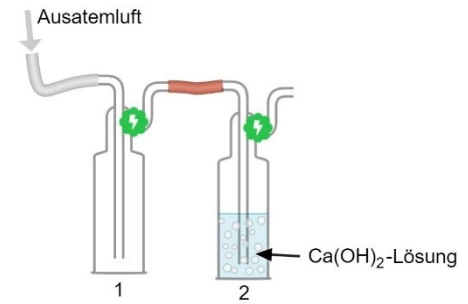


Abbildung 14: Aufbau Gaswaschflaschen. Quelle: Eigene Darstellung.

Arbeitsaufträge:

1. Was konntest du beobachten?

2. Überlege, welche Gase sich in deiner Ausatemluft befinden.

3. Welches Gas konntest du durch dieses Experiment nachweisen und durch welche Reaktion konnte es nachgewiesen werden?

4. Formuliere die Reaktionsgleichung, die in der Gaswaschflasche 2 abläuft.

Entsorgung:

Kalkwasser-Lösung bei Lehrer*innentisch sammeln.

(adaptiert nach Schmidkunz & Rentzsch, 2024)

Erst klar, dann trüb - Lösung

Materialien/Geräte:

- 2x Gaswaschflasche
- Verbindungsschlauch
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung

Arbeitsvorschrift:

- (1) Nimm zwei Gaswaschflaschen und baue sie wie in der Abbildung abgebildet auf.
- (2) Fülle eine der beiden Gaswaschflaschen mit der von deiner Lehrkraft zur Verfügung gestellten $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung (Kalkwasser) auf.
- (3) Beachte, dass zwischen der Gaswaschflasche mit der $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung und dem Schlauch in den du hineinatmest eine leere Gaswaschflasche hängt.
- (4) Blase nun vorsichtig in den Schlauch hinein und beobachte, was passiert.

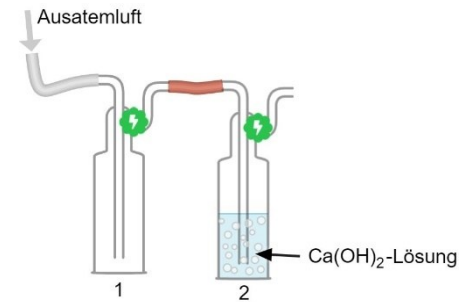


Abbildung 15: Aufbau Gaswaschflaschen. Quelle: Eigene Darstellung.

Arbeitsaufträge:

1. Was konntest du beobachten?
Die Kalkwasserlösung trübt sich.
2. Überlege, welche Gase sich in deiner Ausatemluft befinden.
 N_2 , O_2 , CO_2 und Spurengase
3. Welches Gas konntest du durch dieses Experiment nachweisen und durch welche Reaktion konnte es nachgewiesen werden?
 CO_2 , da es zur Trübung der Calciumhydroxidlösung kam.
4. Formuliere die Reaktionsgleichung, die in der Gaswaschflasche 2 abläuft.



Entsorgung:

Kalkwasser-Lösung neutralisieren und anschließend über den Ausguss entsorgen.

(adaptiert nach Schmidkunz & Rentzsch, 2024)

4.4. Alkoholische Gärung

Das Experiment veranschaulicht das *Stoff-Teilchen-Konzept*, indem gezeigt wird, wie Zucker unter Einwirkung von Hefe in Ethanol und Kohlendioxid umgewandelt wird. Die dabei beobachtete Gasfreisetzung, nachweisbar mittels des Kalkwassernachweises, ermöglicht den Schülerinnen und Schülern, den dynamischen Prozess der Stoffumwandlung auf molekularer Ebene zu verstehen. Dies steht in direktem Bezug zum im Lehrplan verankerten *Struktur-Eigenschafts-Konzept* und fördert zugleich die *Modellbildung*, da die chemischen Reaktionsgleichungen erstellt und interpretiert werden müssen. Das Experiment stellt auch einen *Alltagsbezug chemischer Prozesse* her, indem es den natürlichen Gärungsprozess, der auch in der industriellen Herstellung von alkoholischen Getränken eine zentrale Rolle spielt, im Klassenkontext erlebbar macht. Diese praxisnahe Darstellung naturwissenschaftlicher Zusammenhänge fördert das *kritische Hinterfragen und die Verantwortungsübernahme* im Umgang mit chemischen Vorgängen.

Alkoholische Gärung

Materialien/Geräte:

- 200 mL Erlenmeyerkolben
- Gärrohrchen mit Ca(OH)_2 -Lösung
- Destilliertes Wasser
- Waage
- Zucker
- Hefe
- Glasstab



Abbildung 16:
Gärrohrchen
mit Kalkwasser.
Quelle:
ter Horst (o.J.).

Arbeitsvorschrift:

- (1) Nimm einen 200 mL Erlenmeyerkolben und gebe etwa 15g Zucker in den Kolben.
- (2) Anschließend fülle circa 100 mL warmes destilliertes Wasser in den Kolben.
- (3) Füge nun $\frac{1}{2}$ Päckchen Trockenhefe oder $\frac{1}{4}$ Päckchen frische Hefe hinzu.
- (4) Mische mithilfe eines Glasstabs alles durch und achte auf eine gute Durchmischung.
- (5) Stülpe nun vorsichtig das Gärrohrchen mit dem Kalkwasser (Ca(OH)_2 -Lösung) auf den Kolben und stelle alles an einen warmen Ort.
- (6) Überprüfe dein Apparatur nach 1 Stunde. Sollte noch nichts passiert sein, kontrolliere diese erneut nach 1 Tag.

Arbeitsaufträge:

1. Was konntest du beobachten?

Nach 1 Stunde:

Nach 1 Tag:

2. Welches Gas konntest du durch dieses Experiment nachweisen?

3. Was ist das gewünschte Hauptprodukt dieser Reaktion? Worum könnte es sich bei dem Gas handeln?

4. Recherchiere die Reaktionsgleichung zur Gewinnung des Produkts aus Zucker und Hefe.
5. Durch welches Trennverfahren kann dieser Stoff anschließend vom Wasser getrennt werden?

6. Recherchiere welche Gefahren durch das entstandene Gas (zum Beispiel in Kellern) ausgehen.

Entsorgung:

Zucker/Wasser/Ethanol Mischung aus Erlenmeyerkolben können über den Abfluss entsorgt werden.

Kalkwasser-Lösung bei Lehrer*innentisch sammeln.

(adaptiert nach ter Horst, o.J.)

Alkoholische Gärung - Lösung

Materialien/Geräte:

- 200 mL Erlenmeyerkolben
- Gärröhrchen mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung
- Destilliertes Wasser
- Waage
- Zucker
- Hefe
- Glasstab



Abbildung 17:
Gärröhrchen
mit Kalkwasser.
Quelle:
ter Horst (o.J.).

Arbeitsvorschrift:

- (1) Nimm einen 200 mL Erlenmeyerkolben und gebe etwa 15g Zucker in den Kolben.
- (2) Anschließend fülle circa 100 mL warmes destilliertes Wasser in den Kolben.
- (3) Füge nun $\frac{1}{2}$ Päckchen Trockenhefe oder $\frac{1}{4}$ Päckchen frische Hefe hinzu.
- (4) Mische mithilfe eines Glasstabs alles durch und achte auf eine gute Durchmischung.
- (5) Stülpe nun vorsichtig das Gärröhrchen mit dem Kalkwasser ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung) auf den Kolben und stelle alles an einen warmen Ort.
- (6) Überprüfe dein Apparat nach 1 Stunde. Sollte noch nichts passiert sein, kontrolliere diese erneut nach 1 Tag.

Arbeitsaufträge:

1. Was konntest du beobachten?

Nach 1 Stunde:

Der Zucker löst sich im Wasser. Nach längerem Stehenbleiben der Apparatur bildet sich Schaum. Die Calciumcarbonat-Lösung im Gärröhrchen reagiert mit dem CO_2 -Gas, das während der Gärung entsteht und bildet einen Calciumcarbonat-Niederschlag. Diesen kann man als Trübung im Röhrchen erkennen.

Nach 1 Tag:

Die Calciumcarbonat-Lösung im Gärröhrchen reagiert mit dem CO_2 -Gas, das während der Gärung entsteht und bildet einen Calciumcarbonat-Niederschlag. Diesen kann man als Trübung im Röhrchen erkennen.

2. Welches Gas konntest du durch dieses Experiment nachweisen? Kohlenstoffdioxid
3. Was ist das gewünschte Hauptprodukt dieser Reaktion? Worum könnte es sich bei dem Gas handeln?

Durch die Hefebakterien entsteht Alkohol (Ethanol). Bei dem Gas handelt es sich um CO_2 .

4. Recherchiere die Reaktionsgleichung zur Gewinnung des Produkts aus Zucker und Hefe.



5. Durch welches Trennverfahren kann dieser Stoff anschließend vom Wasser getrennt werden? **Destillation.**
6. Recherchiere welche Gefahren durch das entstandene Gas (zum Beispiel in Kellern) ausgehen.

Das Experiment zeigt, dass durch die Gärung von Zucker durch Hefe CO_2 entsteht. Da Kohlenstoffdioxid eine höhere Dichte als Sauerstoff besitzt, sammelt es sich am Boden. Diese Erkenntnis kann man auf schlecht belüftete Räume oder Keller übertragen in denen eine alkoholische Gärung stattfindet, zum Beispiel in Weinkellern. Sie weist auf die Gefahr solcher Räume, ohne ausreichender Belüftung, hin. Durch dieses Experiment kann die Entstehung von CO_2 durch die alkoholische Gärung erkannt werden und die Gefahren durch schlecht belüftete Gärkeller gelernt werden.

Entsorgung:

Zucker/Wasser/Ethanol Mischung aus Erlenmeyerkolben können über den Abfluss entsorgt werden.

Kalkwasser-Lösung neutralisieren und anschließend über den Ausguss entsorgen.

(adaptiert nach ter Horst, o.J.)

4.5. Einfluss von CO₂ auf den pH-Wert

Das Experiment zum Einfluss von CO₂ auf den pH-Wert fordert die Schülerinnen und Schüler dazu auf, *empirisch zu arbeiten und erfahrungsgeleitet zu lernen*, indem sie den Versuchsaufbau selbstständig planen, durchführen und die beobachteten Veränderungen dokumentieren. Durch die Zugabe von CO₂ zu einer wässrigen Lösung, die mit Bromthymolblau versetzt wurde, wird anschaulich sichtbar, wie sich der pH-Wert durch einen chemischen Prozess verändert – eine praktische Demonstration des *Stoff-Teilchen-Konzepts* und des *Struktur-Eigenschafts-Konzepts*, die im Lehrplan als Grundlage für das Verständnis chemischer Reaktionen hervorgehoben werden.

Weiters schult der Versuch das Verständnis für dynamische Prozesse, indem das Experiment den Einfluss von CO₂ auf das chemische Gleichgewicht demonstriert und damit Aspekte des *Gleichgewichtskonzepts* veranschaulicht. Dabei wird auch deutlich, wie externe Faktoren – in diesem Fall das Einbringen von CO₂ – das *Säure-Base-Gleichgewicht* beeinflussen, was einen Bezug zur *Funktion und Vernetzung natürlicher und anthropogener Stoffkreisläufe* herstellt. Insgesamt stellt der Versuchsaufbau eine authentische Verbindung zwischen theoretischem Chemiewissen und dessen praktischer Anwendung in einem alltagsrelevanten Kontext her – etwa in Hinblick auf die globale Problematik der Ozeanversauerung –, was das Ziel des *situierten und fächerübergreifenden Lernens* im Lehrplan unterstützt.

Einfluss von CO₂ auf den pH-Wert

Materialien/Geräte:

- 50 mL Becherglas
- Leitungswasser
- 100 mL Spritze
- CO₂-Kartusche
- Indikator (Bromthymolblau)

Arbeitsvorschrift:

- (1) Nimm ein 50 mL Becherglas und fülle es zu circa 2/3 mit Leitungswasser.
- (2) Füge 2-3 Tropfen Bromthymolblau Indikator hinzu
- (3) Schwenke das Becherglas, damit sich der Indikator gut im Wasser löst.
- (4) Fülle nach Anleitung durch die Lehrkraft eine 100mL Spritze voll mit CO₂-Gas.
- (5) Leite das CO₂ in die Lösung und beobachte, was passiert.

Arbeitsaufträge:

1. Welche Farbe hatte die Lösung vor dem Einleiten von CO₂? Worauf kannst du durch die Farbe schließen?

2. Welche Farbe hatte die Lösung nach dem Einleiten von CO₂?

3. Recherchiere den Umschlagsbereich von Bromthymolblau und gib diesen an.

4. Welche Schlüsse kannst du aufgrund der pH-Wert-Veränderung auf Meere ziehen? Recherchiere zur Ozeanversauerung und erkläre diese in eigenen Worten.

Entsorgung:

Alle Stoffe können über den Abfluss entsorgt werden.

(Eigene Entwicklung, in Anlehnung an Davies, 2022)

Einfluss von CO₂ auf den pH-Wert - Lösung

Materialien/Geräte:

- 50 mL Becherglas
- Leitungswasser
- 100 mL Spritze
- CO₂-Kartusche
- Indikator (Bromthymolblau)

Arbeitsvorschrift:

- (1) Nimm ein 50 mL Becherglas und fülle es zu circa 2/3 mit Leitungswasser.
- (2) Füge 2-3 Tropfen Bromthymolblau Indikator hinzu
- (3) Schwenke das Becherglas, damit sich der Indikator gut im Wasser löst.
- (4) Fülle nach Anleitung durch die Lehrkraft eine 100mL Spritze voll mit CO₂-Gas.
- (5) Leite das CO₂ in die Lösung und beobachte, was passiert.

Arbeitsaufträge:

1. Welche Farbe hatte die Lösung vor dem Einleiten von CO₂? Worauf kannst du durch die Farbe schließen?

Nach Zugabe des Bromthymolblau Indikators färbte sich die Lösung blau, was auf einen pH-Wert größer 7 hinweist.

2. Welche Farbe hatte die Lösung nach dem Einleiten von CO₂? Nach Zugabe des CO₂-Gases färbte sich die Lösung gelb, was auf einen sauren pH-Wert hinweist.

3. Recherchiere den Umschlagsbereich von Bromthymolblau und gib diesen an.



Abbildung 18: Farbumschläge von Bromthymolblau bei verschiedenen pH-Werten. Quelle: Xato (2008), Wikimedia Commons (gemeinfrei).

4. Welche Schlüsse kannst du aufgrund der pH-Wert-Veränderung auf Meere ziehen? Recherchiere zur Ozeanversauerung und erkläre diese in eigenen Worten.

In diesem Experiment wird im verkleinerten Maßstab demonstriert, wie erhöhte atmosphärische CO₂-Konzentrationen zur Ozeanversauerung führen. Durch den Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Ozean löst sich Kohlendioxid im Meerwasser, wo es mit Wasser zu Kohlensäure reagiert. Dies führt zu einer Absenkung des pH-Werts und damit zu einer chemischen Veränderung des marinen Milieus. Seit Beginn der Industrialisierung um 1765 ist der durchschnittliche pH-Wert der oberflächennahen Weltmeere von etwa 8,2 auf 8,1 gesunken. In Regionen wie dem Nordatlantik und dem Nordpazifik wird aktuell ein jährlicher Rückgang des pH-Werts um etwa 0,0015 bis 0,0024 verzeichnet. Der kontinuierlich hohe Ausstoß von Kohlendioxid trägt nicht nur erheblich zur globalen Klimaerwärmung bei, sondern wirkt sich auch zunehmend negativ auf die Stabilität und Funktion mariner Ökosysteme aus. (Cubasch et al., 2013)

Entsorgung:

Alle Stoffe können über den Abfluss entsorgt werden.

(Eigene Entwicklung, in Anlehnung an Davies, 2022)

4.6. Experiment zum Treibhauseffekt

Das Experiment zum Treibhauseffekt mittels zwei identischer Gurkengläser, bei dem in eines der Gläser CO_2 eingefüllt wird, verbindet zentrale Lehrplaninhalte der Sekundarstufe II im Fach Chemie. Durch dieses Experiment sollen die Schülerinnen und Schülern experimentell naturwissenschaftliche Phänomene erfassen, dokumentieren und kritisch interpretieren lernen. Alles Kompetenzen die sich im Lehrplan für die Sekundarstufe II im Punkt *Empirisch Arbeiten und erfahrungsgeleitet lernen* wieder finden. Darüber hinaus fördert der Versuchsaufbau die *Modellbildung*, indem durch das Zeichnen der molekularen Struktur des CO_2 inklusive freier Elektronenpaare das *Struktur-Eigenschafts-Konzept* vermittelt wird. Die Auseinandersetzung mit den molekularen Eigenschaften von Kohlendioxid und dessen Rolle als Treibhausgas trägt dazu bei das *Stoff-Teilchen-Konzept* zu festigen, das im Lehrplan als Basis für das Verständnis chemischer Vorgänge hervorgehoben wird.

Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die Verknüpfung von theoretischem Wissen mit realweltlichen Problemstellungen. Durch den Vergleich des experimentellen Aufbaus mit globalen Umweltprozessen – etwa anhand der Untersuchung der Temperaturverläufe in den beiden Gläsern, der Relevanz der Keeling-Kurve und der Diskussion weiterer Treibhausgase – wird das Verständnis für die Funktion und Vernetzung *natürlicher und anthropogener Stoffkreisläufe* gefördert. Dies entspricht der im Lehrplan geforderten Auseinandersetzung mit der *nachhaltigen Nutzung von materiellen und energetischen Ressourcen* und der Bewertung von Umwelteinflüssen.

Schließlich werden im Rahmen des Experiments auch fächerübergreifende Kompetenzen angesprochen, wie das kritische *Hinterfragen und Kommunizieren von Messergebnissen* sowie die fächerübergreifende Verknüpfung von chemischem Grundlagenwissen mit Aspekten der Physik und Umweltwissenschaften. Dadurch wird nicht nur das naturwissenschaftliche Problemlösungsdenken gefördert, sondern auch die Fähigkeit, wissenschaftliche Erkenntnisse in einen gesellschaftlichen Kontext einzuordnen – ein Ziel, das im Lehrplan zur Förderung von *Verantwortungsbewusstsein* und *kritischer Reflexion* verankert ist.

Insgesamt deckt das Experiment also wichtige Bereiche des Lehrplans ab: Es schult *experimentelle Methoden*, fördert das *Modell- und Systemdenken* bezüglich molekularer

Strukturen und energetischer Prozesse, verbindet *theoretisches Wissen mit praxisrelevanten Umweltfragen*, nutzt die *Verwendung von chemiespezifischer Software* und stärkt die *kommunikativen und analytischen Kompetenzen* der Schülerinnen und Schüler.

Experiment zum Treibhauseffekt

Materialien/Geräte:

- 2 Gurkengläser + Deckel
- Wärmelampe
- Temperaturfühler
- Laptop
- CO₂-Kartusche
- 2 weiße Blätter 3x12cm

Arbeitsvorschrift:

- (1) Nimm zwei gleich große Gurkengläser und einen dazu passenden Deckel.
- (2) Die Deckel der Gurkengläser wurden im Vorfeld präpariert, sodass ein Thermometer durch die Öffnung passt.
- (3) Hol die Wärmelampe vom Lehrer*innentisch und platziere alles auf deinem Tisch.
- (4) Gib die Thermometer so in die Gurkengläser, dass sie sich hinter den weißen Blättern befinden, damit die Wärmelampe nicht direkt auf das Thermometer scheint.
- (5) Führe eine Kalibration deines Experiments durch, um im ersten Durchgang sicherzugehen, dass beide Gläser durch die Lampe gleich erwärmt werden.
- (6) Lass die Temperatur in den Gläsern wieder auf Umgebungstemperatur abkühlen.
- (7) Fülle eines der beiden Gläser vorsichtig mit CO₂ und warte gegebenenfalls Temperaturänderungen durch die Zugabe des Gases ab.
- (8) Verschließe beide Gurkengläser und gib die Thermometer in die Gläser.
- (9) Starte anschließend die Messung mithilfe der Vernier Temperaturfühler und lass das Experiment für 10 -15 Minuten laufen.



Abbildung 19: Möglicher Aufbau für das Experiment.
Quelle: Eigene Aufnahme.

Arbeitsaufträge:

1. Welchen Einfluss hatte das CO₂-Gas auf den Temperaturverlauf?

2. Zeichne die Valenzstrichformel eines CO₂-Moleküls inklusive der freien Elektronenpaare.

3. Recherchiere welche Treibhausgase es neben Kohlenstoffdioxid sonst noch gibt.

4. Welchen Vergleich zwischen diesem Experiment und unserer Umwelt kannst du ziehen?

5. Während der Messung: Recherchiere zur „Keeling-Curve“. Was zeigt sie an und warum kommt es auf dieser Kurve zu „Schwankungen“?

6. Zeichne eine Grafik zum Temperaturverlauf der Gase in den beiden Gläsern.

Entsorgung:

Keine Entsorgung notwendig.

(Adaptiert nach Vernier, o.J.)

Experiment zum Treibhauseffekt - Lösung

Materialien/Geräte:

- 2 Gurkengläser + Deckel
- Wärmelampe
- Temperaturfühler
- Laptop
- CO₂-Kartusche
- 2 weiße Blätter 3x12cm

Arbeitsvorschrift:

- (1) Nimm zwei gleich große Gurkengläser und einen dazu passenden Deckel.
- (2) Die Deckel der Gurkengläser wurden im Vorfeld präpariert, sodass ein Thermometer durch die Öffnung passt.
- (3) Hol die Wärmelampe vom Lehrer*innentisch und platziere alles auf deinem Tisch.
- (4) Gib die Thermometer so in die Gurkengläser, dass sie sich hinter den weißen Blättern befinden, damit die Wärmelampe nicht direkt auf das Thermometer scheint.
- (5) Führe eine Kalibration deines Experiments durch, um im ersten Durchgang sicherzugehen, dass beide Gläser durch die Lampe gleich erwärmt werden.
- (6) Lass die Temperatur in den Gläsern wieder auf Umgebungstemperatur abkühlen.
- (7) Fülle eines der beiden Gläser vorsichtig mit CO₂ und warte gegebenenfalls Temperaturänderungen durch die Zugabe des Gases ab.
- (8) Verschließe beide Gurkengläser und gib die Thermometer in die Gläser.
- (9) Starte anschließend die Messung mithilfe der Vernier Temperaturfühler und lass das Experiment für 10 -15 Minuten laufen.



Abbildung 20: Möglicher Aufbau für das Experiment.
Quelle: Eigene Aufnahme.

Arbeitsaufträge:

1. Welchen Einfluss hatte das CO₂-Gas auf den Temperaturverlauf?

In dem Gurkenglas mit mehr CO₂ kam es zu einem schnelleren Anstieg der Temperatur im Vergleich zum Gurkenglas mit der Umgebungsluft. Weiters sank die Temperatur nach dem Abschalten der Wärmequelle langsamer als in der „normalen“ Atmosphäre.

2. Zeichne die Valenzstrichformel eines CO₂-Moleküls inklusive der freien Elektronenpaare.

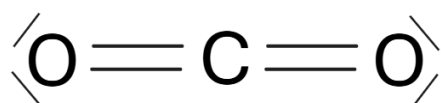


Abbildung 21: Darstellung CO₂-Molekül.
Quelle: Eigene Darstellung.

3. Recherchiere welche Treibhausgase es neben Kohlenstoffdioxid sonst noch gibt.

Die häufigsten Treibhausgase, sind Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) sowie die fluorierten Treibhausgase (FCKW's) (Umweltbundesamt, 2022)

4. Welchen Vergleich zwischen diesem Experiment und unserer Umwelt kannst du ziehen?

Ähnlich wie in unserer Atmosphäre befindet sich in einem Gürkenglas eine „normale“ Atmosphäre und im 2. Gürkenglas eine Atmosphäre mit einer höheren Konzentration an Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre.

5. Während der Messung: Recherchiere zur „Keeling-Curve“. Was zeigt sie an und warum kommt es auf dieser zu „Schwankungen“?

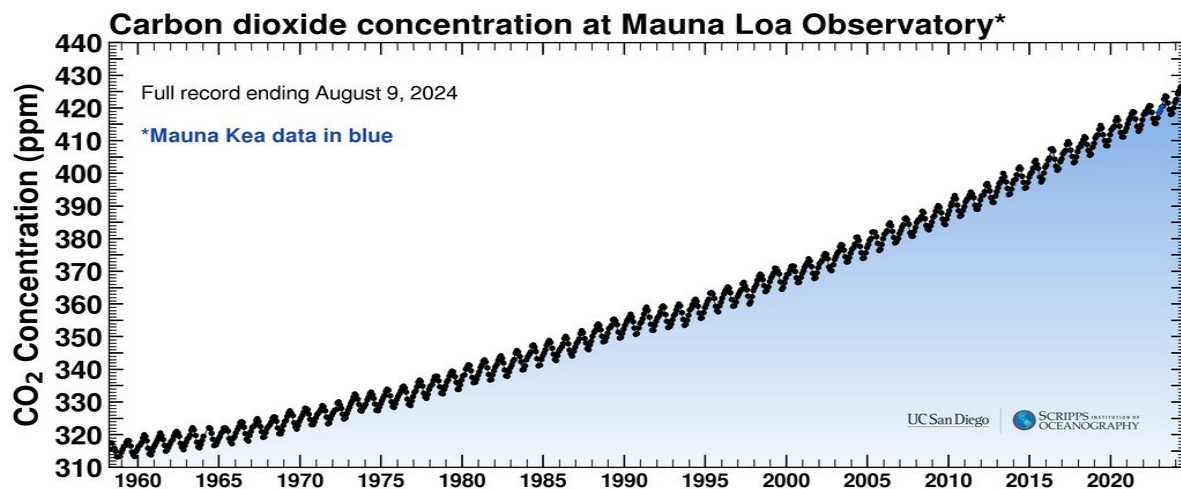


Abbildung 22 Monatliche Kohlenstoffdioxidkonzentration gemessen am Mauna Loa Observatory, Hawaii.
Quelle: Scripps Institution of Oceanography (o.J.).

Die saisonalen Schwankungen der CO_2 -Konzentration hängen mit den Jahreszeiten und der Vegetation auf der Nordhalbkugel zusammen. Im Herbst und Winter bauen Mikroorganismen abgefallene Blätter und Pflanzenmaterial ab, was zu einem Anstieg des Kohlenstoffdioxids in der Atmosphäre führt. Im Frühling, wenn neue Blätter gebildet werden und Pflanzen erneut verstärkt mit der Photosynthese beginnen, sinkt der CO_2 -Gehalt wieder. Der Höhepunkt der CO_2 -Konzentration in Mauna Loa wird im Mai erreicht, danach sinkt die Kurve wieder, was zu deren Zick-Zack-Muster führt. (Monroe, 2013)

6. Zeichne eine Grafik zum Temperaturverlauf der Gase in den beiden Gläsern.

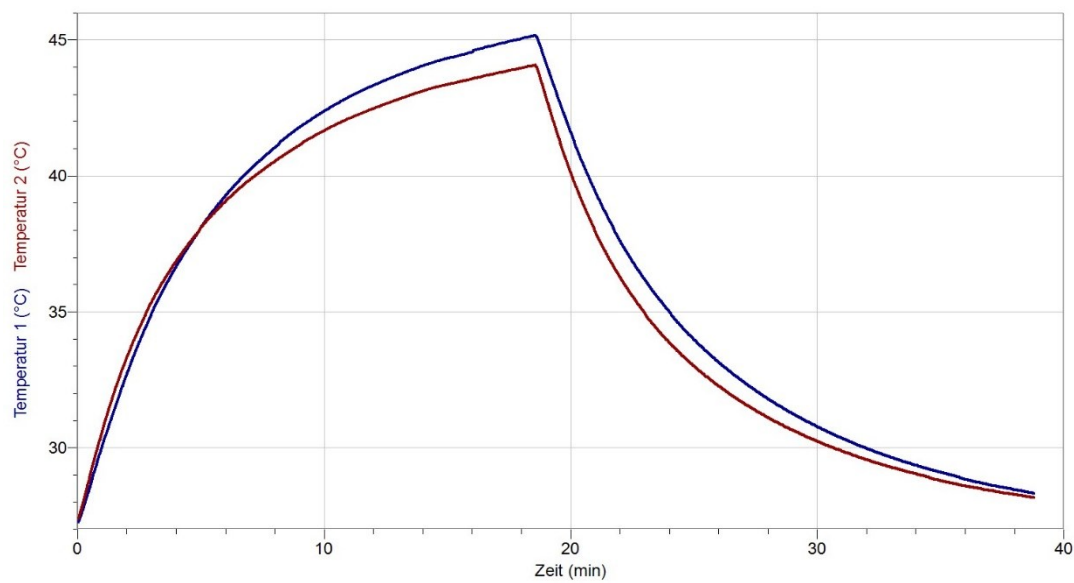


Abbildung 23: Temperaturverlauf des Experiments. In blau: Gürkenglas mit CO_2 . in rot: Gürkenglas ohne zusätzliches CO_2 . Quelle: Eigene Darstellung.

Entsorgung:

Keine Entsorgung notwendig.

(Adaptiert nach Vernier, o.J.)

4.7. Reduktion von Kupfer(II)-oxid

Beim Experiment zur Reduktion von Kupfer(II)-oxid wird neben dem *eigenständigen Planen, Durchführen, Dokumentieren und Interpretieren von Experimenten* auch das *Donator-Akzeptor-Konzept* vermittelt. Gleichzeitig lernen die Schülerinnen und Schüler den sicheren Umgang mit chemischen Materialien und Versuchsanordnungen.

Die Lernenden sollen die zugrunde liegende Redoxreaktion – inklusive der Aufstellung von Redox-Gleichungen und Halbgleichungen – erarbeiten, wodurch insbesondere das *Donator-Akzeptor-Konzept* (Oxidations- und Reduktionsmittel) veranschaulicht wird. Diese Herangehensweise unterstützt das Verständnis für *stoffliche Veränderungen und die Zusammenhänge zwischen Struktur und Eigenschaften von Stoffen*, wie es im Lehrplan gefordert wird. Weiterhin wird durch das präzise Abwiegen der Reaktanten und die quantitative Betrachtung der Reaktionsprodukte das *Größenkonzept* und die Fähigkeit zur *quantitativen Beschreibung von Stoff- und Energieumsätzen* geschult. Zudem wird mit dem Einsatz von Kalkwasser zur Bestätigung der Gasfreisetzung ein Bezug zur *Funktion und Vernetzung natürlicher und anthropogener Stoffkreisläufe* hergestellt, was das Verständnis für die Bedeutung chemischer Prozesse in globalen Zusammenhängen stärkt. Insgesamt ermöglicht dieses Experiment den Schülerinnen und Schülern nicht nur einen interdisziplinären Zugang, der theoretisches Chemiewissen mit praktischen Anwendungen verknüpft, sondern fördert auch *fächerübergreifende Kompetenzen* wie das Sammeln, Analysieren und kritische Hinterfragen von Daten sowie das präzise Formulieren wissenschaftlicher Argumentationen – Kompetenzen, die im Lehrplan der AHS-Oberstufe umfassend verankert sind.

Reduktion von Kupfer(II)-oxid

Materialien/Geräte:

- Kupfer(II)-oxid
- Reibschale
- Aktivkohle
- Reagenzglas (VWR)
- Ca(OH)_2 -Lösung
- Waage
- Bunsenbrenner
- Stativ
- Laborboy
- 100 mL Becherglas
- Stopfen + Schlauch

Arbeitsvorschrift:

- (1) Wiege 2g Kupfer(II)-oxid in einer Reibschale ein.
- (2) Wiege 0,2g Aktivkohle in ein Wägeschälchen und gib es anschließend zum Kupfer(II)-oxid.
- (3) Vermische die Stoffe sorgfältig miteinander und gib anschließend alles in ein Duran-Reagenzglas.
- (4) Befestige das Reagenzglas wie in der Abbildung dargestellt an dem Stativ.
- (5) Verschließe das Reagenzglas mit einem durchbohrten Gummistopfen.
- (6) Befülle ein 100 mL Becherglas zur Hälfte mit Kalkwasser (Ca(OH)_2).
- (7) Stelle das Reagenzglas so unter das Becherglas, dass der Glasstab des durchbohrten Gummistopfens in das Kalkwasser eintaucht.
- (8) Das Kupfer(II)-oxid-Aktivkohle-Gemisch wird mithilfe eines Bunsenbrenners erhitzt, bis es rot glüht.
- (9) **Nach Aufglühen des Reaktionsgemisches sofort den Stopfen lösen, da sich sonst das Kalkwasser in das Reagenzglas saugen kann.**

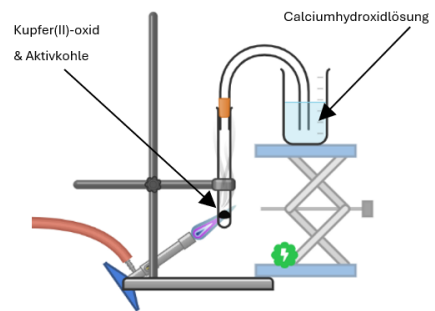


Abbildung 24: Aufbau Experiment.
Quelle: Eigene Darstellung.

Arbeitsaufträge:

1. Was konntest du bei der Calciumhydroxid-Lösung (Kalkwasser) beobachten und was hat sich gebildet?

2. Für welches Gas dient Kalkwasser als Nachweisreagenz?

3. Sieh dir nach dem Abkühlen die verbliebenen Feststoffe im Reagenzglas an. Was kannst du beobachten? Auf welchen Stoff weist die bräunlich/rote Farbe hin?

4. Welche beiden Stoffe sind bei diesem Experiment entstanden?
-

5. Stelle die Redox-Gleichung inklusive Halbgleichungen auf, die während des Experiments stattgefunden hat. Welcher Stoff dient als Reduktions- welcher als Oxidationsmittel?

Entsorgung:

Feststoffe und Kalkwasserlösung auf dem Lehrer*innentisch sammeln.

(Adaptiert nach Nöhles, o.J.)

Reduktion von Kupfer(II)-oxid - Lösung

Materialien/Geräte:

- Kupfer(II)-oxid
- Reibschale
- Aktivkohle
- Reagenzglas (VWR)
- Ca(OH)_2 -Lösung
- Waage
- Bunsenbrenner
- Stativ
- Laborboy
- 100 mL Becherglas
- Stopfen + Schlauch

Arbeitsvorschrift:

- (1) Wiege 2g Kupfer(II)-oxid in einer Reibschale ein.
- (2) Wiege 0,2g Aktivkohle in ein Wägeschälchen und gib es anschließend zum Kupfer(II)-oxid.
- (3) Vermische die Stoffe sorgfältig miteinander und gib anschließend alles in ein Duran-Reagenzglas.
- (4) Befestige das Reagenzglas wie in der Abbildung dargestellt an dem Stativ.
- (5) Verschließe das Reagenzglas mit einem durchbohrten Gummistopfen.
- (6) Befülle ein 100 mL Becherglas zur Hälfte mit Kalkwasser (Ca(OH)_2).
- (7) Stelle das Reagenzglas so unter das Becherglas, dass der Glasstab des durchbohrten Gummistopfens in das Kalkwasser eintaucht.
- (8) Das Kupfer(II)-oxid-Aktivkohle-Gemisch wird mithilfe eines Bunsenbrenners erhitzt, bis es rot glüht.
- (9) **Nach Aufglühen des Reaktionsgemisches sofort den Stopfen lösen, da sich sonst das Kalkwasser in das Reagenzglas saugen kann.**

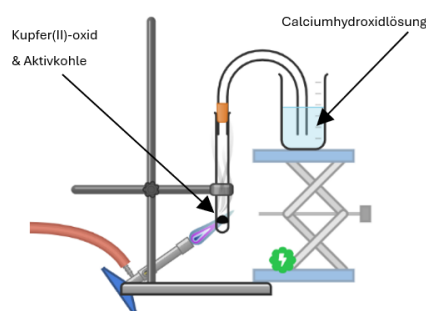


Abbildung 25: Aufbau Experiment.
Quelle: Eigene Darstellung.

Arbeitsaufträge:

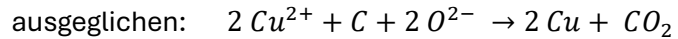
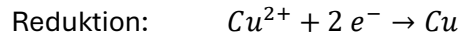
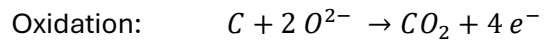
1. Was konntest du bei der Calciumhydroxid-Lösung (Kalkwasser) beobachten und was hat sich gebildet?
Die Lösung trübt sich, da sich schwerlösliches Calciumhydroxid bildet.
2. Für welches Gas dient Kalkwasser als Nachweisreagenz?
Kalkwasser kann man als Nachweisreagenz für CO_2 verwenden.
3. Sieh dir nach dem Abkühlen die verbliebenen Feststoffe im Reagenzglas an. Was kannst du beobachten? Auf welchen Stoff weist die bräunlich/rote Farbe hin?
Die braune Farbe deutet auf elementares Kupfer hin. (Abbildung unten)
4. Welche beiden Stoffe sind bei diesem Experiment entstanden?
Kohlenstoffdioxid und Kupfer

5. Stelle die Redox-Gleichung inklusive Halbgleichungen auf, die während des Experiments stattgefunden hat. Welcher Stoff dient als Reduktions- welcher als Oxidationsmittel?

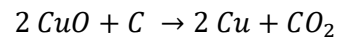


Abbildung 26: Überreste nach dem Aufglühen. Die rötlich/braune Färbung deutet auf elementares Kupfer hin.
Quelle: Eigene Aufnahme.

Halbgleichungen:



Gesamtreaktion:



Reduktionsmittel: Kohlenstoff (C)

Oxidationsmittel: Kupfer(II)-oxid (CuO)

Entsorgung:

Feststoffe über den Feststoffabfall entsorgen. Kalkwasser-Lösung neutralisieren und anschließend über den Ausguss entsorgen.

(Adaptiert nach Nöhles, o.J.)

4.8. Carbon Capture – Der Kohlenstoffdioxid-Handschuh

Durch die eigenständige Herstellung der NaOH-Lösung und die notwendigen Berechnungen zur Bestimmung der erforderlichen Feststoffmenge wird das *Größenkonzept* sowie die *quantitative Betrachtung von Stoffumsätzen (Stöchiometrie)* geübt. Weiterhin trägt der Versuch zur *Modellbildung* bei, indem die chemische Umwandlung von Kohlendioxid zu Kohlensäure und dessen Neutralisation durch Natronlauge in Form von ausgeglichenen Reaktionsgleichungen formuliert wird. Dies fördert das Verständnis des *Stoff-Teilchen-Konzepts* sowie des *Gleichgewichtskonzepts*. Die Erstellung und Interpretation solcher Reaktionsgleichungen verlangt den sicheren Einsatz der *fachspezifischen Terminologie*, was ein weiterer wesentlicher Bestandteil des Lehrplans ist. Zudem wird durch den Vergleich des experimentellen Vorgehens mit realen Carbon-Capture-Szenarien auch der Bezug zu *nachhaltigem Umgang mit materiellen und energetischen Ressourcen* sowie zu aktuellen globalen Umweltfragen hergestellt. Diese Verbindung von theoretischem Wissen mit praxisrelevanten, gesellschaftlich bedeutenden Problemlagen entspricht der im Lehrplan geforderten Anknüpfung an authentische und *fächerübergreifende Fragestellungen*. Insgesamt fördert das Experiment neben der Vermittlung von praktischem und theoretischem Chemiewissen auch *kritisches, systematisches und fächerübergreifendes Denken*, wodurch die Schülerinnen und Schüler in ihrer Fähigkeit gestärkt werden, chemische Prozesse zu analysieren, zu modellieren und in einen breiteren naturwissenschaftlichen Kontext einzuordnen.

Carbon Capture – Der Kohlenstoffdioxid-Handschuh

Materialien/Geräte

- Gurkenglas
- 4 mol/L NaOH-Lösung
- 100 mL Becherglas
- CO₂-Kartusche
- Waage
- NaOH-Plätzchen
- Glasstab
- Gummihandschuh
- Pinzette

Arbeitsvorschrift

- (1) Stelle 50 mL einer 4-molare NaOH-Lösung mithilfe von NaOH-Plätzchen her. **(NaOH-Plätzchen nur mit Pinzette berühren!)**
- (2) Berechne wie viel feste NaOH du benötigst, um die gewünschte Konzentration zu erreichen.
- (3) Löse die NaOH-Granalien in einem Becherglas.
- (4) Fülle das Gurkenglas vorsichtig mit CO₂ (durch einen Gasspender oder SodaStream).
- (5) Gib anschließend die 50 mL Natronlauge in das Gurkenglas und verschließe es luftdicht mit einem Gummihandschuh (siehe Abbildung).
- (6) Beobachte was passiert. Nach ein paar Minuten schüttle das Gurkenglas vorsichtig, sodass sich das gesamte CO₂ lösen kann.
- (7) Berühre das Gurkenglas vor/während/nach der Reaktion. Was fällt dir auf?



Abbildung 27:
übergestülpter
Handschuh auf
Marmeladenglas.
Quelle: Eigene
Aufnahme.

Arbeitsaufträge:

1. Berechne wie viel festes NaOH du für 50 mL einer 4-molaren Lösung einwiegen musst.
_____g.
2. Formuliere eine ausgeglichene Reaktionsgleichung samt Indizes (aq,l,g,s) zur Bildung von Kohlensäure aus Kohlenstoffdioxid und Wasser.

3. Formuliere eine ausgeglichene Reaktionsgleichung samt Indizes (aq,l,g,s) zur Neutralisation der Kohlensäure durch die Natronlauge.

4. Die Neutralisation von CO_2 durch die Natronlauge ist eine exotherme ☐ endotherme ☐ Reaktion.

5. Beschreibe, was mit dem Gummihandschuh während des Experiments passiert ist und erkläre, warum.

6. Im Experiment wurde in einem Miniaturmaßstab sogenanntes „Carbon Capture“ durchgeführt. Recherchiere was Carbon Capture bedeutet und in welchen Branchen diese Technologie angedacht wird.

Erläutere, warum du denkst, dass das (nicht) eine vielversprechende Technik für die Zukunft ist, um weniger CO_2 in unserer Atmosphäre zu haben.

Entsorgung:

Natronlauge auf dem Lehrer*innentisch sammeln.

(adaptiert nach Wachtler, 2022)

Carbon Capture – Der Kohlenstoffdioxid-Handschuh - Lösung

Materialien/Geräte

- Gurkenglas
- 4 mol/L NaOH-Lösung
- 100 mL Becherglas
- CO₂-Kartusche
- Waage
- NaOH-Plätzchen
- Glasstab
- Gummihandschuh
- Pinzette

Arbeitsvorschrift

- (1) Stelle 50 mL einer 4-molare NaOH-Lösung mithilfe von NaOH-Plätzchen her. (**NaOH-Plätzchen nur mit Pinzette berühren!**)
- (2) Berechne wie viel feste NaOH du benötigst, um die gewünschte Konzentration zu erreichen.
- (3) Löse die NaOH-Granalien in einem Becherglas.
- (4) Fülle das Gurkenglas vorsichtig mit CO₂ (durch einen Gasspender oder SodaStream).
- (5) Gib anschließend die 50 mL Natronlauge in das Gurkenglas und verschließe es luftdicht mit einem Gummihandschuh (siehe Abbildung).
- (6) Beobachte was passiert. Nach ein paar Minuten schüttle das Gurkenglas vorsichtig, sodass sich das gesamte CO₂ lösen kann.
- (7) Berühre das Gurkenglas vor/während/nach der Reaktion. Was fällt dir auf?



Abbildung 28:
übergestülpter
Handschuh auf
Marmeladenglas.
Quelle: Eigene
Aufnahme.

Arbeitsaufträge:

1. Berechne wie viel festes NaOH du für 50 mL einer 4-molaren Lösung einwiegen musst.

Berechnung zur Stoffmenge von NaOH:

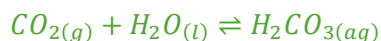
$$\begin{aligned}n &= c \cdot V \\n &= 4 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 0,050 \text{L} \\n &= 0,2 \text{ mol}\end{aligned}$$

Berechnung zur Masse von NaOH:

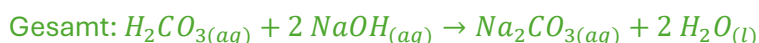
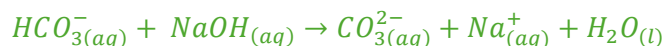
$$\begin{aligned}m_{\text{NaOH}} &= n \cdot M \\m_{\text{NaOH}} &= 0,2 \text{ mol} \cdot 40 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \\m_{\text{NaOH}} &= 8 \text{ g}\end{aligned}$$

Ergebnis: es müssen 8g NaOH eingewogen werden.

2. Formuliere eine ausgeglichene Reaktionsgleichung samt Indizes (aq,l,g,s) zur Bildung von Kohlensäure aus Kohlenstoffdioxid und Wasser.



3. Formuliere eine ausgeglichene Reaktionsgleichung samt Indizes (aq,l,g,s) zur Neutralisation der Kohlensäure durch die Natronlauge.



4. Die Neutralisation von CO_2 durch die Natronlauge ist eine exotherme ☒ endotherme ☐ Reaktion.
5. Beschreibe, was mit dem Gummihandschuh während des Experiments passiert ist und erkläre, warum.

Das Gurkenglas war zuerst mit Natronlauge und CO_2 -Gas gefüllt. Durch das Schütteln kam es zur Bildung von Kohlensäure aus Wasser und dem CO_2 -Gas. Durch die Neutralisationsreaktion zwischen Kohlensäure und Natronlauge wurde ständig neue Kohlensäure aufgebraucht, wodurch immer mehr CO_2 -Gas aufgebraucht wurde. Dadurch entwickelte sich ein Unterdruck im Gurkenglas und der Handschuh zieht sich hinein. Durch das Hineinziehen des Handschuhs in das Gurkenglas konnte dieser Unterdruck visuell beobachtet werden. Weiters kam es zu einer gut fühlbaren exothermen Reaktion während der Neutralisation von Natronlauge und Kohlensäure.

6. Im Experiment wurde in einem Miniaturmaßstab sogenanntes „Carbon Capture“ durchgeführt. Recherchiere was Carbon Capture bedeutet und in welchen Branchen diese Technologie angedacht wird.

Erläutere, warum du denkst, dass das (nicht) eine vielversprechende Technik für die Zukunft ist, um weniger CO_2 in unserer Atmosphäre zu haben.

Carbon Capture and Storage (CCS) bezeichnet Technologien, bei denen Kohlendioxid direkt bei industriellen Prozessen oder Kraftwerken abgeschieden, aufgefangen oder gespeichert (CCS) oder in manchen Fällen auch weiterverwertet (Carbon Capture and Utilisation CCU) wird. CCS zielt darauf ab, die Freisetzung von CO_2 in die Atmosphäre zu verringern, indem CO_2 dauerhaft gespeichert wird. CCS und CCU kann vor allem in Sektoren wie der Stahl-, Zement-, oder chemischen Industrie dabei helfen den CO_2 -Ausstoß zu verringern. Nichtsdestotrotz sind die Maßstäbe in denen CCS und CCU derzeit vorhanden oder geplant sind, viel zu gering, um einen Einfluss auf die großen Mengen an CO_2 zu haben. (Greenfield, Budinis & Fajardy, 2024)

Entsorgung:

Natronlauge neutralisieren und anschließend über den Ausguss entsorgen.

(adaptiert nach Wachtler, 2022)

5. Fazit

Der Treibhauseffekt ist in seiner natürlichen Form eine Voraussetzung für das Leben auf der Erde. Erst durch ihn konnten sich stabile Umweltbedingungen entwickeln, die die Entstehung und Entwicklung menschlicher Zivilisation ermöglichten. Seit der industriellen Revolution hat der Mensch jedoch durch die massive Nutzung fossiler Energieträger, Abholzung und andere Eingriffe das natürliche Gleichgewicht gestört. Die jährlichen Kohlendioxidemissionen liegen inzwischen weit über der Speicherkapazität natürlicher Senken, was zu einem kontinuierlichen Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur führt. Die Folgen sind bereits heute in Form von Extremwetterereignissen, dem Rückgang von Gletschern und Polareis sowie einem steigenden Meeresspiegel sichtbar. Um diese Entwicklungen einzudämmen, ist die Einhaltung des Pariser Klimaziels, die Begrenzung der Erwärmung auf maximal 1,5 °C, von zentraler Bedeutung.

Technologische Ansätze wie Carbon Capture and Storage (CCS) sowie Carbon Capture and Utilization (CCU) können dabei eine unterstützende Rolle spielen. Während CCS die dauerhafte geologische Speicherung von CO₂ ermöglicht, nutzt CCU das abgeschiedene Gas als Ressource für chemische Plattformmoleküle oder alternative Energieträger. Beide Ansätze entfalten ihr Potenzial jedoch nur, wenn sie in ein vollständig dekarbonisiertes Energiesystem eingebettet sind, das auf erneuerbare Energien und grünen Wasserstoff setzt. Bei den derzeitigen globalen Emissionsmengen können CCS- und CCU-Anlagen allein nur einen geringen Anteil der Klimaproblematik lösen. Sie sind kein Allheilmittel, sondern müssen als Teil eines umfassenden Maßnahmenportfolios verstanden werden, das neben technologischen Innovationen vor allem auf Emissionsvermeidung und den Ausbau erneuerbarer Energien setzt. Langfristig können CCS und CCU dennoch wichtige Beiträge leisten, indem sie schwer vermeidbare Emissionen ausgleichen, den Wandel energieintensiver Industrien begleiten und durch die Substitution fossiler Rohstoffe neue Wertschöpfungsketten eröffnen.

Die Relevanz dieser Thematik für den Chemieunterricht der Sekundarstufe II liegt auf der Hand. Experimente zu Kohlenstoffdioxid ermöglichen nicht nur ein tieferes Verständnis naturwissenschaftlicher Basiskonzepte, sondern schlagen auch eine Brücke zu aktuellen gesellschaftlichen und ökologischen Fragestellungen. Sie verdeutlichen

Schülerinnen und Schülern die Vielseitigkeit dieses Stoffes, machen seine Eigenschaften und Reaktionen erfahrbar und regen zugleich zur kritischen Auseinandersetzung mit globalen Herausforderungen wie Klimawandel, Nachhaltigkeit und Ressourcennutzung an.

Die Forschungsfrage, zu welchen Themengebieten des österreichischen Chemielehrplans Experimente zu Kohlenstoffdioxid eingebunden werden können, lässt sich eindeutig beantworten: Nahezu alle zentralen Lehrplankompetenzen der 7. Klasse der Sekundarstufe II können anhand geeigneter Experimente abgedeckt werden. Dazu gehören das Stoff-Teilchen-Konzept, die Stoffumwandlung, das Struktur-Eigenschafts-Konzept, Gleichgewichtsvorgänge wie das Prinzip von Le Chatelier, das Donator-Akzeptor-Konzept zum Beispiel in Form von Säure-Base-Reaktionen oder Redoxreaktionen, empirisches Arbeiten sowie die Modellbildung. Darüber hinaus fördern die Experimente methodische Kompetenzen wie das präzise Planen, Durchführen, Dokumentieren und Interpretieren von Experimenten sowie den sicheren Umgang mit Chemikalien. Sie tragen zu einer vertieften Anwendung fachspezifischer Terminologie und zur quantitativen Beschreibung von Stoff- und Energieumsätzen bei. Zugleich ermöglichen sie fächerübergreifendes Lernen, indem sie Anknüpfungspunkte zur Biologie, Physik, Geographie und Politischen Bildung eröffnen.

Insgesamt wird deutlich, dass sich Experimente zu Kohlenstoffdioxid nicht nur hervorragend in den österreichischen Chemielehrplan integrieren lassen, sondern auch eine hohe didaktische Relevanz besitzen. Sie verbinden theoretisches Fachwissen mit lebensweltlichen Bezügen, unterstützen situiertes und interdisziplinäres Lernen und fördern Verantwortungsbewusstsein sowie kritische Reflexion. Damit leisten sie einen wichtigen Beitrag zur naturwissenschaftlichen Grundbildung und zur Bildung für nachhaltige Entwicklung. Die Arbeit zeigt somit, dass Chemieunterricht, sinnvoll gestaltet, nicht nur Wissen vermittelt, sondern auch zur aktiven Auseinandersetzung mit den drängenden Fragen unserer Zeit befähigt.

6. Literaturverzeichnis

Bernhard, A. (2010). The nitrogen cycle: Processes, players, and human impact. *Nature Education Knowledge*, 3(10), 25. Abgerufen am 8. August 2024, von <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-nitrogen-cycle-processes-players-and-human-15644632/>

Bruhwyler, L., Michalak, A. M., Birdsey, R., Fisher, J. B., Houghton, R. A., Huntzinger, D. N., & Miller, J. B. (2018). Overview of the global carbon cycle. In N. Cavallaro, G. Shrestha, R. Birdsey, M. A. Mayes, R. G. Najjar, S. C. Reed, P. Romero-Lankao, & Z. Zhu (Hrsg.), *Second state of the carbon cycle report (SOCCR2): A sustained assessment report* (S. 42–70). U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/SOCCR2.2018.Ch1>. Abgerufen am 28. August 2025, von <https://web.archive.org/web/20230605000000/https://carbon2018.globalchange.gov>

Bruice, P. Y., & Reiser, O. (2011). *Organische Chemie – Studieren kompakt* (5., aktualisierte Aufl.). Pearson Studium.

Bullister, J. L., & Warner, M. J. (2017). Atmospheric histories (1765–2022) for CFC-11, CFC-12, CFC-113, CCl₄, SF₆ and N₂O (NCEI Accession 0164584) [Datensatz]. NOAA National Centers for Environmental Information. Abgerufen am 23. August 2024, von https://doi.org/10.3334/cdiac/otg.cfc_atm_hist_2015

Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBWF). (o.J.). *Schulorganisationsgesetz (SchOG), BGBl. Nr. 242/1962, in geltender Fassung*. Abgerufen am 31. August 2025, von <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568>

Bundesministerium für Finanzen & Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. (2024). *Österreichische Carbon Management Strategie (CMS)* (Stand: 3. Juli 2024).

Canadell, J. G., Monteiro, P. M. S., Costa, M. H., Cotrim da Cunha, L., Cox, P. M., Eliseev, A. V., Henson, S., Ishii, M., Jaccard, S., Koven, C., Lohila, A., Patra, P. K., Piao, S., Rogelj, J., Syampungani, S., Zaehle, S., & Zickfeld, K. (2021). Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Hrsg.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the*

Intergovernmental Panel on Climate Change (S. 673–816). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896.007>

Chauvy, R., & De Weireld, G. (2020). CO₂ utilization technologies in Europe: A short review. *Energy Technology*, 8(12), 2000627. <https://doi.org/10.1002/ente.202000627>

Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R. B., Piao, S., & Thornton, P. (2013). Carbon and other biogeochemical cycles. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Hrsg.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M. C., Frame, D., Mahowald, N., & Winther, J.-G. (2013). Introduction. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Hrsg.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Davies, E. (2022). Acid in our oceans. *Royal Society of Chemistry*. Abgerufen am 5. Februar 2025, von <https://edu.rsc.org/feature/ocean-acidification/4015135.article>

Dhakal, S., Minx, J. C., Toth, F. L., Abdel-Aziz, A., Figueroa Meza, M. J., Hubacek, K., Jonckheere, I. G. C., Kim, Y.-G., Nemet, G. F., Pachauri, S., Tan, X. C., & Wiedmann, T. (2022). Emissions trends and drivers. In P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, & J. Malley (Hrsg.), *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.004>

Dziejarski, B., Krzyżyńska, R., & Andersson, K. (2023). Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment. *Fuel*, 342, 127776. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127776>

Ekemezie, I. O., & Digitemie, W. N. (2024). Carbon capture and utilization (CCU): A review of emerging applications and challenges. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(3), 949–961. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i3.949>

Fang, S., & Hu, Y. H. (2023). Annual progress in global carbon capture, utilization, and storage in 2023. *Energy Science & Engineering*, 11(8), 2916–2934. <https://doi.org/10.1002/ese3.1846>

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D. C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., & Van Dorland, R. (2007). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, & H. L. Miller (Hrsg.), *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 129–234). Cambridge University Press.

García, J. A., Villén Guzmán, M., Rodríguez Maroto, J. M., & Paz García, J. M. (2022). Technical analysis of CO₂ capture pathways and technologies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), 108470. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108470>

Geldsetzer, F. (2024). Treibhauseffekt. In F. Böckler, B. Dill, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, P. Heretsch, R. Matissek, G. Pohnert, A. Rühling, S. Schmidt, & G. Sprenger (Hrsg.), *RÖMPP [Online]*. Georg Thieme Verlag. Abgerufen am 7. August 2024, von <https://roempp-thieme-de.uaccess.univie.ac.at/lexicon/RD-20-02558>

Global CCS Institute. (2024). *Global Status of CCS Report 2024*. Abgerufen am 9. August 2025, von <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>

Greenfield, C., Budinis, S., & Fajardy, M. (2024). *CO₂ transport and storage*. International Energy Agency (IEA). Abgerufen am 15. April 2025, von <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/co2-transport-and-storage#tracking>

Gulev, S. K., Thorne, P. W., Ahn, J., Dentener, F. J., Domingues, C. M., Gerland, S., Gong, D., Kaufman, D. S., Nnamchi, H. C., Quaas, J., Rivera, J. A., Sathyendranath, S., Smith, S. L., Trewin, B., von Schuckmann, K., & Vose, R. S. (2021). Changing state of the climate system. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Hrsg.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 287–422). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.004>

Gulev, S. K., Thorne, P. W., Ahn, J., Dentener, F. J., Domingues, C. M., Gerland, S., Gong, D., Kaufman, D. S., Nnamchi, H. C., Quaas, J., Rivera, J. A., Sathyendranath, S., Smith, S. L., Trewin, B., von Schuckmann, K., & Vose, R. S. (2019). Changing state of the climate system.

Atmospheric Chemistry and Physics, 19(3), 2149–2191. <https://doi.org/10.5194/acp-19-2149-2019>

Hanson, E., Nwakile, C., & Hammed, V. O. (2024). Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies: Evaluating the effectiveness of advanced CCUS solutions for reducing CO₂ emissions. *Results in Surface and Interface Science*, 9, 100381. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2024.100381>

IEAGHG. (2010, August). *Development of a global CO₂ pipeline infrastructure* (2010/13). International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (1990). *Climate change: The IPCC scientific assessment* (J. T. Houghton, G. J. Jenkins, & J. J. Ephraums, Hrsg.). Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, R. K. Pachauri, & L. A. Meyer, Hrsg.). IPCC.

International Energy Agency (IEA). (2019). *Putting CO₂ to use*. IEA. https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting_CO2_to_Use.pdf

International Energy Agency (IEA). (2020). *CCUS in clean energy transitions*. IEA. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV). (o.J.). *Kohlendioxid*. GESTIS-Stoffdatenbank. Abgerufen am 5. Februar 2025, von <https://gestis.dguv.de/data?name=001120#0600>

Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson, T., & Prather, M. (2007). Historical overview of climate change science. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, & H. L. Miller (Hrsg.), *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Linde. (2023-a). *Sicherheitsdatenblatt: Ammoniak, wasserfrei* (Version 2.0, SDS Nr. 000010021772). Linde Gas. https://produkte.linde-gas.at/sdb_konform/NH3_10021772DE.pdf

Linde. (2023-b). *Sicherheitsdatenblatt: Stickstoff, verdichtet* (Version 1.6, SDS Nr. 000010021697). Linde Gas. https://produkte.linde-gas.at/sdb_konform/N2_10021697DE.pdf

Lindsey, R., & Dahlman, L. (2025, 29. Mai). Climate change: Global temperature. *NOAA Climate.gov*. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>

Lv, B., Guo, B., Zhou, Z., & Jing, G. (2015). Mechanisms of CO₂ capture into monoethanolamine solution with different CO₂ loading during the absorption/desorption processes. *Environmental Science & Technology*, 49(19), 11728–11735. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02356>

Magyar, R., Liebhart, W., Jelinek, G., Faber, W., & Strnad, A. (2020). *EL-MO: Elemente und Moleküle*. Österreichischer Bundesverlag Schulbuch GmbH & Co. KG.

Messer. (2020). *Sicherheitsdatenblatt: Kohlendioxid* (Version 5.1, SDB Referenz: AT-CO₂-018A). Messer Group. https://www.messer.at/documents/640492/4310825/Gourmet_C_de.pdf/2af50bfd-3cf3-94fa-eef3-dd2c6ec87503?t=1606375910957

Meunier, N., Chauvy, R., Mouhoubi, S., Thomas, D., & De Weireld, G. (2020). Alternative production of methanol from industrial CO₂. *Renewable Energy*, 146, 1192–1203. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.010>

Monroe, R. (2013, 4. Juni). Why does atmospheric CO₂ peak in May? *The Keeling Curve*. Abgerufen am 14. April 2025, von <https://keelingcurve.ucsd.edu/2013/06/04/why-does-atmospheric-co2-peak-in-may/>

Mortimer, C., & Müller, U. (Hrsg.). (2019). Anhang. In *Chemie* (13. Aufl.). Thieme. <https://doi.org/10.1055/b-0039-172003>

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestad, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., & Zhang, H. (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Hrsg.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

NASA. (o.J.-a). Carbon dioxide. *NASA Climate Change*. Abgerufen am 8. August 2024, von <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/?intent=121>

NASA. (o.J.-b). Methane. *NASA Climate Change*. Abgerufen am 21. August 2024, von <https://climate.nasa.gov/vital-signs/methane/?intent=121>

Nöhles, J. (o.J.). Reduktion von Kupferoxid durch Kohlenstoff. *Unterrichtsmaterialien Chemie*, Universität Göttingen. Abgerufen am 17. Mai 2024, von http://www.unterrichtsmaterialien-chemie.uni-goettingen.de/exp_neu.php?id=1050

Raho, B., Giangreco, M., Colangelo, G., Milanese, M., & de Risi, A. (2024). Technological, economic, and emission analysis of the oxy-combustion process. *Applied Energy*, 378, 124821. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124821>

Rahmani, Z., & Ahmadi, J. (2024). The impact of human activities on climate change. *Sprink Journal of Arts, Humanities and Social Sciences*, 3(6), 24–27. <https://doi.org/10.55559/sjahss.v3i6.362>

Ravishankara, A. R., Daniel, J. S., & Portmann, R. W. (2009). Nitrous Oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, 326(5949), 123–125. <https://doi.org/10.1126/science.1176985>

Rhein, M., Rintoul, S. R., Aoki, S., Campos, E., Chambers, D., Feely, R. A., Gulev, S., Johnson, G. C., Josey, S. A., Kostianoy, A., Mauritzen, C., Roemmich, D., Talley, L. D., & Wang, F. (2013). Observations: Ocean. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Hrsg.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Riedel, K., & Lassey, K. (2008). Atmospheric chemistry – “Detergent of the atmosphere.” *Water & Atmosphere*, 16(1), 22–23.

Saunois, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Raymond, P. A., Dlugokencky, E. J., Houweling, S., Patra, P. K., Ciais, P., Arora, V. K., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D. R., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, K. M., Carrol, M., ... Zhuang, Q. (2020). The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12(3), 1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>

Schilling, C. (2016). *Chemisches Gleichgewicht* (Schulversuchspraktikum, Klassenstufen 11 & 12, Sommersemester 2016). Universität Göttingen. Abgerufen am 5. Februar 2025, von <https://unterrichtsmaterialien-chemie.uni-goettingen.de/material/11-12/V11-540.pdf>

Schmidkunz, H., & Rentzsch, W. (2024). *Chemische Freihandversuche – Band 1*. Aulis Verlag.

Sieve, B., Struckmeier, S., & Böhm, D. (2022). *Experimente im Chemieunterricht Band 1: Didaktisch begründet auswählen und sicher durchführen* (1. Aufl.). Springer Spektrum.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-63905-4>

Sieve, B., Struckmeier, S., & Böhm, D. (2024). *Experimente im Chemieunterricht Band 2: Didaktisch begründet auswählen und sicher durchführen* (1. Aufl.). Springer Spektrum.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-67814-5>

Talei, S., Fozer, D., Varbanov, P. S., Szanyi, A., & Mizsey, P. (2024). Oxyfuel combustion makes carbon capture more efficient. *ACS Omega*, 9(3), 3250–3261.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05034>

ter Horst, N. (o. J.). Die alkoholische Gärung. *Unterrichtsmaterialien Chemie*, Universität Göttingen. Abgerufen am 5. Februar 2025, von http://www.unterrichtsmaterialien-chemie.uni-goettingen.de/exp_neu.php?id=1318

Tian, H., Pan, N., Thompson, R. L., Canadell, J. G., Suntharalingam, P., Regnier, P., Davidson, E. A., Prather, M., Ciais, P., Muntean, M., Pan, S., Winiwarter, W., Zaehle, S., Zhou, F., Jackson, R. B., Bange, H. W., Berthet, S., Bian, Z., Bianchi, D., ... Zhu, Q. (2024). Global nitrous oxide budget (1980–2020). *Earth System Science Data*, 16(6), 2543–2604.
<https://doi.org/10.5194/essd-16-2543-2024>

Thiedemann, T. M., & Wark, M. (2025). A compact review of current technologies for carbon capture as well as storing and utilizing the captured CO₂. *Processes*, 13(1), 283.
<https://doi.org/10.3390/pr13010283>

Umweltbundesamt. (2017). *1987–2017: 30 Jahre Montrealer Protokoll*. Abgerufen am 9. August 2024, von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/1987_-_2017_30_jahre_montrealer_protokoll_bf.pdf

Umweltbundesamt. (2021). *Klima und Treibhauseffekt*. Abgerufen am 8. August 2024, von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/klima-treibhauseffekt#grundlagen>

Umweltbundesamt. (2022). *Die Treibhausgase*. Abgerufen am 14. April 2025, von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>

Umweltbundesamt. (2024-a). *Klimaschutzbericht 2024 (REP-0913)*. Abgerufen am 8. August 2024, von <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0913.pdf>

Umweltbundesamt. (2024-b). *Meere unter Druck – Ozeanversauerung durch CO₂*. Abgerufen am 5. Februar 2025, von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/meere/nutzung-belastungen/meere-unter-druck-ozeanversauerung-durch-co2>

U.S. Energy Information Administration (EIA). (o. J.). *Glossary – R*. U.S. Department of Energy. Abgerufen am 10. August 2025, von <https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=R>

Valve World Americas Publisher. (2025, 22. April). Petrobras breaks record for CO₂ reinjection in pre-salt. *Valve World Americas*. Abgerufen am 9. August 2025, von <https://valve-world.net/petrobras-breaks-record-for-co2-reinjection-in-pre-salt/>

Vernier. (o.J.). The greenhouse effect (Experiment #3). In *Middle school science with Vernier*. Vernier Software & Technology. Abgerufen am 5. Februar 2025, von <https://www.vernier.com/product/middle-school-science-with-vernier/>

Wachtler, H. (2022). Der Kohlenstoffdioxid-Handschuh. *Chemie & Schule*, 2022(3), 12–13.

Wadhams, P. (2020). Der Treibhauseffekt. In P. Wadhams (Hrsg.), *Abschied vom Eis: Ein Weckruf aus der Arktis* (S. 75–101). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-60662-9_5

Zhang, L., Song, Y., Shi, J., Liu, B., Zhao, Y., & Lu, X. (2022). Frontiers of CO₂ capture and utilization (CCU) towards carbon neutrality. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(8), 1252–1270. <https://doi.org/10.1007/s00376-022-1467-x>

Zhang, Z., Pan, S.-Y., Li, H., Cai, J., Olabi, A. G., Anthony, E. J., & Manovic, V. (2020). Recent advances in carbon dioxide utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125, 109799. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109799>

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2023). *The atmospheric window*. NOAA JetStream. Abgerufen am 08.August.2024, von <https://www.noaa.gov/jetstream/satellites/absorb>

Abbildung 2:

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Summary for policymakers. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, & J. C. Minx (Hrsg.), *Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Abbildung 3:

Scripps Institution of Oceanography. (o.J.). *The Keeling Curve*. Abgerufen am 11.August.2024, von <https://keelingcurve.ucsd.edu/>

Abbildung 4:

Scripps Institution of Oceanography. (o.J.). *The Keeling Curve*. Abgerufen am 12.August.2024, von <https://keelingcurve.ucsd.edu/>

Abbildung 5:

Jackson, R., Saunio, M., Canadell, J., Poulter, B., Stavert, A., Bergamaschi, P., Niwa, Y., Segers, A. J., & Tsuruta, A. (2020). Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. *Environmental Research Letters*, 15, 071002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2>

Abbildung 6:

Bernhard, A. (2010). The nitrogen cycle: Processes, players, and human impact. *Nature Education Knowledge*, 3(10), 25. Abgerufen am 8. August 2024, von <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-nitrogen-cycle-processes-players-and-human-15644632/>

Abbildung 7:

Bullister, J. L., & Warner, M. J. (2017). Atmospheric histories (1765-2022) for CFC-11, CFC-12, CFC-113, CCl₄, SF₆ and N₂O (NCEI Accession 0164584) [Data set]. NOAA National Centers for Environmental Information. Abgerufen am 23. August 2024, von https://doi.org/10.3334/cdiac/otg.cfc_atm_hist_2015

Abbildung 8:

Parmesan, C., Morecroft, M. D., Trisurat, Y., Adrian, R., Anshari, G. Z., Arneth, A., Gao, Q., Gonzalez, P., Harris, R., Price, J., Stevens, N., & Talukdar, G. H. (2022). Figure 2.12. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama (Hrsg.), *Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 197–377). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.004>

Abbildung 9:

Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R. B., Piao, S., & Thornton, P. (2013). Carbon and other biogeochemical cycles. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Hrsg.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Abbildung 10:

Thiedemann, T. M., & Wark, M. (2025). A compact review of current technologies for carbon capture as well as storing and utilizing the captured CO₂. *Processes*, 13(1), 283. <https://doi.org/10.3390/pr13010283>

Abbildung 11:

Dziejarski, B., Krzyżyńska, R., & Andersson, K. (2023). Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment. *Fuel*, 342, 127776. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127776>

Abbildung 12:

Eigene Darstellung

Abbildung 13:

Eigene Darstellung

Abbildung 14:

Eigene Darstellung

Abbildung 15:

Eigene Darstellung

Abbildung 16:

ter Horst, N. (o. J.). *Die Alkoholische Gärung*. Unterrichtsmaterialien Chemie, Universität Göttingen. Abgerufen am 5. Februar 2025, von http://www.unterrichtsmaterialien-chemie.uni-goettingen.de/exp_neu.php?id=1318

Abbildung 17:

ter Horst, N. (o. J.). *Die Alkoholische Gärung*. Unterrichtsmaterialien Chemie, Universität Göttingen. Abgerufen am 5. Februar 2025, von http://www.unterrichtsmaterialien-chemie.uni-goettingen.de/exp_neu.php?id=1318

Abbildung 18:

Xato. (2008). *Bromthymolblau pH* [Bild]. Wikimedia Commons. Abgerufen am 15. April 2025, von https://de.wikipedia.org/wiki/Bromthymolblau#/media/Datei:Bromthymolblau_ph.png

Abbildung 19:

Eigene Aufnahme

Abbildung 20:

Eigene Aufnahme

Abbildung 21:

Eigene Darstellung

Abbildung 22:

Scripps Institution of Oceanography. (o.J.). *The Keeling Curve*.
Abgerufen am 11. August 2024, von <https://keelingcurve.ucsd.edu/>

Abbildung 23:

Eigene Darstellung

Abbildung 24:

Eigene Darstellung

Abbildung 25:

Eigene Darstellung

Abbildung 26:

Eigene Aufnahme

Abbildung 27:

Eigene Darstellung

Abbildung 28:

Eigene Darstellung

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 GWP Potential:

IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Hrsg.)]. IPCC.

Tabelle 2 Auflistung der Experimente mit Übersicht zur Aufgabenstellung und didaktischem Schwerpunkt, basierend auf den in Kapitel 4 beschriebenen Experimenten.

Tabelle 3 Auflistung der benötigten Chemikalien und Geräte für die in Kapitel 4 beschriebenen Experimente.

9. Verwendete Hilfsmittel

Im Zuge der Erstellung dieser Masterarbeit wurden KI-gestützte Sprachmodelle (z. B. ChatGPT) ausschließlich als Hilfsmittel zur sprachlichen Optimierung sowie zur Übersetzung fachlicher Begriffe aus dem Englischen herangezogen. Inhaltliche Entscheidungen, Analysen und Schlussfolgerungen wurden ausnahmslos eigenständig getroffen. Es wurden keine inhaltlichen Aussagen der KI ungeprüft übernommen oder als Quelle verwendet. Sämtliche in dieser Arbeit dargestellten Inhalte und Ergebnisse beruhen ausschließlich auf der angegebenen und überprüften wissenschaftlichen Literatur.