
What to do with CO₂?

-

Iterative Entwicklung und Erprobung einer bilingual englischen Schülerlaboreinheit mit dem Fokus auf Carbon Capture and Storage als Beitrag zur Bildung für nachhaltige Entwicklung

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Doktorgrades

Doktor der Erziehungswissenschaften (Dr. paed.)

eingereicht an der Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften
der Bergischen Universität Wuppertal

von
Elisabeth Kiesling (geb. Sieg)
geboren in Dresden

Wuppertal, Juli 2025

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit vom Februar 2019 bis Juli 2025 im Arbeitskreis Didaktik der Chemie der Bergischen Universität Wuppertal unter der Leitung von Frau Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde.

Erstgutachterin:
Zweitgutachter:

Frau Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde
Herr Prof. Dr. Michael W. Tausch

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig im Arbeitskreis Didaktik der Chemie unter der Leitung von Frau Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde durchgeführt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtlich oder inhaltlich übernommene Stellen habe ich als solche kenntlich gemacht. Weiterhin erkläre ich, dass die Dissertation weder in der gegenwärtigen noch einer anderen Fassung einem anderen Fachbereich einer wissenschaftlichen Hochschule vorgelegen hat.

Wuppertal, den

(Elisabeth Kiesling)

Danksagung

Mein erster Dank gilt meiner Doktormutter Frau Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde für ihre herzliche Aufnahme in den Arbeitskreis. Ebenso dankbar bin ich für ihre Förderung, das mir entgegengebrachte Vertrauen, sowie die vielen konstruktiven Vorschläge und Ideen.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Michael W. Tausch für seine Bereitschaft, diese Arbeit zu begutachten. Die in seiner Forschung entwickelten Lehrwerke, Arbeitsmaterialien und Animationen, haben meinen Berufsalltag als Lehrerin immer bereichert.

Auch bedanke ich mich bei allen aktiven und ehemaligen Mitgliedern des Arbeitskreises Bohrmann-Linde für die kollegiale Unterstützung während meiner Arbeit. Besonderer Dank gilt namentlich meinen Bürokolleginnen Dr. Jana Hübner und Dr. Yasemin Gökkuş, die mir immer mit Rat, Tat und Unterstützung beiseite standen und stehen. Dr. Nico Meuter danke ich für die Unterstützung bei der Videoproduktion und für seine Tipps zu experimentellen Aufbauten. Bei Dr. Diana Zeller und Dr. Rebecca Grandrath bedanke ich mich besonders für die vielen aufbauenden Gespräche im Büro und auf dem Flur. Außerdem möchte ich meinem lieben Kollegen Dr. Julian Venzlaff für seine positive Art, die tollen gemeinsamen Gespräche, sowie die unkomplizierte und sehr produktive Zusammenarbeit bei Umfragen, Vorträgen und Workshops danken. Weiterer Dank gilt den neuesten Mitgliedern im Arbeitskreis Bohrmann-Linde Helen Wenz und Christopher Palm, sowie allen ehemaligen und gegenwärtigen studentischen Hilfskräften, die mich im Labor und bei vielen anderen Aufgaben unterstützt haben. Dabei möchte ich im Besonderen Judith Laufer für ihre Kreativität und Kompetenz bei der Gestaltung der digitalen Lernbegleiter und ihre zwei Jahre andauernde Unterstützung bei der Betreuung des Laborangebots danken.

Mein Dank gilt außerdem allen Unterstützern, die als Lehrkräfte, Studierende und Schülerinnen und Schülern an Projekten, Befragungen und Evaluationen teilgenommen haben. Besonders hervorheben möchte ich Adrian Otte, Jana Vierschilling und Isabell Meyer, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten und Praxissemesterberichte Materialien und Experimente erprobt und damit wertvolle Impulse und Ergebnisse für die Weiterentwicklung des Dissertationsprojekts gegeben haben. Allen Studierenden, die ich an der BUW unterrichten und kennlernen durfte, danke ich für den stets freundlichen und produktiven Austausch innerhalb der diversen Lehrveranstaltungen und in persönlichen Gesprächen.

Die ersten drei Jahre meiner Promotion absolvierte ich in einer Teilabordnung an die Universität. Dies wäre ohne die Unterstützung meiner damaligen Schulleitung und meiner Kolleginnen und Kollegen des Rurtal-Gymnasiums in Düren nicht realisierbar gewesen. Bei ihnen möchte ich mich für die Möglichkeit bedanken, dass ich diesen etwas anderen Weg einschlagen und weitergehen konnte. Mein Dank gilt außerdem dem Fonds der Chemischen Industrie, der das Projekt im Rahmen der Mentoring-Förderung in den Jahren 2023-2025 gefördert hat.

Schließlich bedanke ich mich von ganzem Herzen bei meiner Mama Corinna und bei Rainer, für ihre stetige Wärme, Zuspruch und Unterstützung in allen Lebenslagen. Herzlich danken will ich auch meinem Mann Alexander, der mich immer wieder bestärkend auf diesem Weg begleitet und unterstützt hat. Ohne diese Menschen wäre ich nicht an dem Punkt, an dem ich heute stehe.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Aktuelle und zukünftige Herausforderungen.....	1
1.2 Zielsetzungen und Aufbau der Arbeit	4
Abschnitt A – Theoretischer Hintergrund.....	6
2. Fachliche Grundlagen Carbon Capture and Storage.....	6
2.1 Begriffsklärung Carbon Capture and Storage (CCS)	6
2.2 Abtrennung von Kohlenstoffdioxid (Carbon Capture)	7
2.2.1 Abtrenn- bzw. Sequestrierungsverfahren von Kohlenstoffdioxid.....	8
2.2.1.1 Das Pre-Combustion Verfahren	10
2.2.1.2 Das Oxyfuel-Combustion Verfahren	12
2.2.1.3 Das Post-Combustion Verfahren	14
2.2.1.4 Industrielle Abscheidung (Industrial Separation)	16
2.2.1.5 Direct Air Capture (DAC)	27
2.2.1.6 Zusammenfassung	29
2.2.2 Abscheidetechnologien von Kohlenstoffdioxid (CO ₂ separation)	30
2.2.2.1 Absorption.....	31
2.2.2.2 Adsorption.....	35
2.2.2.3 Natürliche Einbindung	38
2.2.2.4 Zusammenfassung	41
2.3 Transport von Kohlenstoffdioxid.....	43
2.3.1 Pipeline	44
2.3.2 Schiff	48
2.3.3 LKW und Zug.....	49
2.4 Geologische Speicherung von Kohlenstoffdioxid.....	50
2.4.1 Speicherarten.....	51
2.4.2 Speichermechanismen.....	59
2.4.3 Geschätzte Speicherkapazitäten	61
2.4.4 Sicherheit von Speicherstätten.....	64
2.5 Bewertung der Technologie	66
2.5.1 Ökonomische Dimension.....	67
2.5.2 Ökologische Dimension	68
2.5.3 Politische Dimension	70

2.5.4 Soziale Dimension.....	73
2.5.5 Zusammenfassung	74
2.5.6 Ausblick „Carbon Management“	77
3. Grundlagen Bilingualer Unterricht	79
3.1 Entstehung und Begriffsentwicklung	79
3.2 Zielsetzungen von CLIL	80
3.3 Didaktische Rahmenkonzepte und Modelle	84
3.4 CLIL-Lehrstrategien.....	87
3.4.1 Sprachen- und Inhaltslernen	87
3.4.2 Die Rolle der Verkehrssprache (L1)	89
3.5 Perspektiven und Herausforderungen von bilinguaem Unterricht	95
3.5.1 Verbreitung und Organisation von bilinguaem Unterricht in Deutschland	95
3.5.2 Potential und Beliebtheit von Bilingualen Angeboten	97
3.5.3 Situation der Lehrkräfte.....	98
3.5.4 Forschungsstand und -lücken	99
3.6 Bilingualer Chemieunterricht	101
3.6.1 Zielsetzungen des Faches	103
3.6.2 Didaktische Grundprinzipien	105
3.6.3 Unterrichtsmaterialien	107
3.6.4 Außerschulischer Lernort bilinguales Schülerlabor	109
Abschnitt B – fachdidaktische Vorüberlegungen und Konzeptentwicklung	112
4. Bilinguales Modul “What to do with CO₂? A bilingual lab sequence”	112
4.1 Bildungspolitische Rahmenbedingungen	112
4.1.1 Vorgaben für das Fach Chemie	112
4.1.2 Vorgaben für den bilingualen Chemieunterricht	114
4.1.3 Untersuchung ausgewählter Schulbücher.....	114
4.1.4 Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE)	119
4.1.5 Zwischenfazit	128
4.2 Vorkenntnisse der Lernenden	130
4.2.1 Fachliche Vorkenntnisse in der L1	130
4.2.2 Sprachliche Vorkenntnisse in der L2.....	134
4.2.3 Konzeption eines Vorbereitungsmoduls	136
4.2.4 Zwischenfazit	138

4.3 Aufbau der Schülerlaborsequenz	140
4.3.1 Planungsgrundlagen und Kompetenzbeschreibungen.....	140
4.3.2 Konzeptionelle Schwerpunkte	143
4.3.3 Aufbau der Stationen.....	151
4.3.4 Zwischenfazit	154
4.4 Experimentauswahl und Adaption	155
4.4.1 Analyse und Auswahl von geeigneten Experimenten	155
4.4.2 Adaption von geeigneten Experimenten.....	167
4.4.2.1 Verbrennung von Kohle	168
4.4.2.2 Einfluss der Temperatur auf das Kohlensäure-Kohlenstoffdioxid-Gleichgewicht....	172
4.4.2.3 Absorption von Kohlenstoffdioxid in Natronlauge	175
4.4.2.4 Absorption von Kohlenstoffdioxid in verschiedenen alkalischen Lösemitteln.....	178
4.4.2.5 Adsorption von Kohlenstoffdioxid an Aktivkohle	182
4.4.2.6 Kohlenstoffdioxid als Einflussfaktor auf die Photosynthese	190
4.4.3 Zwischenfazit	202
4.5 Materialentwicklung	204
4.5.1 Untersuchung von bestehenden Arbeitsmaterialien	204
4.5.2 Eigene Konzeption	206
4.5.3 Entwicklung eines digitalen E-Books	224
4.5.4 Zwischenfazit	230
Abschnitt C - Erprobung der konzipierten Materialien und Laboreinheit	232
5. Erprobungen	232
5.1 Pilotierungen zur Machbarkeit (2020-2022).....	236
5.2 Erster Iterationszyklus (2022).....	238
5.2.1 SommerUni 2022	238
5.2.2 MINT-Tag NRW in Bottrop.....	249
5.3 Zweiter Iterationszyklus (2023-2024)	252
5.3.1 SommerUni 2023 und 2024.....	252
5.3.2 Lehrkräftefortbildungen	266
5.3.3 Ergebnisse.....	269
5.4 Dritter Iterationszyklus (2024-2025)	272
5.4.1 Erprobung des Schülerlabors mit Studierenden (19.04.2024)	277
5.4.2 Erprobung des Schülerlabors mit einer Lernendengruppe (29.01.2025).....	286

5.4.3 Erprobungen mit EF-Kohorten (April-Mai 2025)	292
5.4.4 Ergebnisse	308
6. Zusammenfassung und Ausblick	311
6.1 Relevanz des Themas	311
6.2 Zentrale Ergebnisse der Arbeit	312
6.3 Kritische Reflexion des Forschungsansatzes	315
6.4 Ausblick und mögliche Weiterarbeit	317
Literatur	319
Abbildungsverzeichnis	339
Tabellenverzeichnis	343
Digitaler Anhang	345
Publikationen	346
Posterbeiträge zu Tagungen	347
Vorträge	347
Workshops	347
Fortbildungen für Lehrkräfte	348

Abkürzungsverzeichnis

BCU	Bilingualer Chemieunterricht
BECCS	Bionenergy with Carbon Capture and Storage
BICS	basic interpersonal communicative skills
BNE	Bildung für nachhaltige Entwicklung
BSFU	Bilingualer Sachfachunterricht
BU	Bilingualer Unterricht
CALP	cognitive academic language proficiency
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilisation
CCUS	Carbon Capture, Utilisation and Storage
CDR	Carbon Dioxide Removal Technologies [dt. Methoden zur gezielten Kohlenstoffdioxid-Entnahme]
CEFR	Common European Framework of Reference [dt. Gemeinsamer Europäischer Referenzrahmen für Sprachen]
CLC	Chemical Looping Combustion
CLIL	Content and language integrated learning
DAC	Direct Air Capture
DACCS	Direct Air Carbon Capture and Storage
DLB	Digitaler Lernbegleiter
ECBM	Enhanced Coal Bed Methane Recovery
EGR	Enhanced Gas Recovery
EF	Einführungsphase (11. Klasse)
EOR	Enhanced Oil Recovery
ESD	Education for Sustainable Development
EU	Europäische Union
FCC	Fluid-Catalytic Cracking
FU	Fremdsprachenunterricht
GK	Grundkurs
HOTS	higher-order thinking skills
IEA	International Energy Agency [dt. Internationale Energiebehörde]
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KMK	Kultusministerkonferenz
KSpG	Kohlenstoffdioxidspeichergesetz
L1	Muttersprache, Erstsprache

L2	Zweitsprache, Fremdsprache
L-DAC	Liquid Direct Air Capture
LK	Leistungskurs
LKW	Lastkraftwagen
LOTS	lower-order thinking skills
MINT	Fachbereiche Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik
NETs	Negative Emission Technologies [dt. Negative Emissions-Technologien]
NRW	Nordrhein-Westfalen
PBR	Photobioreaktor
PSA	Pressure Swing Absorption
Q2	zweite Qualifikationsphase (13. Klasse)
SCR	Selective Catalytic Reduction
S-DAC	Solid Direct Air Capture
SDG	Sustainable Development Goal
SoPä	Sonderpädagogik
SuS	Schülerinnen und Schüler
TRL	Technology Readiness Level
TSA	Temperature Swing Absorption
UN	United Nations [dt. Vereinte Nationen]
WACCS	Waste Carbon Capture and Storage

1. Einleitung

1.1 Aktuelle und zukünftige Herausforderungen

„Wenn CO₂ sichtbar und bräunlich wäre, oder übel riechen würde, hätte die Welt schon längst gehandelt.“¹

Prof Dr. Mojib Latif, Klimaforscher

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts befindet sich die Erde im Zeitalter des Anthropozäns [1, S.4-5]. Es beschreibt eine Entwicklung, bei der der Mensch als treibende Kraft in der globalisierten Welt und deren damit einhergehenden Veränderungen auftritt. Das erfolgt nicht ohne irreversible Schäden. Rockström et.al. haben zur Visualisierung dieser Entwicklungen das Modell der planetaren Belastungsgrenzen entwickelt (vgl. Abbildung 1). Neben dem Klimawandel und der Ozeanversauerung werden sieben weitere Belastungsgrenzen des Planeten definiert. Wird der grüne, sichere Bereich überschritten, steigen die Risiken für unumkehrbare Schäden an der Erde. Betrachtet man die Entwicklungen der Jahre 2009-2023, werden immer mehr Grenzen identifiziert, differenziert und überschritten.

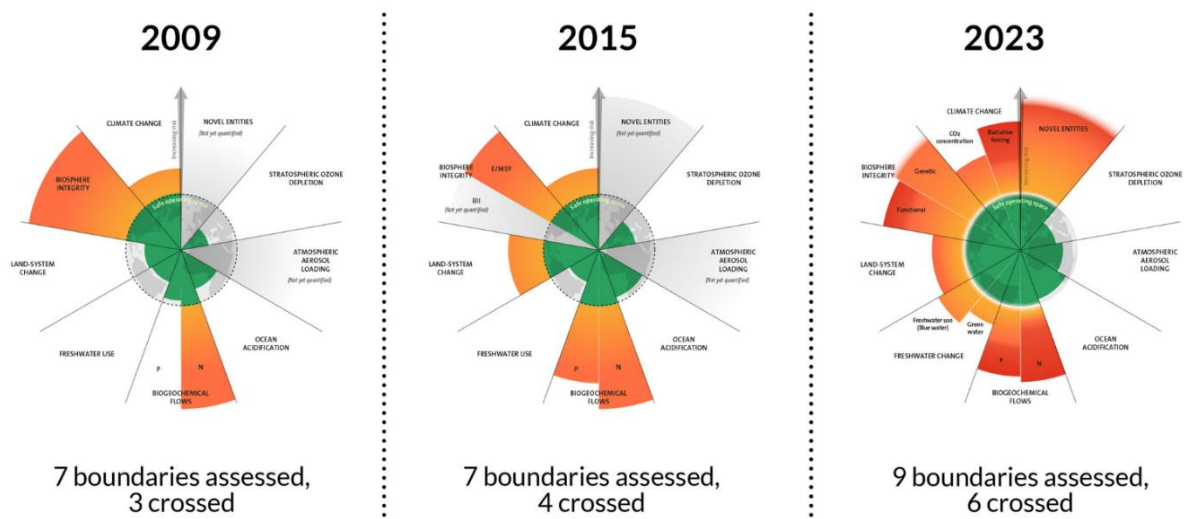


Abbildung 1. Modell der planetaren Belastungsgrenzen 2009-2023²

Die Verbrennung von fossilen Energieträgern trägt zu einem stetigen Anstieg der Kohlenstoffdioxid-Emissionen in der Atmosphäre bei (vgl. Abbildung 2). Der dadurch verursachte anthropogene Klimawandel, geht bei fehlender Eindämmung mit einem globalen Temperaturanstieg von 1,5 °C bis 2030 bzw. 2 °C bis 2065 einher [2, S.42-43]. Die Überschreitung dieser planetaren Grenzen führt zu irreversiblen Veränderungen des Klimas. Um diesen Entwicklungen zu begegnen, müssen Emissionen begrenzt oder gänzlich eingespart werden.

¹ Zitat Prof. Dr. Latif: Interview Watson 19.11.23, <https://www.watson.de/nachhaltigkeit/interview/514253172-klimawandel-warum-deutsche-faelschlicherweise-denken-nicht-betroffen-zu-sein> (letzter Zugriff 09.03.25).

² Abbildung planetare Grenzen: Azote for Stockholm Resilience Centre, Stockholm University. Based on Richardson et al. 2023, Steffen et al. 2015, and Rockström et al. 2009, <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html> (letzter Zugriff 09.03.25).

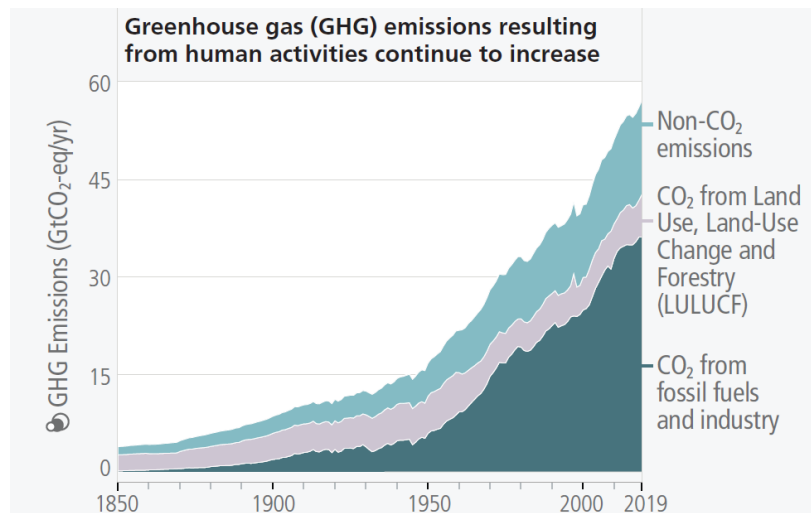


Abbildung 2. Anthropogene Treibhausgasemissionen 1850-2019³

Ein Teil der anthropogenen Emissionen wird durch natürliche Senken wie Wälder oder durch den Ozean aufgenommen. Diese Senken begrenzen die Emissionen, können sie aber nicht vollständig ausgleichen. Laut des Global Carbon Budgets⁴ bleiben allein für das Jahr 2023 16,9 Milliarden Tonnen CO₂ in der Atmosphäre zurück (siehe Abbildung 3).

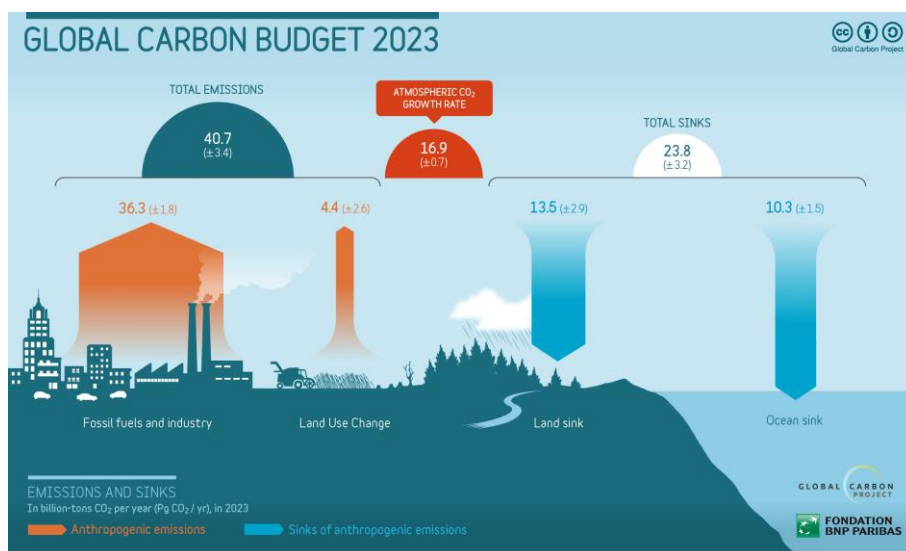


Abbildung 3. Global Carbon Budget 2023⁵

Es herrscht demnach eine globale Diskrepanz zwischen notwendigen Einsparungen und auftretenden Emissionen. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer Ambitions- bzw. Emissionslücke [engl. *ambition/emission gap*]. In Abbildung 4 ist die Emissionslücke zur Erreichung des 1,5-Grad-Ziels bis 2030 dargestellt. Weltweit fehlen z.B. 19-22 Gigatonnen CO₂-Äquivalente⁶ (GtCO₂e). Werden diese nicht eingespart, kann das 1,5-Grad-Ziel nicht gehalten werden.

³ Abbildung anthropogene Emissionen: [2, S.43].

⁴ **Das globale Kohlenstoffdioxid-Budget** [engl. *Global Carbon Budget*]: beschreibt alle Emissionsquellen und Senken von Kohlenstoffdioxid, die auf Grund von menschlichem Einwirken entstehen.

⁵ Abbildung Global Carbon Budget: [3].

⁶ **CO₂-Äquivalent** [engl. *CO₂-equivalent*]: beschreibt das Maß für das Treibhausgaspotential eines Gases. Kohlenstoffdioxid ist ein Vergleichswert und wird mit dem Zahlenwert 1 angegeben, Methan z.B. mit 28. Das Konzept der CO₂-Äquivalente ermöglicht den Vergleich von verschiedenen Treibhausgasen z.B. bei bestimmten Verfahren zur Energieerzeugung. (Weiterführung auf Folgeseite)

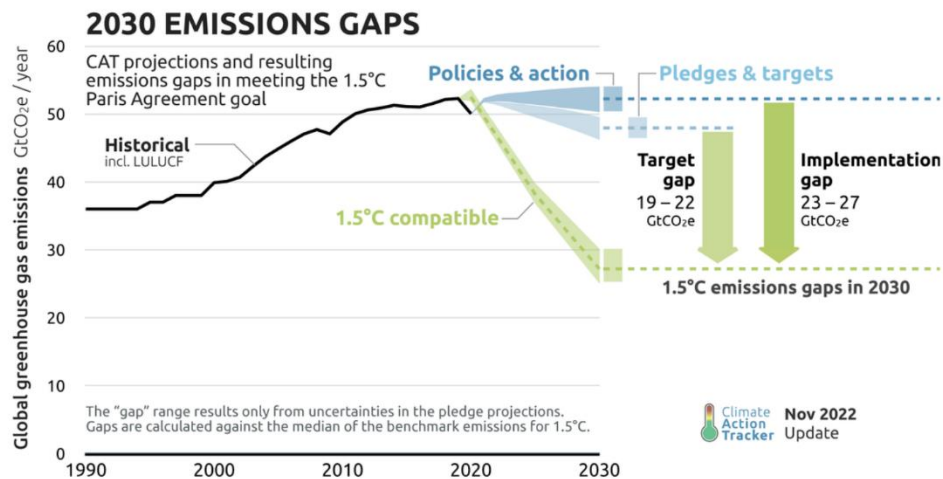


Abbildung 4. Ambitions- bzw. Emissionslücke, um das 1,5 Grad-Ziel bis 2030 zu erreichen⁷

Für Deutschland kommt das Umweltbundesamt zu ähnlichen Schlussfolgerungen. Die nationalen Beiträge zur Emissionsbegrenzung reichen nicht aus oder werden noch nicht ausreichend umgesetzt [5].

Langfristig kann die Emissionslücke nur geschlossen werden, wenn man weltweit von einer „brown economy“ [6, S.7364–7365], die auf der Verbrennung von fossilen Energieträgern basiert, zu einer „less carbon-intensive economy“ [6, S.7364–7365] übergeht. Der Einsatz von *Negativen Emissionstechnologien* (NETs) bzw. Methoden der gezielten Kohlenstoffdioxidentnahme (*Carbon Dioxide Removal, CDR*), die eine CO₂-neutrale Wirtschaft oder sogar eine Kreislaufwirtschaft ermöglichen können, werden dabei als Zielsetzungen immer mehr in den Blick genommen [7, S.3].

Darüber hinaus sprechen sich Forschende für die Verfolgung von vielfältigen Ansätzen der Dekarbonisierung, also der Reduktion von entstehenden Kohlenstoffdioxidemissionen aus. Dazu gehören z.B. der Ausbau und die Weiterentwicklung von erneuerbaren Energien, die Erhöhung der Energieeffizienz bei der Umsetzung von fossilen Energieträgern in industriellen Prozessen, die generelle Reduktion des Einsatzes von fossilen Energieträgern und der Einsatz von *Carbon Capture and Storage* Technologien [8, S.6].

Welche Rolle die *Carbon Capture and Storage* (CCS) Technologie in diesem Rahmen einnehmen soll, ist auch unter Forschenden nicht unumstritten. Durch eine Abtrennung von Kohlenstoffdioxid-Emissionen und deren Speicherung können Kraftwerke weiterhin mit fossilen Energieträgern betrieben werden [9, S.3]. Deshalb wird CCS auch oft als Übergangs- bzw. Brückentechnologie angesehen, die eingesetzt werden kann, bis erneuerbare Energien vollständig etabliert werden können [10, S.798]. Darüber hinaus wird der Einsatz von CCS für die Reduktion von schwer vermeidbaren Emissionen aus fossilen Quellen immer stärker fokussiert [11, S.6]. Eine Übersicht verschiedener Technologieoptionen zur Verringerung solcher Emissionen ist in Abbildung 5 dargestellt. Das Management und die Einsparung von Kohlenstoffdioxid-Emissionen bleiben jedoch Herausforderungen, die auch noch zukünftige Generationen beschäftigen werden.

(Weiterführung Fußnote 6) Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom **Global Warming Potential** (GWP). Dieser Relativwert wird meist über einen bestimmten Zeitraum von z.B. 100 Jahren im Vergleich zur selben Masse von Kohlenstoffdioxid angegeben. Dadurch kann auch die Verweilzeit der Treibhausgase berücksichtigt werden.

⁷ Abbildung Emission Gaps: Climate Action Tracker Emission Gaps 2023 (letzter Zugriff 05.01.24) [4].

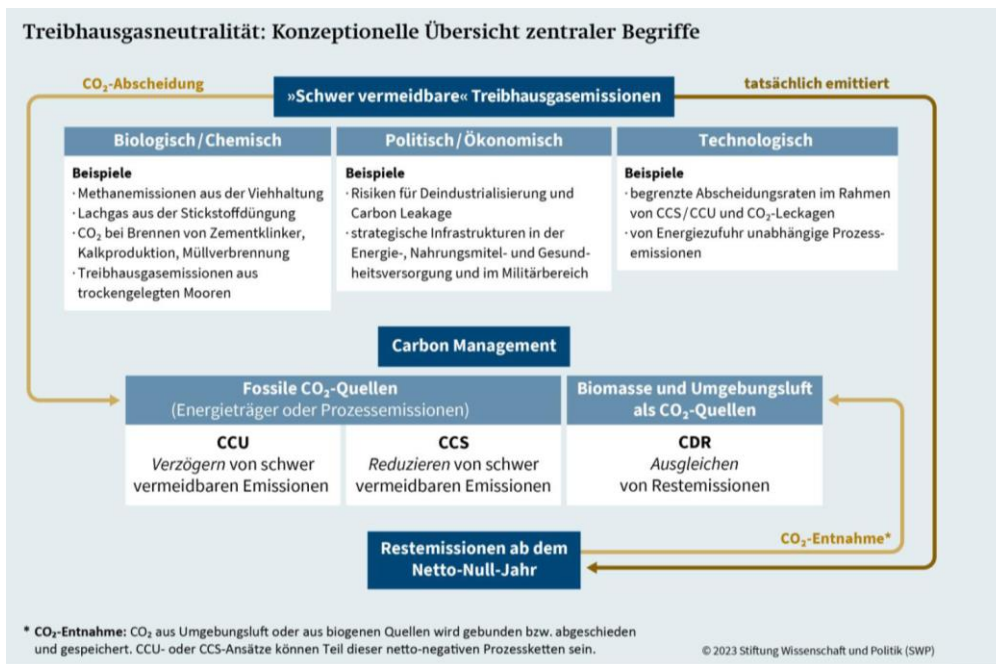


Abbildung 5. Technologieoptionen zum Management von Kohlenstoffdioxid-Emissionen⁸

1.2 Zielsetzungen und Aufbau der Arbeit

Gemäß der curricularen Innovationsforschung [12] soll das Thema CCS im Rahmen der vorliegenden Dissertation (siehe Abbildung 6) erschlossen werden. Dabei stehen die Entwicklung und Erprobung einer bilingual englischen Schülerlaboreinheit mit dem Fokus auf *Carbon Capture and Storage* als Beitrag zur Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) im Zentrum.

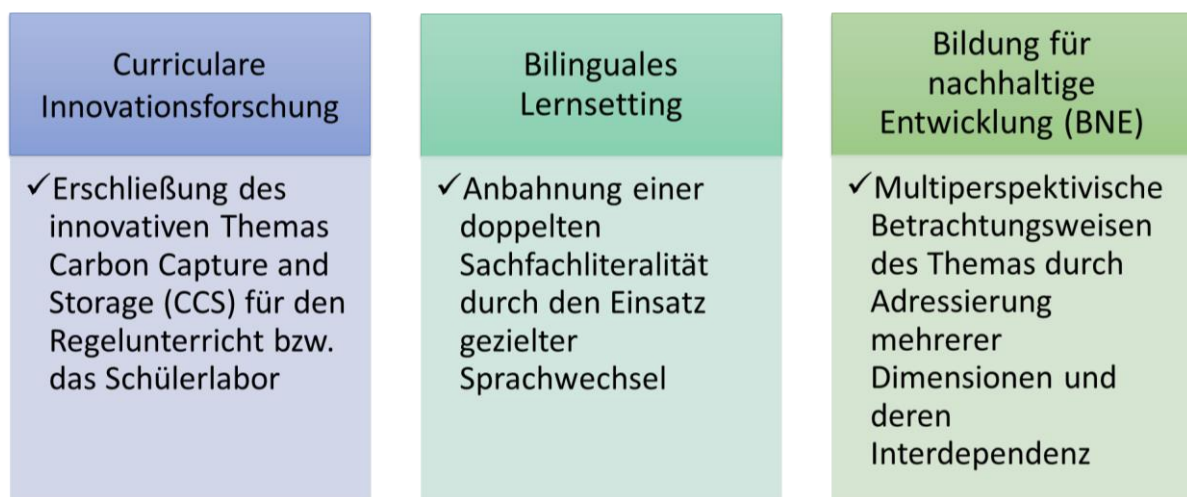


Abbildung 6. Schwerpunkte des Dissertationsprojektes

⁸ Abbildung zum Carbon Management: [11, S.4]. CCU steht für Carbon Capture and Utilisation.

Thematische Inhalte mit Bezügen zur Nachhaltigkeit sind im Chemieunterricht schon länger präsent [13, S.9], jedoch bedingen abstrakte Leitlinien und Handlungsempfehlungen zu BNE die Konzeption von Unterrichtsmaterial [14, S.96], das erprobt und praxisnah ist und sowohl im Regelunterricht als auch in außerschulischen Lernangeboten eingesetzt werden kann. Solche Materialien für ein bilinguales Lernsetting zu entwickeln ist ein Schwerpunkt des Dissertationsprojektes, womit fachdidaktisches Neuland beschritten wird.

Auch im Bereich des bilingualen Chemieunterrichts besteht die dringende Notwendigkeit der Entwicklung von auf deutschen Fachcurricula basierenden Unterrichtsmaterialien, die erprobt und optimiert werden. Da bilingualer Chemieunterricht im schulischen und außerschulischen Kontext selten realisiert wird [15, S.88], fehlt es an Materialien, um Lehrkräften des bilingualen Chemieunterrichts den Einstieg zu erleichtern [16, S.198]. Auch dieser Leerstelle soll mit dem Dissertationsvorhaben begegnet werden.

Auf Grund der geringen Verbreitung von bilingualem Chemieunterricht ist auch die Etablierung von außerschulischen bilingualen Lernangeboten mit Herausforderungen verbunden. Deutschlandweit boten bisher zwei Universitäten bilinguale Schülerlaborangebote an [17,18]. Die Beforschung solcher Lernsettings gilt als komplex, da auf Grund der Heterogenität der Angebote und Kohorten eine geringe Vergleichbarkeit der Forschungsergebnisse gegeben ist [19, S.14]. Die generierten Ergebnisse aus empirischen Forschungsvorhaben sind deshalb auf Grund der Vielzahl an auftretenden Faktoren, die einen Einfluss auf die Untersuchungen nehmen können, in ihrer Reichweite begrenzt [20, S.220].

Aus diesem Grund fokussiert sich diese Arbeit auf die schulexperimentell-konzeptionelle Entwicklungsarbeit [21, S.57] samt Aufarbeitung eines innovativen Themas gemäß den Grundsätzen der curricularen Innovationsforschung [22, S.42f]. Die Erprobung, Evaluation und Optimierung der Laboreinheit und der Materialien wird in Anlehnung an die partizipative fachdidaktische Aktionsforschung [23] in drei Iterationszyklen durchgeführt. Die Intention des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Schülerlaborangebots ist es, einen Beitrag zu weiteren Forschungsergebnissen zu leisten und eine chemiedidaktische Unterstützung der bilingual unterrichtenden Lehrkräfte [24] durch die Etablierung eines außerschulischen, bilingualen Lernangebots zu realisieren.

Die vorliegende Dissertation ist in drei große Bereiche A-C gegliedert. In Abschnitt A werden die fachlichen Hintergründe zu Carbon Capture and Storage (vgl. 2.) und dem bilingualen Unterricht (vgl. 3.) beschrieben. Daran schließt sich Teil B mit der Beschreibung der konzeptionellen Überlegungen des bilingualen Schülerlaborangebots (vgl. 4.) an. In Abschnitt C, dem letzten Teil der Arbeit, werden die Erprobungen geschildert (vgl. 5.). Zum Abschluss werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und bilanziert (vgl. 6.).

Die konzipierten Materialien, Erhebungsinstrumente und weitere Dokumente sind im digitalen Anhang dieser Arbeit zu finden.

Abschnitt A – Theoretischer Hintergrund

2. Fachliche Grundlagen Carbon Capture and Storage

In diesem Kapitel werden nach einer Begriffsklärung zu *Carbon Capture and Storage* (CCS), die unterschiedlichen Schritte der Prozesskette beschrieben. Eingangs werden die verschiedenen Abtrenn- und Abscheideverfahren von Kohlenstoffdioxid geschildert. Dem schließen sich Beschreibungen zu Transportmöglichkeiten und geologische Speicheroptionen an. Zum Abschluss erfolgt eine mehrdimensionale Einordnung und Bewertung der Technologie in Bezug auf Nachhaltigkeitsaspekte.

2.1 Begriffsklärung Carbon Capture and Storage (CCS)

CCS steht für *Carbon Capture and Storage*, eine international verwendete Abkürzung, um die Abtrennung, den Transport und die Speicherung von Kohlenstoffdioxid aus industriellen oder energieintensiven Anwendungen zu beschreiben. Ziel ist es, das Kohlenstoffdioxidgas möglichst langfristig aus der Atmosphäre abzutrennen. Neben der CCS-Terminologie werden in der Literatur auch noch andere Bezeichnungen für ähnliche Prozesse gebraucht, z.B.: *Carbon Capture and Sequestration* [25, S.1648] bzw. *Carbon Capture, Utilisation and Storage* (CCUS) [26]. Letzteres wird oft synonym zu CCS verwendet, bezieht aber auch die Nutzung von aufgefangenem CO₂ für andere Anwendungen mit ein [8, S.9]. Einen Überblick über die detaillierte CCS-Prozesskette bietet Abbildung 7.

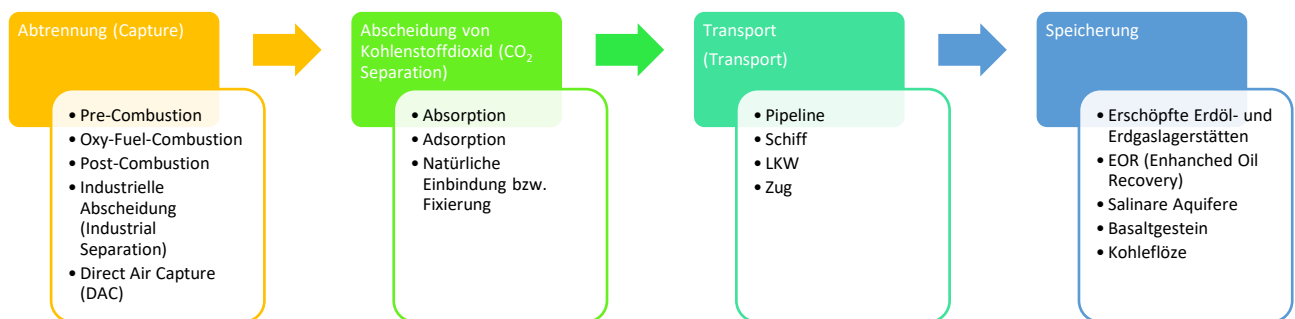


Abbildung 7. Elemente der CCS-Prozesskette⁹

Diese verschiedenen Prozessschritte werden verwendet, um Emissionen von Kraftwerken und anderen Industrieprozessen (z.B. Stahl, Raffinerien) abzufangen, um sie dann dauerhaft aus der Atmosphäre zu entfernen und zu speichern [27, S.255]. CCS-Technologien können meist an bestehende Kraftwerke angeschlossen werden und eignen sich besonders zum Einsatz in emissionsreichen Industriezweigen wie z.B. der Zementproduktion (siehe 3.2.1.4). Schätzungen gehen davon aus, dass diese Verfahren bis zu 20 Prozent zur Reduktion der industriebedingten Emissionen beitragen könnten [28, S.21].

⁹ Abbildung CCS-Prozesskette: angepasst nach Grundvorlage von [27, S.256] und Erweiterung nach [9, S.8f].

So wird im Zusammenhang von CCS in der Literatur auch oft von einer „Schlüsseltechnologie“ [29, S.8] gesprochen, um die vorgegebenen Klima- und Emissionsziele zu erreichen.

Im nächsten Abschnitt werden die wichtigsten Elemente der Prozesskette des CCS genauer erläutert, beginnend mit der Abtrennung von Kohlenstoffdioxid.

2.2 Abtrennung von Kohlenstoffdioxid (Carbon Capture)

Anthropogene Kohlenstoffdioxid-Emissionen entstehen u.a. im Energiesektor und bei einer Vielzahl von industriellen Prozessen. Eine Übersicht der Anteile der einzelnen Sektoren für die Jahre 2019-2050 ist Abbildung 8 zu entnehmen. Die globalen CO₂-Emissionen dieser Jahre wurden dort durch die Internationale Energiebehörde (IEA) modelliert. Laut der Prognose gehen die Emissionen im Verlauf der nächsten Jahrzehnte zurück. Die Energieerzeugung mit Kohle stellt jedoch auch zukünftig eine Herausforderung dar. Die Behörde vermutet, dass noch 60% der heute bestehenden Kohlekraftwerke bis 2050 im Einsatz sind und so als Hauptverursacher der Emissionen aus der Energieerzeugung bestehen bleiben [26, S.21].

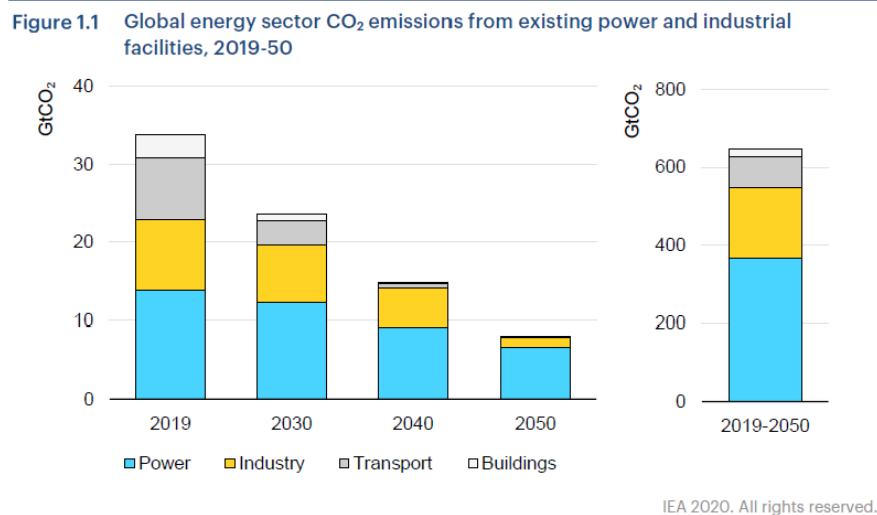


Abbildung 8. Globale CO₂-Emissionen der Energiewirtschaft und Industrie 2019-2050¹⁰

In Deutschland entsteht ein Großteil der Kohlenstoffdioxidemissionen bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern wie Kohle und Erdgas zur Wärme- und Stromproduktion. Man bezeichnet sie auch als „energiebedingte Emissionen“. Wie in Abbildung 9 zu sehen, sind die Emissionen seit 1990 leicht zurückgegangen. Die Energiewirtschaft, die Industrie und der Verkehrssektor tragen jedoch immer noch als Hauptverursacher zu den energiebedingten CO₂-Emissionen bei. Obwohl die Zahl der Anlagen in Energie- und Industriesektor etwa gleich verteilt ist, stammen etwa zwei Drittel der Emissionen aus Anlagen der Energiewirtschaft und ein Drittel aus Industrieanlagen [30, S.I Abb.1].

¹⁰ Abbildung Globale CO₂-Emissionen: [26, S.22].

Energiebedingte Treibhausgas-Emissionen

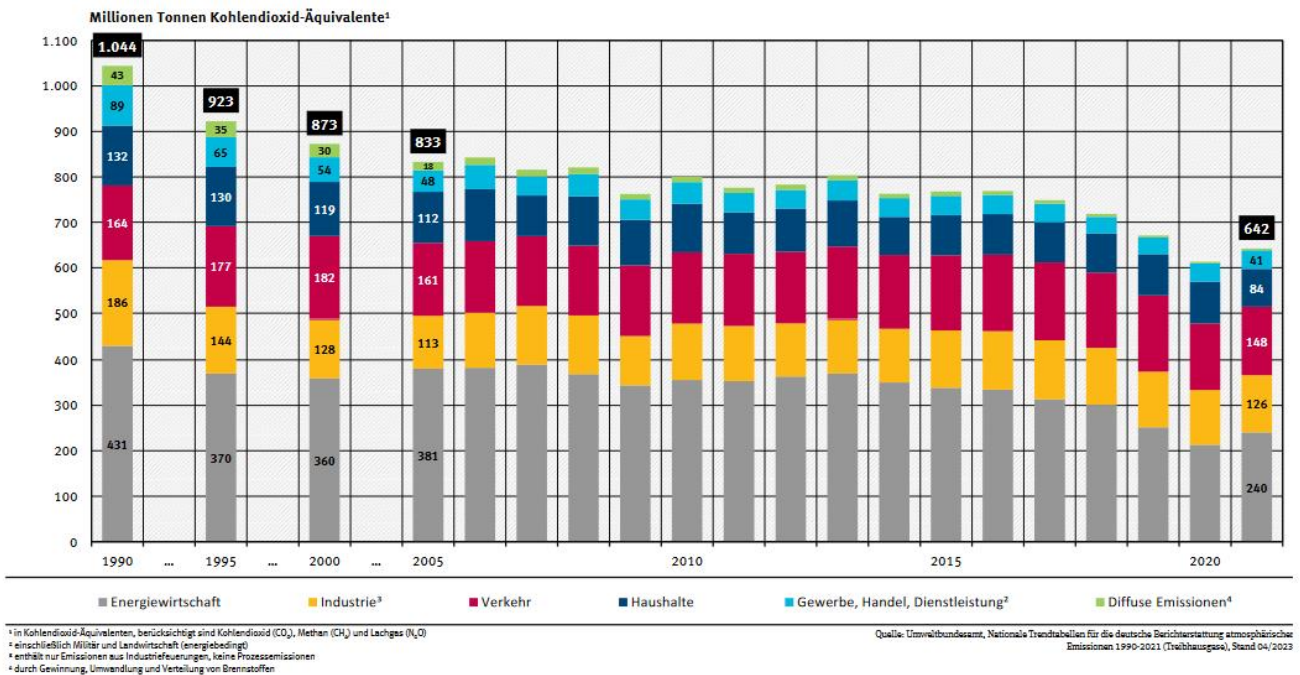


Abbildung 9. Energiebedingte Treibhausgas-Emissionen von 1990-2021.¹¹

Die Gesamtemissionen setzen sich aus verschiedenen Treibhausgasen zusammen, wenngleich Kohlenstoffdioxid mit ~ 89 % den größten Anteil einnimmt. Eine Möglichkeit diese CO₂-Emissionen zu reduzieren ist, sie bereits bei ihrer Entstehung im Kraftwerk oder der Produktionsanlage abzuscheiden. Hier kommen verschiedene Abtrenn- und Sequestrierungsverfahren mit vielfältigen Abscheidetechnologien innerhalb CCS-Technologie in Frage, die in den folgenden Kapiteln genauer erläutert werden. Dabei werden in Kapitel 3.2.1 zunächst mögliche Abtrennungsverfahren und der Zeitpunkt der Abtrennung beschrieben. Anschließend folgt im Unterkapitel 3.2.2 die Schilderung der eigentlichen Abtrennung.

2.2.1 Abtrenn- bzw. Sequestrierungsverfahren von Kohlenstoffdioxid

Auf Grund der Vielzahl von Prozessen und Anwendungen beschränkt sich diese Arbeit auf fünf verschiedene Abtrennverfahren (siehe Abbildung 10). Dabei steht die Sequestrierung von Kohlenstoffdioxid in der Energiewirtschaft im Vordergrund, da diese zu einem hohen Anteil der globalen Kohlenstoffdioxidemissionen beiträgt. Zu den beteiligten Verfahren gehören dabei die Abscheidung vor der Verbrennung [engl. *Pre-Combustion*], die Verbrennung von Kohlenstoffdioxid mit reinem Sauerstoff [engl. *Oxyfuel-Combustion*] und die Abscheidung nach der Verbrennung [engl. *Post-Combustion*].

Darüber hinaus werden Emissionsreduktionsmöglichkeiten in der Industrie im Kapitel Industrielle Abscheidung (siehe 2.2.1.4) zusammengefasst. Neben der Abscheidung aus fossilen Quellen wird in Kapitel 2.2.1.5 *Direct Air Capture* außerdem die Sequestrierung von Kohlenstoffdioxid aus der Luft beschrieben.

¹¹ Abbildung Energiebedingte Treibhausgasemissionen: Umweltbundesamt.

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen#energiebedingte-kohlendioxid-emissionen-durch-stromerzeugung> (letzter Zugriff 31.05.24).

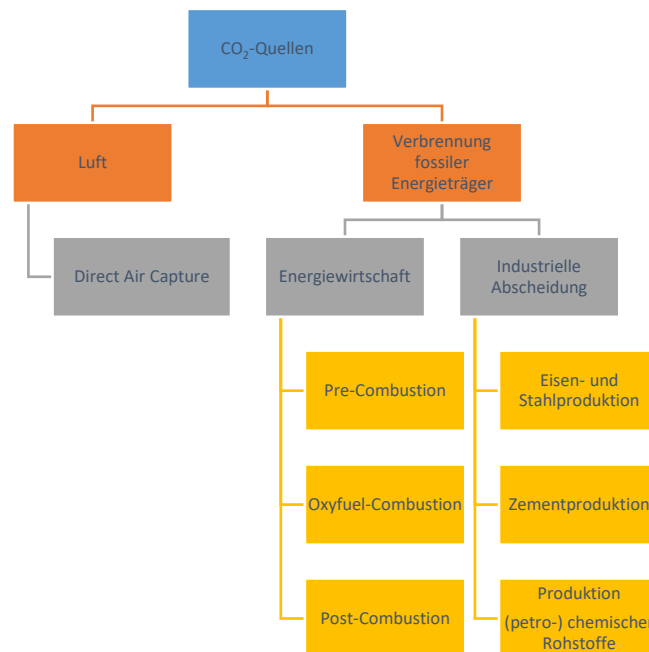


Abbildung 10. Übersicht einer Auswahl industriell etablierter Methoden der Kohlenstoffdioxid-Abtrennung.

Eine schematische Übersicht der erwähnten Verfahren ist Abbildung 11 zu entnehmen. Von links nach rechts kann man die Ausgangsstoffe und die grundlegenden Abläufe der Prozesse nachvollziehen. Die pink eingefärbten Pfeile visualisieren den Weg des abgeschiedenen Kohlenstoffdioxids nach der Abscheidung zur Kompression bzw. zum Transport und zur Speicherung oder zur Weiterverwendung. Im nächsten Abschnitt werden diese Prozesse detailliert erläutert.

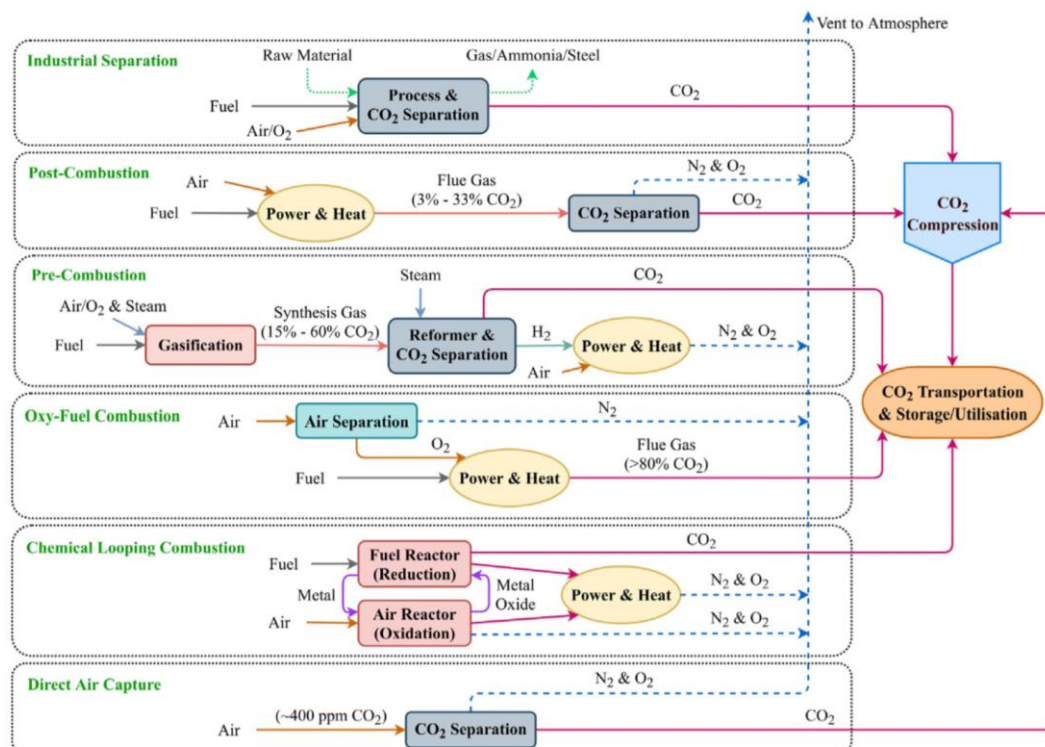


Abbildung 11. Übersicht der verschiedenen Abtrennverfahren¹²

¹² Abbildung Abtrennverfahren: [9, S.7]

2.2.1.1 Das Pre-Combustion Verfahren

Beim Pre-Combustion Verfahren wird Kohlenstoffdioxid in einem Gasstrom vor der Verbrennung abgetrennt. Die Technologie wird bereits seit 95 Jahren in der chemischen Industrie verwendet und kann in Kohle- und Erdgaskraftwerken zur Stromerzeugung eingesetzt werden [9, S.9]. Ein vollständiges Prozessschema eines Kombinationskraftwerkes der Energiewirtschaft kann Abbildung 12 entnommen werden.

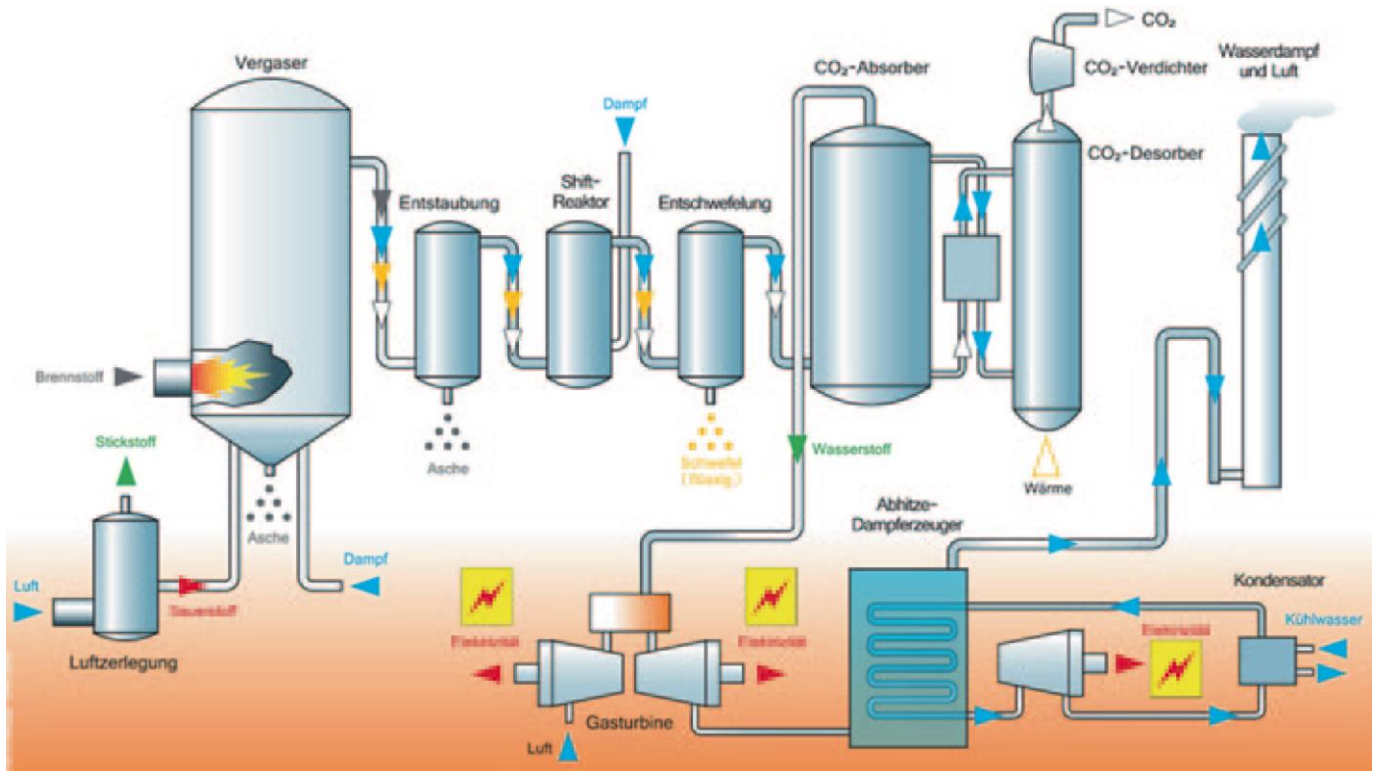


Abbildung 12. Prozessschema eines IGCC¹³-Kraftwerks mit einer Pre-Combustion Anlage

Die technischen Abläufe unterscheiden sich je nach Art des Kraftwerkes. Beispielsweise kann dem Vergaser eine Luftzerlegungseinheit vorgeschaltet sein, die durch fraktionierte Destillation von Luft die Reaktionsprodukte Sauerstoff und Stickstoff herstellt. Anschließend werden kohlenstoffhaltige Energieträger (wie z.B. Kohle, Erdgas) mit Hilfe von Sauerstoff und Wasserdampf in Synthesegas umgewandelt.

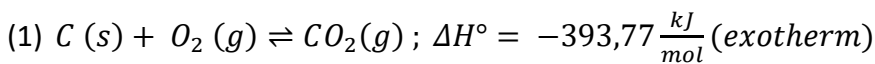
Herstellung von Synthesegas zur Gewinnung von Wasserstoff

Die Herstellung von Synthesegas¹⁴ kann mit verschiedenen kohlenstoffhaltigen Energieträgern erfolgen. Mit Kohle wird sie in einem Vergasungsreaktor vollzogen, in dem bei hohen Temperaturen (1000-1700 °C) und erhöhtem Druck unter Zugabe von Sauerstoff (O₂) und Wasserdampf eine unvollständige Verbrennung stattfindet [27, S.262]. Bei der sogenannten „Vergasung“ [31, S.164] laufen verschiedene Prozesse gleichzeitig ab.

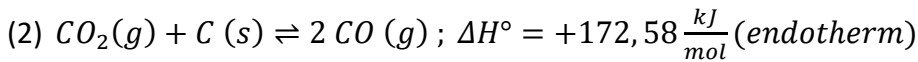
¹³ Abbildung IGCC-Kraftwerk: [27, S.263] **IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle)**: bezeichnet Kraftwerke der Energiewirtschaft mit integrierter Vergasung des Energieträgers (z.B. Braunkohle) und anschließender Verbrennung des Synthesegases. Die Abtrennung von CO₂ erfolgt vor der energetischen Nutzung [27, S.260-261].

¹⁴ **Analoge Bezeichnungen für Synthesegas**, die sich in der Literatur finden, sind für Reaktionen mit den Ausgangsstoffen Erdöl und Erdgas: *Spaltgas* und für Reaktionen mit dem Edukt Kohle: *Syngas* und *Wassergas*.

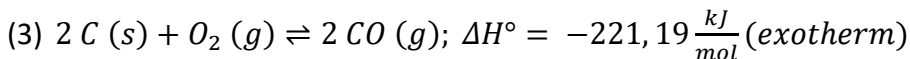
In den unteren Schichten des Vergasers erwärmt sich die Kohle auf über 1000 °C und verbrennt mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid (siehe Reaktionsgleichung (1)).



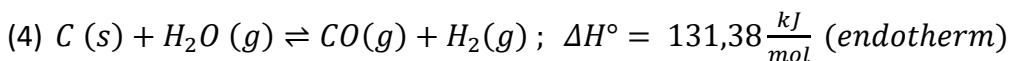
Bei diesen hohen Temperaturen, reagiert das gebildete Kohlenstoffdioxid in den höheren Kohleschichten zu Kohlenstoffmonoxid. Diese Umsetzung erfolgt im Rahmen des Boudouard-Gleichgewichtes (siehe (2)).



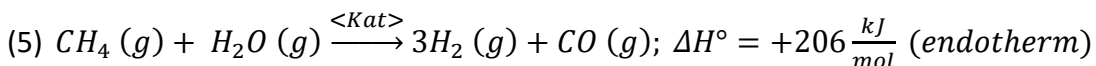
Liegt ein Überschuss an Kohle bei hohen Temperaturen vor, ergibt sich daraus folgende Gesamtreaktion (siehe (3)) [32, S.1035]:



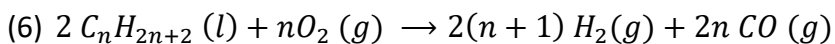
Neben diesen Prozessen reagiert Kohle mit dem vorhandenen Wasserdampf. Diese endotherme Reaktion ist in Reaktionsgleichung 4 [33, S.248] dargestellt. Aus all diesen Prozessen (vgl. (1)-(4)) entsteht Synthesegas, ein Stoffgemisch, welches durchschnittlich aus 50% Wasserstoff, 40% Kohlenstoffmonoxid, 5% Kohlenstoffdioxid, 4-5% Stickstoff und etwas Methan besteht [32, S.1035].



Synthesegas kann auch aus Kohlenwasserstoffen hergestellt werden. Ausgangsstoffe sind dabei meist Erdöl und Erdgas. Deren Bestandteile wie z.B. Methan und andere leichte Erdölfraktionen, werden über das *Steam-Reforming Verfahren* zu Synthesegas umgesetzt (siehe (5)). Die Reaktion findet in Gegenwart von Nickelkatalysatoren bei Drücken von bis zu 40 bar und Temperaturen von 700-830 °C statt [33, S.248].



Erdölrückstände und schwere Heizöle können über das Verfahren der partiellen Oxidation bei Drücken von 30-40 bar und Temperaturen von 1200-1500 °C zu Synthesegas umgesetzt werden (siehe (6)).

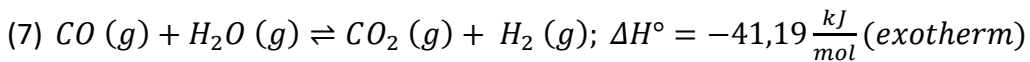


Aus den entstandenen Synthesegasen werden anschließend noch Verunreinigungen wie z.B. Quecksilber- und Schwefelverbindungen entfernt. Danach erfolgt in der Shift-Reaktion die Konvertierung von Kohlenstoffmonoxid zu Kohlenstoffdioxid.

Konvertierung von Kohlenstoffmonoxid

Um den Anteil an Kohlenstoffdioxid zu erhöhen, wird das aus den Reaktionen gebildete Kohlenstoffmonoxid mit Wasserdampf zur Reaktion gebracht.

Es wird in Gegenwart von Katalysatoren zu Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Wasserstoff (H₂) oxidiert (siehe Reaktionsgleichung (7)). Die Reaktion wird auch als Wassergas-Shift-Reaktion [engl. *water gas shift reaction*] oder Konvertierung von Kohlenstoffmonoxid bezeichnet [9, S.9].



Bei Temperaturen unter 500 °C ist das Gleichgewicht fast vollständig auf die Seite der Produkte verschoben. Das aus den Reaktionen entstandene Kohlenstoffdioxid lässt sich anschließend leicht aus dem Gasgemisch entfernen [33, S.248].

Kohlenstoffdioxidabscheidung, Trocknung und Kompression

Die Abscheidung wird durch Absorptionsverfahren realisiert. Dabei werden z.B. nasse Gaswäschen mit Absorbenzien wie z.B. Methanol und Polyethylenglykoldimethylether (DMPEG) durchgeführt [27, S.292]. Nähere Informationen zu den Gaswäschen enthält Kapitel 2.2.2. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass der Vorgang wenig in den eigentlichen Kraftwerkprozess eingreift und so bereits vorhandene Kraftwerke mit der Technologie nachgerüstet werden können [34, S.3]. Nachteilig ist, dass die Regeneration von Lösemitteln bei der Nasswäsche sehr energieaufwändig ist, um die notwendigen Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen von ca. 95% für den Transport und die spätere Speicherung zu erreichen [35, S.266].

Weitere Möglichkeiten zur Abscheidung von Kohlenstoffdioxid im Pre-Combustion Verfahren bestehen z.B. in der Einbindung in natürliche Stoffe (z.B. Mikroalgen) (siehe Kapitel 2.2.2.3). Nach der Abscheidung wird das Kohlenstoffdioxid getrocknet und für den Weitertransport komprimiert.

Ein besonderer Nutzen des Pre-Combustion Verfahrens ist, dass bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern neben Kohlenstoffdioxid als Emissionsquelle, auch Wasserstoff als Rohstoff gewonnen werden kann. Dieser Energieträger kann z.B. über die Fischer-Tropsch Synthese zur Produktion von flüssigen Kraftstoffen oder zur Stromerzeugung weiterverwendet werden.

2.2.1.2 Das Oxyfuel-Combustion Verfahren

Oxy-Combustion oder Oxy-fuel-Verfahren („Oxy“ = Oxygen = Sauerstoff, „fuel“ = Brennstoff) bezeichnen die Kohlenstoffdioxid-Abtrennung bei einer Verbrennung von fossilen Energieträgern mit reinem Sauerstoff. Ein vollständiges Prozessschema ist in Abbildung 13 dargestellt.

Zu Beginn wird Stickstoff unter hohem Druck und bei tiefen Temperaturen aus der Luft mit Hilfe eines Luftzerlegungsverfahrens¹⁵ entfernt. Der zurückbleibende Sauerstoff wird anschließend mit fossilen Energieträgern wie z.B. Kohle, Erdgas oder Synthesegas verbrannt [36, S.7]. Das Rauchgas, das daraus entsteht, besteht aus den Hauptkomponenten Kohlenstoffdioxid (80-98%) und Wasserdampf [34, S.3]. Danach wird dieses entstaubt, um Asche- und Staubpartikel zu entfernen.

¹⁵ Die Luftzerlegung wird z.B. mit der Druckwechsel-Adsorption [engl. *pressure swing absorption (PSA)*] durchgeführt (vgl. 2.2.2.1).

Durch die Abkühlung des Gasgemisches, erreicht man im Anschluss die Kondensation und Abtrennung des Wasserdampfes. Anschließend wird das Rauchgas durch weitere Reinigungsschritte z.B. eine Entschwefelung und Kondensation mit Hilfe des Kryogenverfahrens aufbereitet.

Bei letzterem kondensiert Kohlenstoffdioxid bei einer kritischen Temperatur von (304,21 K). Flüssiges und gasförmiges Kohlenstoffdioxid liegen nun nebeneinander vor. So können Konzentrationen von 80-95 Vol% abgeschieden werden [35, S.267].

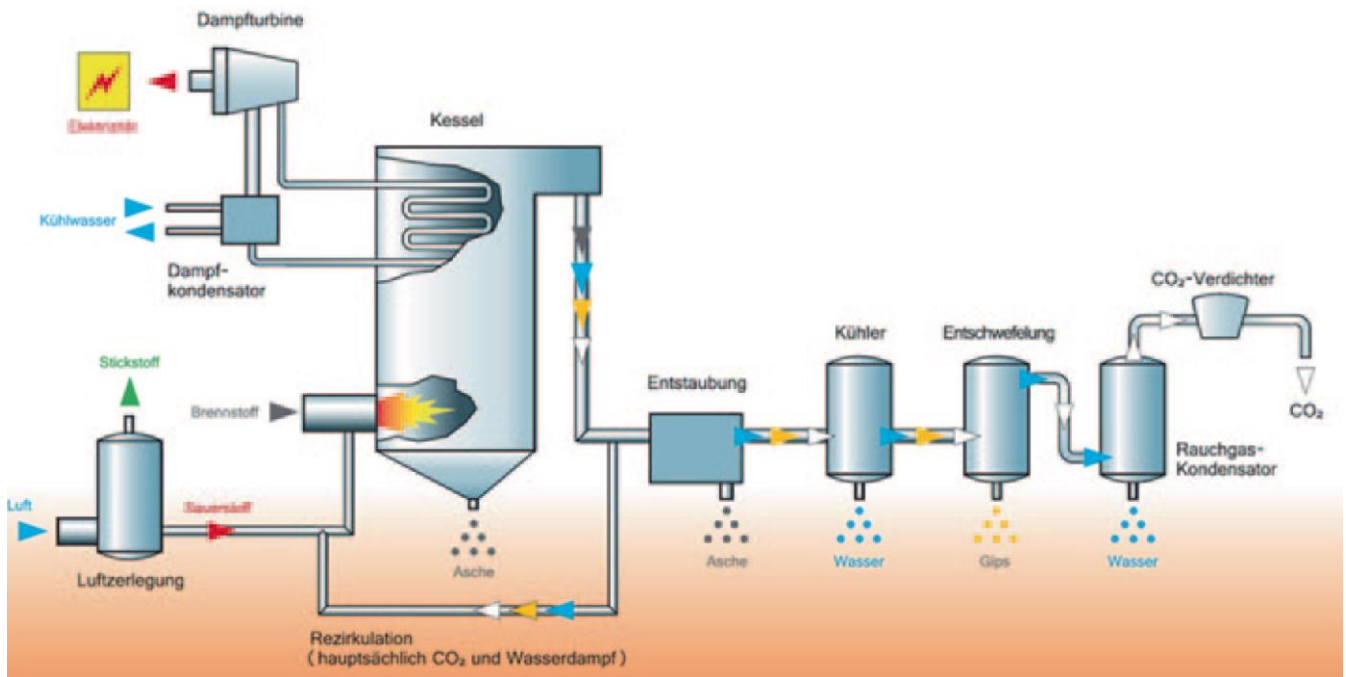


Abbildung 13. Prozessschema eines Oxyfuel-Kraftwerks¹⁶

Die Oxyfuel-Technik wird besonders für Neubauten von Kraftwerken im Rahmen von „Nullemissionszyklus-Anlagen“ [36, S.7] bevorzugt, kann jedoch auch in bereits bestehenden Anlagen nachgerüstet werden. Trotz der hohen Kosten der Sauerstoffproduktion und ausstehendem Entwicklungsbedarf in Teilen der Prozesskette, gilt sie als energieeffizienteste und vielversprechendste der drei Haupttechnologien (Pre-, Post-, Oxyfuel-Combustion) [10, S.801].

Eine Weiterentwicklung der Technologie ist das *Chemical Looping Combustion* (CLC) Verfahren. Die grundlegende Idee des Prozesses ist, fossile Brennstoffe mit Hilfe von Metalloxiden, anstatt mit Luft zur Reaktion zu bringen. Der energieintensive Schritt der Luftzerlegung, wie im Oxy-Combustion-Verfahren, entfällt. Das System besteht aus zwei miteinander verbundenen Reaktoren (vgl. Abbildung 14) in denen Redoxreaktion ablaufen. Im Luftreaktor werden Metalle (Me) mit Luft oxidiert (siehe Reaktionsgleichung (8) nach [37, S.145]). Da die Reaktionen bei hohen Temperaturen stattfinden, kann die vorhandene Wärme des Kraftwerks genutzt werden. Die daraus entstehenden Metalloxide (MeO) werden mit fossilen Brennstoffen (vgl. (9)) reduziert.

¹⁶ Abbildung Oxyfuel-Kraftwerk: [27, S.264] **Oxyfuel-Kraftwerke:** Kraftwerke der Energiewirtschaft, bei denen Primärenergieträger wie Erdgas und Steinkohle mit „reinem“ Sauerstoff verbrannt werden.

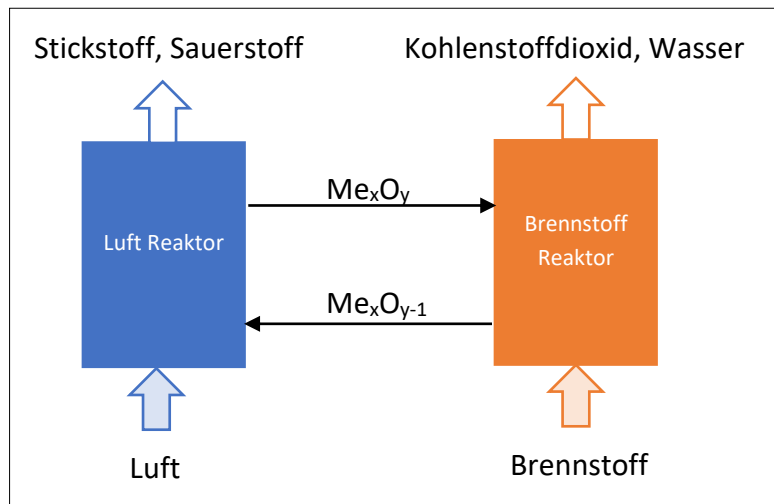
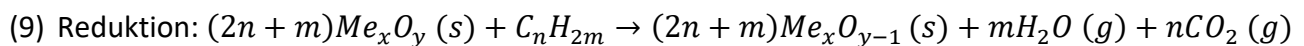
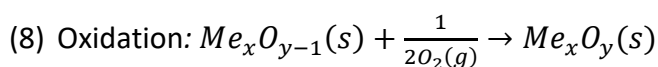


Abbildung 14. Vereinfachte Darstellung der Funktionsweise der Chemical-looping Combustion¹⁷



Als Reaktionsprodukte entstehen Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf, letzterer wird durch Kondensation entfernt, um reines Kohlenstoffdioxid zu erhalten [9, S.9]. Die verwendeten Metalloxide werden auch als Sauerstoff-Trägersubstanz [engl. *oxygen carrier*] bezeichnet. Hierzu eignen sich bspw. Nickel-, Eisen-, Mangan- und Kupferoxide. Außerdem werden auch kombinierte Metalloxide wie $CoFeAlO_4$ und $NiFeAlO_4$ getestet [37, S.147]. Die Sauerstoff-Trägersubstanzen können zwischen den Reaktoren hin und her transportiert und erneut eingesetzt werden. Sie bewegen sich in einer Schleife [engl. *loop*], woher sich auch die Bezeichnung des Prozesses ableitet. Für den Prozess wird weniger Energie als für das Oxyfuel-Verfahren benötigt, gleichfalls ist es günstiger und erreicht hohe Abscheideraten. Weitere Untersuchungen zu Trägermaterialien und Reaktoren stehen für eine allumfassende Einordnung der Technologie jedoch noch aus.

2.2.1.3 Das Post-Combustion Verfahren

In einem regulären Kohlekraftwerk wird Kohle mit Luft verbrannt und mit den dabei entstehenden Rauchgasen Wasserdampf erzeugt. Dieser kann daraufhin eine Dampfturbine antreiben und mit Hilfe eines Generators Strom erzeugen. Anschließend werden die verbleibenden Rauchgase als Abgas an die Umgebung abgegeben. Um dies zu verhindern, setzt das Post-Combustion Verfahren nach dem Verbrennungsprozess ein. Die verbleibenden Rauchgase (Kohlenstoffdioxidgehalt ~ 4-14%) werden über verschiedene Verfahren aufgereinigt und abgetrennt, um die später eingesetzten Lösemittel vor Verunreinigungen zu schützen. Die Abgase durchlaufen neben einer Entstaubung, zur Entfernung von Flugasche, auch Prozesse zur Entschwefelung und Entstickung, zur Entfernung von Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_x) aus dem Rauchgasstrom [27, S.266]. Die Prozessschritte eines solchen Verfahrens sind Abbildung 15 zu entnehmen.

¹⁷ Abbildung Chemical-Looping Verfahren: selbst gezeichnet und übersetzt nach [37, S.145].

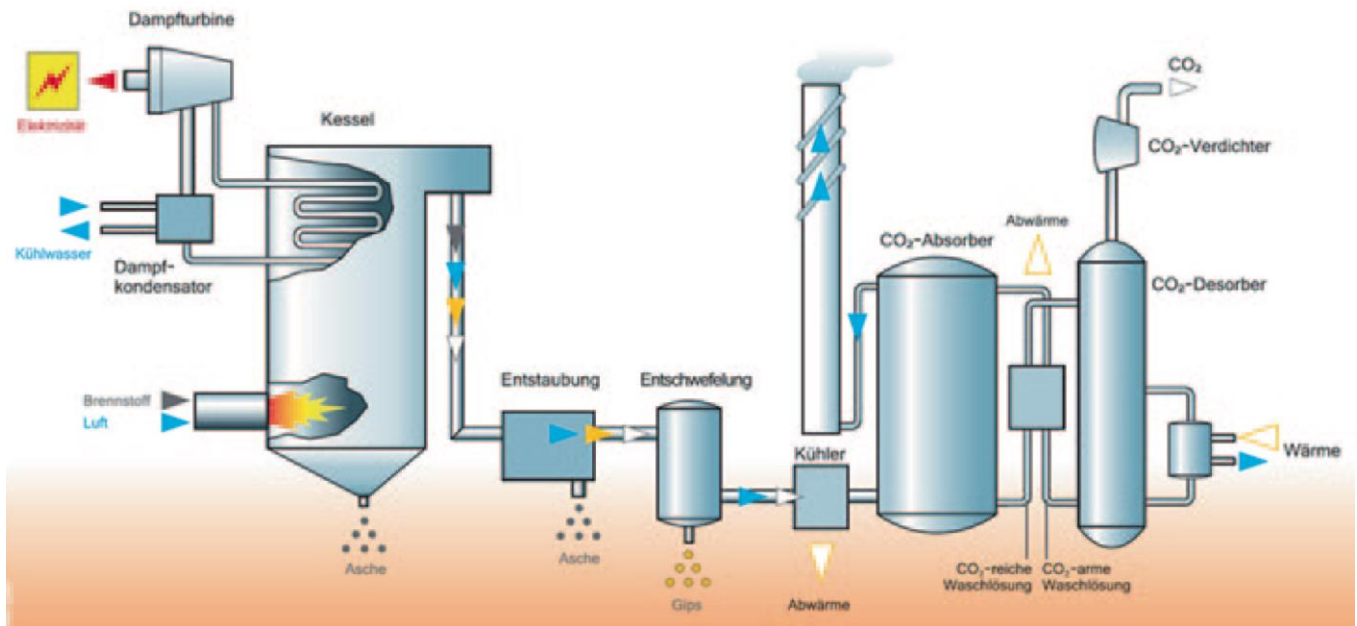
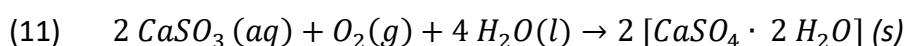
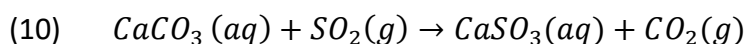


Abbildung 15. Prozessschema eines Kraftwerks mit Post-Combustion Anlage¹⁸ mit chemischer Absorption

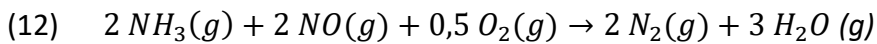
Kontaktgifte wie Arsenverbindungen und mechanische Verunreinigungen wie Flugasche werden durch das Entstaubungsverfahren entfernt. Durch diesen Prozessschritt verhindert man, dass die Wirksamkeit der eingesetzten Katalysatoren durch Stäube herabgesetzt wird. Das Rauchgas wird mit Hilfe von Zyklon-Anlagen von grobem Staub befreit. Dort werden die größeren Staubteilchen mit Zentrifugalkraft in einem zylindrischen Gefäß mit induzierten Wirbelströmen an die Wände geschleudert und abgeleitet. Danach wird mittels elektrischer Gasreinigung (Elektrofiltration) ein starkes elektrisches Feld erzeugt (50000-80000 V), durch welches das Rauchgas geleitet wird. An der Niederschlagselektrode (positiv geladenen Anode) bleiben die Staubteilchen hängen und können dann mechanisch abgeschüttelt werden. Arsen wird durch eine Abkühlung des entstaubten Gemisches auf 60-80 °C und einer erneuten Gasreinigung abgetrennt [32, S.656].

Für die Rauchgasentschwefelung leitet man das Schwefeldioxid-(SO₂)-haltiges Rauchgas durch eine Kalksuspension. Es bilden sich Calciumsulfit (CaSO₃) und Kohlenstoffdioxid als Reaktionsprodukte (siehe Reaktionsgleichung (10)). Calciumsulfit kann an der Luft mit Zugabe von Wasser zu Gips (Calciumsulfatdihydrat) oxidiert (vgl. (11)) und in der Bauindustrie weiterverwendet werden [32, S.638].



Um nitrose Gase aus dem Rauchgasstrom zu entfernen, wird das Verfahren der Rauchgas-Entstickung angewandt. Mit Hilfe des sogenannten SCR-Verfahrens [engl. *Selective Catalytic Reduction*] bei 200-450 °C, erfolgt eine selektive katalytische Reduktion unter Einsatz von V₂O₅- und WO₃-haltigen TiO₂-Katalysatoren. Ammoniak wird mit Stickoxiden (NO_x und Sauerstoff zu Stickstoff und Wasser umgesetzt (siehe Reaktionsgleichung (12)) [32, S.808].

¹⁸ Abbildung Post-Combustion Kraftwerk: [27, S.266] **Post-Combustion Anlagen:** Kraftwerke, der Energiewirtschaft bei denen Primärenergieträger wie Erdgas und Steinkohle mit Luft verbrannt werden.



Nach der Aufreinigung setzt die Kohlenstoffdioxid-Separation ein. Diese kann bspw. durch eine chemische Absorption erfolgen. Die entstandenen Rauchgase werden einer Gaswäsche mit Lösemitteln unterzogen. Dabei bindet Kohlenstoffdioxid an das Lösemittel. Erhitzt man dieses, wird reines Kohlenstoffdioxid abgegeben und das Lösemittel kann regeneriert werden [27, S.265]. Eine detailliertere Schilderung der chemischen Absorption (siehe Kapitel 2.2.2.1) sowie weiterer Möglichkeiten, um Kohlenstoffdioxid im Post-Combustion Verfahren abzutrennen wie z.B. die Nutzung von Adsorptionsverfahren wird in Kapitel 2.2.2.2 beschrieben.

Die Abtrennung nach dem Verbrennungsvorgang gilt als ausgereift und wird kommerziell bereits eingesetzt. Sie ermöglicht eine Nachrüstung der Technologie für bereits bestehende bzw. in Planung oder im Bau befindliche Kraftwerke [9, S.8-9].

2.2.1.4 Industrielle Abscheidung (Industrial Separation)

Die Industrie ist neben der Energiewirtschaft mit einem Anteil von 25% einer der Hauptemittenten von anthropogenen Treibhausgasen [38, S.1074]. Um die festgelegten Klimaziele zu erreichen, müssen bis 2060 weltweit bis zu 28 Gt CO₂ von industriellen Anlagen aufgefangen werden. Dazu zählen Emissionen, die bei energieintensiven Industrien wie z.B. Chemikalien-, Keramik-, Glas, Stahl, Papier-, Zement- und der Petrochemikalienproduktion entstehen [8, S.22]. Diese sind meist Verfahren, bei denen schwer vermeidbare CO₂-Emissionen auftreten.

Im folgenden Kapitel werden schwerpunktmäßig einige Branchen mit emissionsintensiven Industrieprozessen ausgewählt und mögliche CO₂-Abscheidungswege mit CCS aufgezeigt. Laut IPCC ist die Effektivität dieser Prozesse noch spärlich erforscht, auch weil dieser Bereich auf Grund von wirtschaftlichen Interessen bisher von klimapolitischen Entscheidungen und Regularien meist ausgenommen wurde [39, S.1223]. Neben der Abscheidung von Kohlenstoffdioxid mit CCS, können natürlich auch die Energie- und Materialeffizienz der Anlagen optimiert, Recycling- und Kreislaufwirtschaft in den Blick genommen und Kraftstoffe ausgetauscht werden, um die Anlagen weiter zu dekarbonisieren [40, S.38].

Die entstehenden CO₂-Emissionen sind bei allen Verfahren auf eine Mischung von energiebedingten Emissionen, die bei der Umwandlung von Energieträgern für diese Verfahren entstehen, als auch auf Emissionen zurückzuführen, die prozessbedingt im Rahmen der Produktion entstehen. Eine Übersicht ausgewählter Industriebranchen, deren Emissionen in Deutschland und mögliche Capture Technologien sowie deren Entwicklungsstand, ist Tabelle 1 zu entnehmen. Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Branchen genauer geschildert. Prozesse, die in der Energiewirtschaft genutzt werden, wurden bereits in den Kapiteln 2.2.1.1-2.2.1.3 beschrieben und bilden die Grundlage für dieses Kapitel.

Tabelle 1. Übersicht einiger Industriebranchen mit Abscheideoptionen und Entwicklungsständen¹⁹

Industriebranche	Emissionen in D im Jahr 2021 [Mio. t CO ₂ -Äq]	CO ₂ -Capture Maßnahmen und Abscheidetechnologien	Entwicklungsstand ²⁰
Eisen- und Stahlproduktion	35,4	<ul style="list-style-type: none"> Hochofen: Gichtgasrecycling mit Post-Combustion (physikalische oder chemische Absorption) 	TRL 9 – Kommerzielle Anwendung
		<ul style="list-style-type: none"> Hochofen: Gichtgasumwandlung mit Pre-Combustion (Shift Reaktion) 	TRL 6 - Pilotanlagen
		<ul style="list-style-type: none"> Direktreduktion: Oxyfuel-Gebläseofen 	TRL 6 - Pilotanlagen
Petrochemische Industrie	22,5	Abscheidung von CO ₂ in Abgasströmen <ul style="list-style-type: none"> Post-Combustion und Oxyfuel-Verfahren 	TRL 9 – Kommerzielle Anwendung
Zementproduktion	20,5	<ul style="list-style-type: none"> Post-Combustion nach Klinkerofen Oxyfuel-Ofen integriert in Klinkerbrennprozess 	TRL 6 - Pilotanlagen
Chemische Industrie	17,2	Beispiel Ammoniak-Synthese: <ul style="list-style-type: none"> Pre-Combustion mit chemischer oder physikalischer Absorption 	TRL 9 – Kommerzielle Anwendung

Eisen- und Stahlproduktion

Stahl ist eine Legierung auf Eisenbasis und ein vielfältiger und anpassungsfähiger Rohstoff, der für viele Konstruktionsprodukte verwendet und benötigt wird [43, S.229]. Eine Übersicht der verschiedenen Herstellungswege per Hochofen, Schmelz- oder Direktreduktion kann Abbildung 16 entnommen werden. Die Eisen- und Stahlindustrie trägt durch ihre energieintensive Produktion und die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern, zu 31% der weltweit industriell bedingten Emissionen bei [38, S.1074].

¹⁹ Selbsterstellte Tabelle. Quellen Daten: Abscheidetechnologien und Entwicklungsstände [41, S.207], Werte CO₂-Emissionen D [30, S.IV], Stand Technologie [42, S.13], Petrochemische Industrie: [29, S.19].

²⁰ Der Entwicklungsstand von Technologien wird mit dem **Technology readiness level (TRL)** angegeben. TRL 1-3 beschreiben die Research-Phase, TRL4-6 die Development-Phase und TRL 7-9 die Demonstration-Phase.

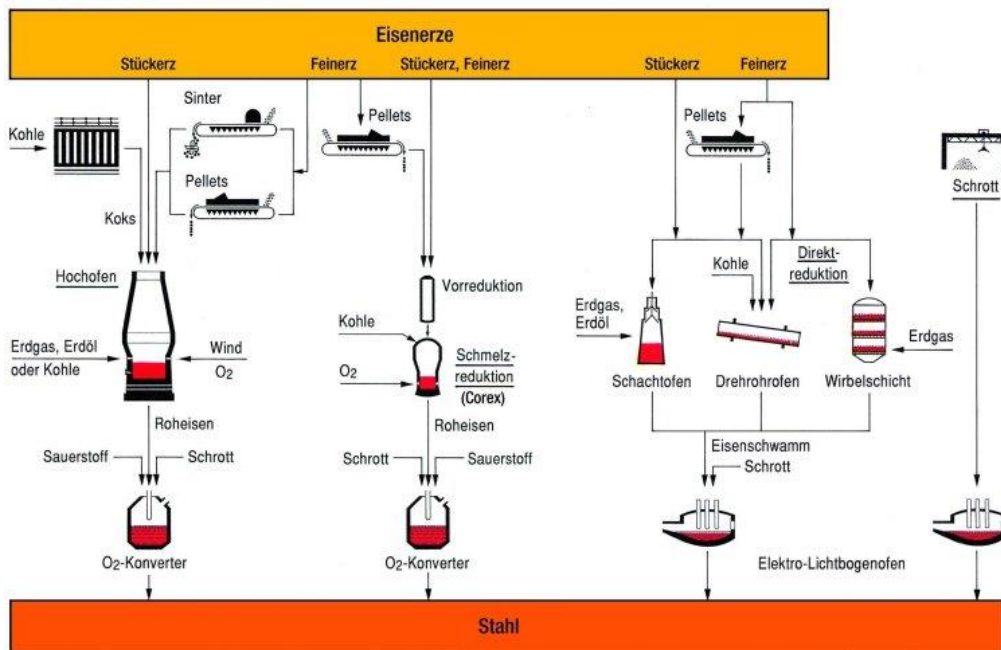


Abbildung 16. Übersicht mögliche Prozessketten Roheisen- und Rohstahlerzeugung²¹

Bei der Produktion von Roheisen entstehen sowohl energiebedingte als auch prozessbedingte Emissionen. Hochöfen machen mit einem Anteil 70% den größten Teil der weltweiten Anlagen aus [44, S.140-141]. Eine schematische Darstellung einer solchen Anlage kann Abbildung 17 entnommen werden. Im Hochofen wird Koks (gewonnen aus Steinkohle) mit Eisenerz (Eisenoxid) geschichtet und mit Zuschlägen z.B. Kalkstein oder Tonschiefer versetzt. Die Zuschläge dienen zur leichteren Abführung der Beimengungen des Eisenerzes. Zu Beginn des Vorgangs wird die unterste Schicht aus Koks entzündet. Über Winderhitzer, wird der für die Verbrennung benötigte „Wind“, eine auf 900- 1300 °C vorgewärmte und mit Sauerstoff angereicherte Luft, zugeführt [45, S.1937-1938]. In den unterschiedlich heißen Schichten laufen verschiedene, mehrschrittige Reaktionen ab (vgl. Abbildung 17). Vereinfacht lässt sich zusammenfassen, dass Koks zu Kohlenstoffmonoxid verbrennt (siehe Reaktionsgleichung (13)). Dieses reduziert das Eisenerz zu Eisen und Kohlenstoffdioxid (siehe (14)).

²¹ Abbildung Stahlerzeugung: <https://vdeh.de/stahlerstellung/kohlenstoffbasierte-stahlerzeugung/> (letzter Zugriff 21.05.24).

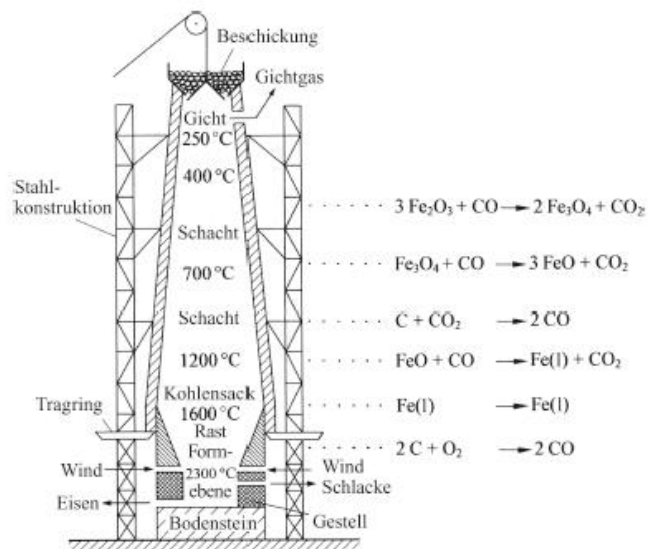


Abbildung 17. Schema des Hochofens zur Eisenerzeugung aus Eisenerz²²

(13) Verbrennung von Koks: $2 C(s) + O_2(g) \rightarrow 2 CO(g)$

(14) Reduktion von Eisenoxid: $Fe_2O_3(s) + 3 CO(g) \rightarrow 2 Fe(s) + 3 CO_2(g)$

Die meisten Forschungsbestrebungen zur Emissionsreduktion fokussieren die Hochofenanlage. Während des Hochofenprozesses entsteht im oberen Hochofenbereich Gichtgas bzw. Hochofengas, welches 50-55% N_2 , 25-30% CO , 10-16% CO_2 , 0,5-5% H_2 und 0-3% CH_4 enthält [45, S.1939]. Kohlenstoffdioxid kann durch Post-Combustion-Verfahren mit chemischer oder physikalischer Absorption durch Gichtgasrecycling bzw. -reinigung [engl. *top-gas recycling*] aus dem Gasstrom abgetrennt werden [29, S.20]. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das im Gichtgas vorhandene Kohlenstoffmonoxid mit Hilfe der im Pre-Combustion Verfahren angewendeten Wassergas-Shift-Reaktion, zu Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff umzuwandeln. Die Produkte der Reaktion könnten weiter als Rohstoffe oder zum Betrieb der Anlage genutzt werden. Die Möglichkeit der Integration einer Gichtgasreinigung in eine Hochofenanlage ist in Abbildung 18 dargestellt.

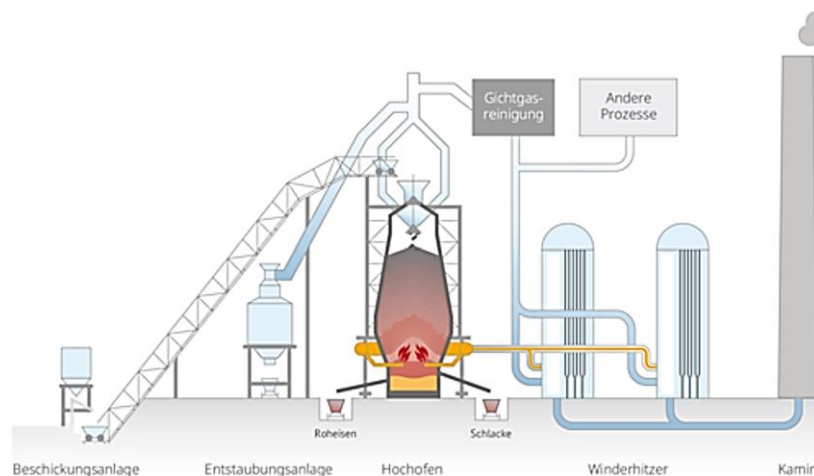


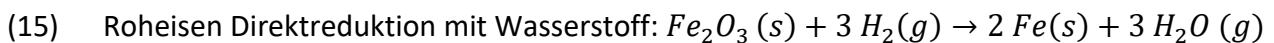
Abbildung 18. Hochofenprozessanlage mit Gichtgasreinigung²³

²² Abbildung Hochofen: [45, S.1937].

²³ Abbildung Gichtgasreinigung: <https://www.durag.com/de/stahlindustrie-1559.htm> (letzter Zugriff 31.05.24).

Darüber hinaus gibt es Bestrebungen neben dem Hochofen auch verstärkt Direktreduktionsverfahren in den Blick zu nehmen, die auf Koks als Rohstoff verzichten. Die Reduktionsvorgänge erfolgen hier z.B. mit Erdgas. Anschließend findet der Schmelzvorgang mit reduziertem Eisen im Elektro-Lichtbogen statt [29, S.21]. In den Gebläseöfen könnten Oxyfuel-Prozesse für die Verbrennung der Rohstoffe eingesetzt werden, um hohe Kohlenstoffdioxidkonzentration im Rauchgas zu erreichen [44, S.244]. In Projekten wie Carbon2Chem²⁴ werden diese Rauchgasströme dann für die Produktion von Chemikalien wie Harnstoff und Methanol genutzt.

Bei einer Direktreduktion mit Wasserstoff, kann vollständig auf fossile Energieträger verzichtet werden (siehe Reaktionsgleichung (15)).



Roheisen wird mit Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen zur Reaktion gebracht. Dabei entsteht kein Kohlenstoffdioxid. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der Produktion von „grünem Stahl“.

Petrochemische Industrie

In Raffinerien werden aus Erdöl verschiedene petrochemische Produkte wie z.B. Kraftstoffe und Heizöle durch fraktionierte Destillation hergestellt. Auch die Förderung, Aufbereitung und Nutzung von Erdgas gehört zu diesem Industriezweig und wird in Kapitel 2.4.1 im Rahmen der Speicherung in Kohleflözen und der damit verbundenen *Enhanced Coal Bed Methane Recovery* (CO₂-ECBM) genauer geschildert. Erdöl besteht hauptsächlich aus einem Stoffgemisch aus Kohlenwasserstoffen (meist Aromaten, Alkane, Alkene, Alkine, Cycloalkane), die sich je nach Förderregion unterscheiden [46, S.274]. Die Auftrennung in die verschiedenen Bestandteile des Stoffgemischs erfolgt mit Hilfe des Verfahrens der fraktionierten Destillation (siehe Abbildung 19). Da die unterschiedlichen Verbindungen unterschiedliche Siedetemperaturen haben, lassen sie sich durch Erhitzen und Kondensation in den Glocken- und Siebböden des Destillationsturms abtrennen. Rückstände können mit Hilfe des Vakuumdestillationsturms weiter aufgetrennt werden [46, S.276].

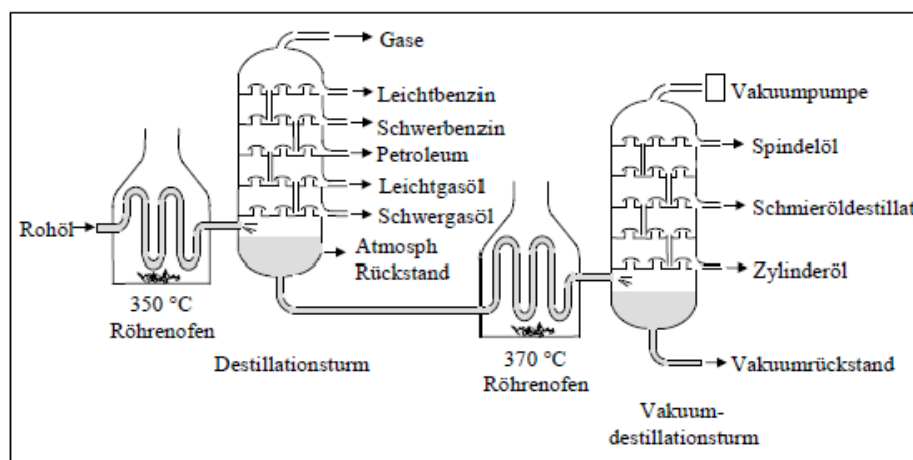


Abbildung 19. Fraktionierte Destillation von Rohöl mit Vakuum-Destillation²⁵

²⁴ <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/carbonmanagement/kohlenstoffkreislauf.html> (letzter Zugriff 21.05.24).

²⁵ Abbildung fraktionierte Destillation: [46, S.277].

Die Kohlenstoffdioxid-Emissionen entstehen bei den Raffinerieprozessen durch den Energiebedarf der Prozessöfen und während der Weiterverarbeitung der Erdölfraktionen, besonders beim katalytischen Cracken, meist in Form des Fließbett-Verfahrens [engl. *Fluid-Catalytic Cracking*, FCC] [38, S.1078]. Durch den Einsatz von Katalysatoren beim Crackprozess, können die Reaktionstemperaturen herabgesetzt und langkettige Alkane in kurzkettigere Produkte mit niedrigeren Siedetemperaturen aufgespalten [engl. *(to) crack*] werden. Dies kann z.B. die Oktanzahl von Kraftstoffgemischen erhöhen [46, S.280]. Beim FCC-Verfahren (auch Fließstaub- bzw. Wirbelschichtverfahren) wird heißer Katalysatorstaub aufgewirbelt, um den Crackprozess einzuleiten (siehe Abbildung 20).

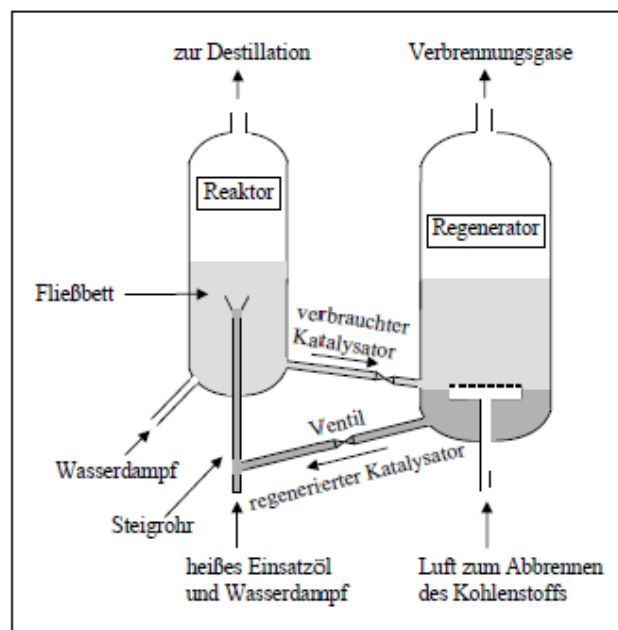


Abbildung 20. Schematische Darstellung des FCC-Verfahrens²⁶

In einem Steigrohr [engl. *riser*] wird Wasserdampf und heißes Schweröl mit einem Katalysator, meist Aluminohydrosilikatstaub, zur Reaktion gebracht. Der Staub wird durch das verdampfende Schweröl aufgewirbelt und bildet die Fließbettschicht. An der heißen Katalysatoroberfläche werden die Kohlenwasserstoffe gecrackt und verlassen den Reaktor. Der deaktivierte Katalysator muss anschließend in den Regenerator geleitet werden, da dessen Oberfläche durch Rußbildung beeinträchtigt ist. Bei bis zu 700 °C wird der Katalysator erhitzt und regeneriert, die einströmende Luft verbrennt den Ruß auf der Oberfläche und bei diesen Vorgängen wird Kohlenstoffdioxid freigesetzt. In der Abbildung 20 ist dies als Verbrennungsgas gekennzeichnet, welches den Regenerator verlässt [46, S.286]. Das entstehende Kohlenstoffdioxid könnte durch Post-Combustion oder Oxyfuel-Verfahren aufgefangen und vom Regenerator in die CCS-Prozesskette eingespeist werden [38, S.1078]. Dieser Anschluss an bestehende FCC-Regeneratoren kann der unteren linken Seite der Abbildung 21 entnommen werden.

²⁶ Abbildung FCC-Verfahren: [46, S.286].

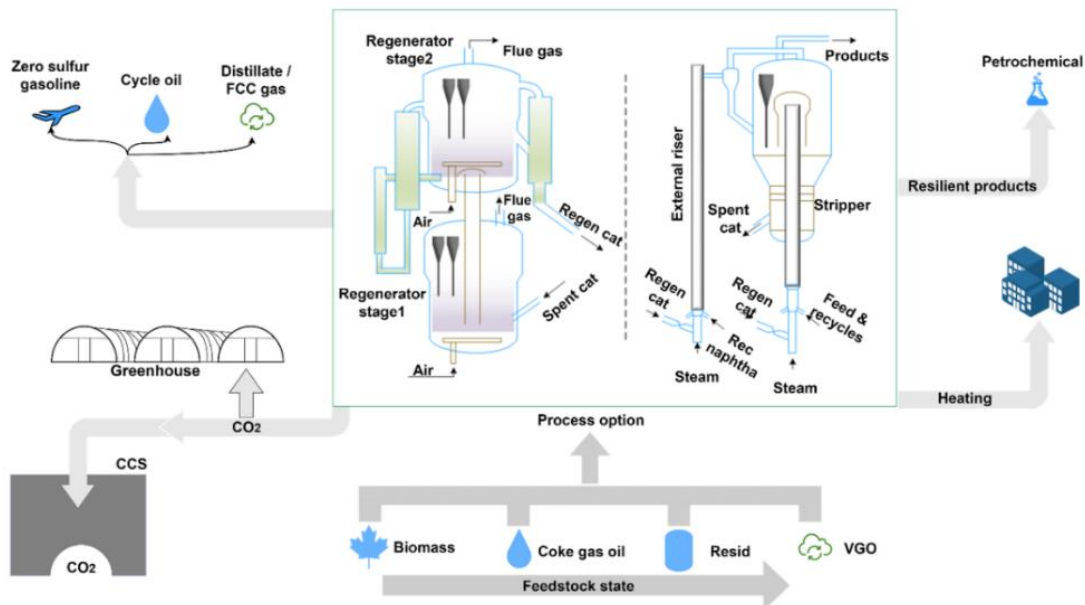


Abbildung 21. Exemplarischer Anschluss der CCS-Prozesskette an einen FCC-Reaktor.²⁷

Die petrochemische Industrie verfügt, im Gegensatz zu anderen Industriezweigen, über langjährige Erfahrungswerte in der Erdöl- und Erdgasförderung (siehe 2.4.1 Enhanced Oil Recovery EOR) und dem Gastransport, die für die Implementierung der CCS-Technologie appliziert werden könnten. Dies könnte z.B. bei der Erschließung und Überwachung von geologischen Speicherstätten sowie dem On- und Offshore-Transport per Pipeline, sowie dem Ausbau einer komplexen Infrastruktur angewendet werden [38, S.1078].

Zementindustrie

Mit drei Milliarden Tonnen ist Zement einer der meistproduzierten Rohstoffe weltweit und besonders im Bausektor ein bisher unverzichtbarer Rohstoff [47, S.239]. Der industriell bedeutendste „Portlandzement“ (Kalk-Ton-Zement) besteht aus einem Stoffgemisch aus Calciumoxid (CaO), Siliciumoxid (SiO_2), Aluminiumoxid (Al_2O_3) und Eisenoxid (Fe_2O_3) [32, S.1479]. Die Schritte der Zementproduktion sind in Abbildung 22 dargestellt. Zur Herstellung von Zement wird zunächst Zementklinker benötigt. Die Rohstoffe werden in Steinbrüchen abgebaut und vorzerkleinert und bestehen zum großen Teil aus Ton und Kalkstein. Nach der Zerkleinerung wird das so entstandene Gemenge (bestehend aus Kreide, Kalkstein und Ton) zur Brennung von Zementklinker in Hochtemperaturdrehrohröfen verwendet [32, S.1479]. Dabei wird das Stoffmehl mit Hilfe eines Vorwärmerofens getrocknet und dabei 68% der gesamten Kohlenstoffdioxid-Emissionen prozessbedingt aus den gebundenen Carbonaten und 32% energiebedingt aus dem Brennstoffeinsatz freigesetzt [47, S.240]. Durch Nachschaltung eines Calcinators, bei dem erneut Brennstoff zugeführt wird, können bis zu 90% der Carbonate umgesetzt werden. Der eigentliche Klinkerbrennprozess erfolgt anschließend im Drehofen bei 1450-2000 °C.

²⁷ Abbildung CCS mit FCC: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2061>. (letzter Zugriff 30.05.24). **VGO**: vacuum gas oil, **Rec**: reactant (feed).

Kohlenstoffdioxid entsteht bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern, meist Kohle oder Erdgas, die für den Betrieb des Ofens nötig sind. Im Klinkerofen bilden sich unter anderem Calciumsilicate, die dann abgekühlt und unter Zugabe von Calciumsulfat und z.B. Kalkstein zu Zement gemahlen werden [47, S.239].

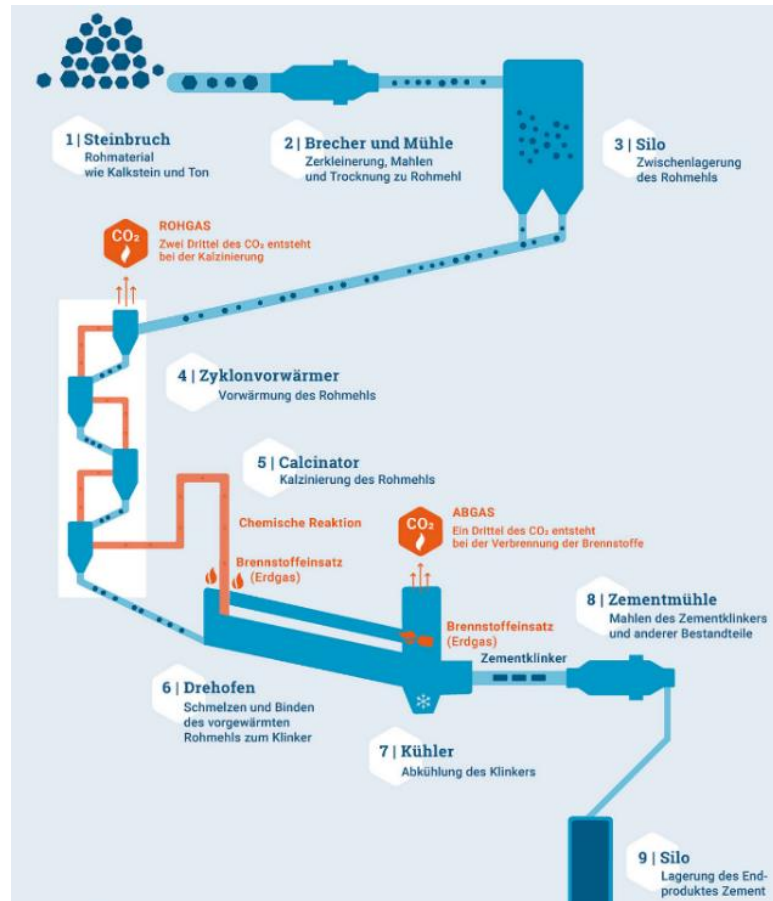


Abbildung 22. Vereinfachte Zementherstellung²⁸

Die Produktion einer Tonne Zement erzeugt zwischen 600 und 1000 kg CO_2 -Emissionen. Somit trägt die Zementindustrie zu 5%-8% [48, S.31] der globalen Emissionen durch diese Herstellungsprozesse bei. China, Indien und die EU sind die Hauptproduzenten von Zement weltweit [48, S.32]. Neben den Strombedarfen dieser Anlagen, sind besonders die Klinkerproduktion und die Beheizung der Öfen mit fossilen Energieträgern die Hauptquellen für etwaige Emissionen [44, S.143]. Mit Hilfe von Post-Combustion und Oxyfuel-Capture Methoden können diese Kohlenstoffdioxid-Emissionen reduziert werden. Pre-Combustion Verfahren eignen sich nicht, weil die Emissionen aus der Klinkerproduktion durch diese Technologieoption nicht aufgefangen werden können [27, S.285].

Post-Combustion Verfahren werden favorisiert eingesetzt, weil sie wenig Einfluss auf die Produktion nehmen und in bestehende Anlagen integriert bzw. nachgerüstet werden können [48, S.35] (vgl. Abbildung 23). Die Abtrennung erfolgt nach den Klinkeröfen und erzielt 14-33% CO_2 -Abscheideraten [29, S.21].

²⁸ Abbildung Zementherstellung: Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien. Schaubild konventionelle Zementproduktion. <https://www.klimaschutz-industrie.de/themen/branchen/zementindustrie/konventionelle-zementherstellung/> (letzter Zugriff 30.05.24).

Kohlenstoffdioxid kann z.B. durch die Verwendung von flüssigen Lösemitteln wie Aminen und Calcium-Looping abgetrennt werden. Die Abscheidung mit Aminen ist im Gegensatz zu anderen Optionen sehr teuer, da Amine vor NO_x- und SO_x-Verunreinigungen geschützt werden müssen. Um eine Entstehung von korrosiven Salzen und die Bildung von Salpetersäure zu verhindern, die zu Korrosionsprozessen und der Hemmung der Amine beitragen würden [48, S.35], müssen die entstehenden Rauchgase zuerst aufwändig durch Nasswäschen und selektive katalytische Reduktion aufgereinigt werden [38, S.1077]. Dies macht den Prozess teuer und die anschließende Regeneration des Lösemittels sorgt für eine Verdopplung der Energie- und Herstellungskosten [27, S.386].

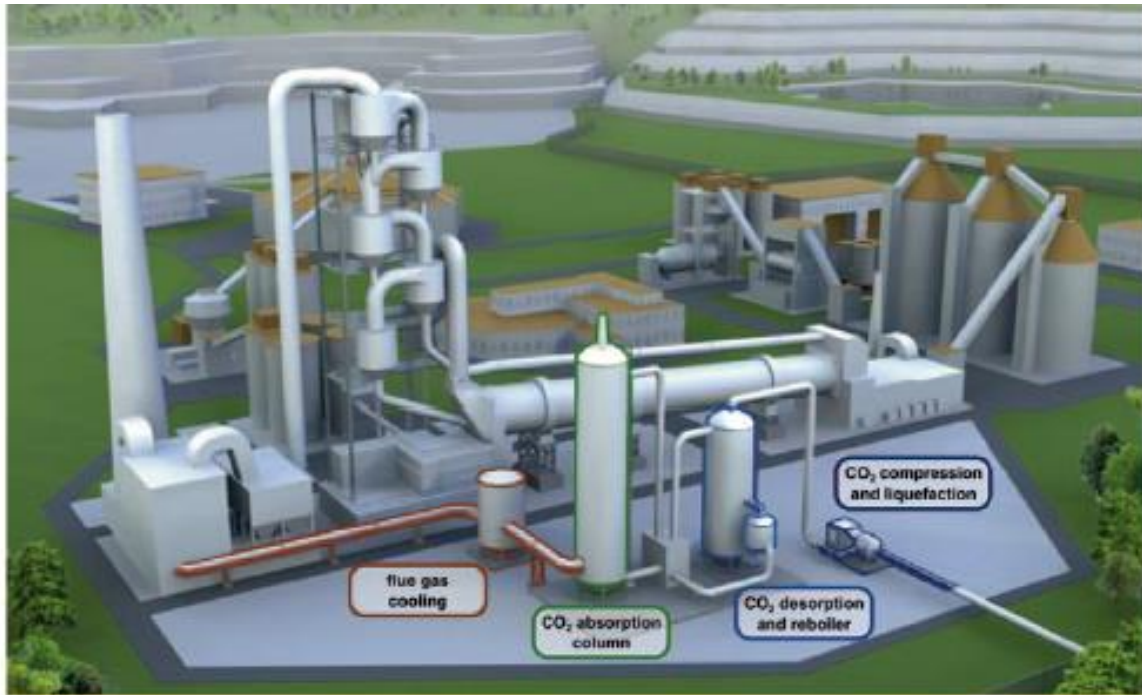


Abbildung 23. Post-Combustion Anlage in einem Zementwerk²⁹

Folglich wird der Calcium-Looping Prozess als Alternativansatz favorisiert, da hier Calciumoxid, ein zentraler Stoff der Zementgewinnung [38, S.1076] als Edukt mit dem Rauchgas bei 600-700 °C zur Reaktion gebracht wird. Es bildet sich Calciumcarbonat (siehe Reaktionsgleichung (16)), welches dann auf 890-930°C erhitzt wird. Daraus entstehen erneut Calciumoxid und Kohlenstoffdioxid.

Letzteres kann durch Verbrennung mit reinem Sauerstoff und Aufreinigung abgetrennt werden (siehe Abbildung 24). Calciumoxid kann dem Prozess erneut zugeführt werden [48, S.35] (siehe Kapitel 2.2.1.2 für die genaue Funktionsweise). Mit der Integration dieser Technologie können Abscheideraten von bis zu 98% erreicht werden.

²⁹ Abbildung Post-Combustion Zementwerk: [27, S.385].

(16) Reaktion von Rauchgas im Carbonator: $\text{CaO (s)} + \text{CO}_2(\text{g}) \xrightarrow{\Delta} \text{CaCO}_3 (\text{s})$

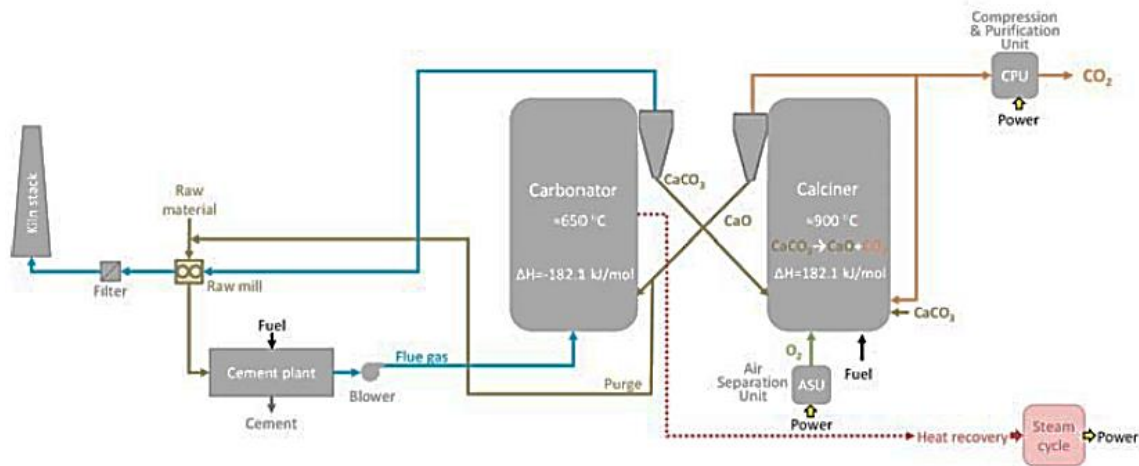


Abbildung 24. Exemplarische Calcium-Looping Integration innerhalb einer Zementproduktionsanlage³⁰

Neben Post-Combustion Ansätzen, wird auch die Oxyfuel Technologie in Erwägung gezogen [38, S.1076]. Sie wird in den Klinkerbrennprozess integriert, bei dem Abgasströme mit 85-90% CO₂-Anteil entstehen [27, S.386]. Die Anlage benötigt reinen Sauerstoff, um betrieben zu werden. Um diese großen Mengen an Sauerstoff bereitzustellen, muss eine Luftzerlegungsanlage integriert werden. Außerdem muss das Abgas noch weiter aufgereinigt werden, um für andere Anwendungen weiter verwendet werden zu können (vgl. Abbildung 25).

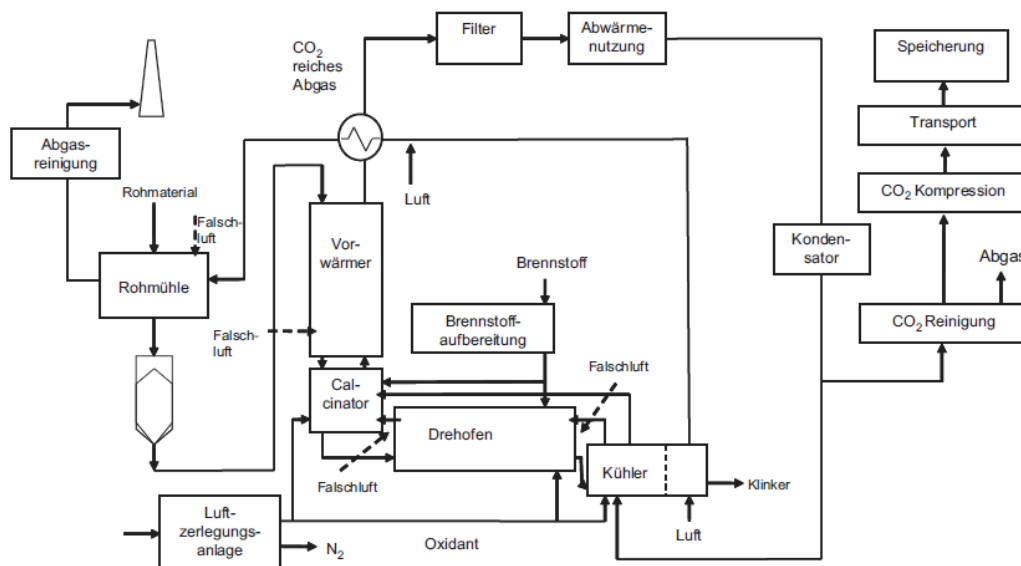


Abbildung 25. Zementanlage mit Oxyfuel-Technologie³¹

Bisher sind alle geschilderten Abscheideoptionen noch in frühen Entwicklungsstadien (TRL 6 Pilotanlagen). Dies liegt u.a. daran, weil in diesem Sektor lange Planungs- und Implementationszeiten [38, S.1077] vorgesehen sind und Anlagen Laufzeiten von 30-50 Jahren haben [48, S.35].

³⁰ Abbildung Calcium-Looping in Zementanlage: [48, S.44].

³¹ Abbildung Oxyfuel-Technologie in Zementanlage: [27, S.387].

Neben der Implementation von CCS-Technologien, könnten zur Reduktion von Emissionen auch andere Brennstoffe eingesetzt oder Zemente mit geringerem Klinkeranteil verwendet werden. Mineralische Bindemittel oder der vermehrte Einsatz von Kalkstein und Flugasche als Ersatz von Klinker werden gerade erforscht [47, S.241].

Chemische Industrie

Die deutschen Chemieunternehmen haben einen Anteil von ca. 10% am deutschen Stromverbrauch für ihre Produktionsketten [44, S.137]. Darüber hinaus entstehen prozessbedingte Emissionen, besonders bei der Herstellung von chemischen Rohstoffen wie z.B. Ammoniak oder Methanol. Exemplarisch soll hier Ammoniak als Beispielsubstanz herausgegriffen werden.

Ammoniak wird über das Haber-Bosch-Verfahren synthetisiert. Die Reaktion findet katalysiert bei Drücken von 100-1000 bar und 400-550 °C statt [49, S.428]. Diese Reaktionsbedingungen sind notwendig, um mit Hilfe der stattfindenden Gleichgewichtsreaktion eine hohe Ausbeute an Ammoniak zu erzielen (vgl. Abbildung 26 und (17) [33, S.188]).

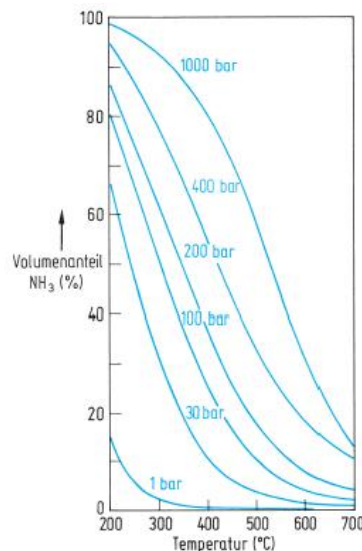
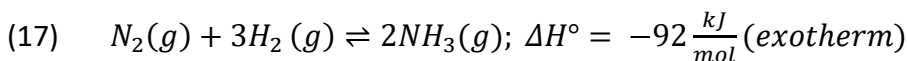


Abbildung 26. Diagramm Ammoniakgleichgewicht Druck und Temperaturabhängigkeit³²



Um den Rohstoff Ammoniak herzustellen, müssen erst die Ausgangsstoffe produziert werden. Stickstoff wird durch wiederholte Destillation und Kondensation der verflüssigten Luft gewonnen (siehe Luftzerlegung: Pre-Combustion Verfahren). Die Kohlenstoffdioxid-Emissionen fallen als Nebenprodukt bei der Produktion des Edukts Wasserstoff an. Um den Ausgangsstoff Wasserstoff herzustellen, wird Syngas aus Kohle, Dampfreforming mit Erdgas oder eine partielle Oxidation mit Schweröl durchgeführt (siehe Pre-Combustion: Syngasherstellung). Bei diesen Verfahren entstehen die meisten CO₂-Emissionen. Das entstehende Kohlenstoffdioxid wird, angelehnt an das Pre-Combustion Verfahren, durch chemische oder physikalische Adsorptionsverfahren (siehe 2.2.2) abgetrennt und kann dann weiter zur Herstellung von Methanol oder Harnstoff eingesetzt werden.

³² Abbildung Druck-Temperaturdiagramm Ammoniak [33, S.168].

2.2.1.5 Direct Air Capture (DAC)

Mit dem Begriff Direct Air Capture (DAC) wird eine Technologieoption bezeichnet, bei der Kohlenstoffdioxid direkt aus der Luft abgeschieden wird. Im Vergleich der bisherigen geschilderten Technologien aus den Unterkapiteln 2.2.1.1 - 2.2.1.4, wird Kohlenstoffdioxid nicht in Industrieanlagen, sondern direkt aus der Atmosphäre entnommen. Das Verfahren ähnelt einem „Riesenstaubsauger“³³, der Kohlenstoffdioxid aus der Umgebungsluft entfernt. Nachteilig für den Prozess ist, dass Kohlenstoffdioxid in unserer Atmosphäre nur als Spurengas mit geringen Konzentrationen von ~ 0,04 Vol-% vorhanden ist. Das entspricht 400 ppm und einer 100–300-mal größeren Verdünnung als bei Kraftwerkemissionen [38, S.1127]. Um ähnliche Abscheideraten wie bei anderen Capture-Verfahren zu erzielen, muss im DAC-Prozess deutlich mehr Energie aufgewendet werden.

Man unterscheidet zwischen zwei grundlegenden Verfahren, um die Abscheidung mit DAC zu ermöglichen. Lösemittelbasierte, liquid³⁴-DAC-Verfahren oder solche, die auf festen Sorbenzien beruhen und auch als solid³⁵-DAC-Verfahren bezeichnet werden. Ein vereinfachtes Prozessschema kann Abbildung 27 entnommen werden.

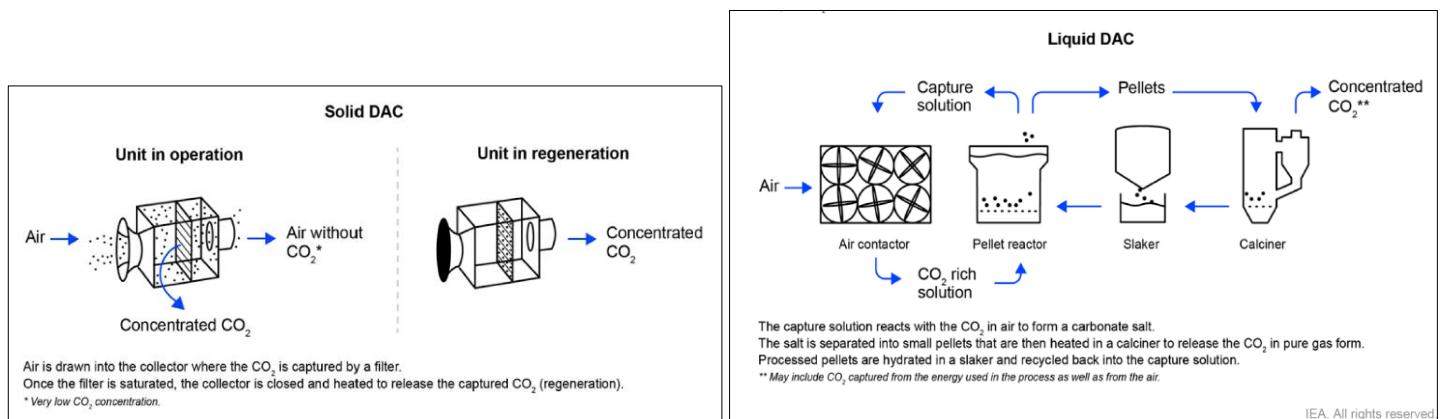


Abbildung 27. Übersicht S-DAC und L-DAC-Verfahren³⁶

Im S-DAC-Verfahren wird Kohlenstoffdioxid an mit Aminverbindungen versetzten Filtern adsorbiert. Dies können z.B. Zeolite, Kunstharze, Aktivkohle oder metallorganische Gerüste (MOFs) sein. Die Prozesse finden in einer Art Zyklus statt, nach der Adsorption bei Raumtemperatur und Normaldruck, erfolgt die Desorption bei 80-100 °C und niedrigeren Drücken in einer Temperatur-Wechsel-Adsorption [engl. *temperature-swing adsorption*]. Kohlenstoffdioxid kann nach der Regeneration der Filter abgetrennt werden.

³³ Samira El Hattab. Ein „Riesenstaubsauger“ für CO₂. Beitrag vom 05.11.23. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/energie/co2-entnahme-filter-greenlyte-100.html> (letzter Zugriff 24.04.24).

³⁴ In der Literatur findet man auch folgende, synonym verwendete Bezeichnungen: L-DAC, Wet air capture und HT (high temperature)-DAC.

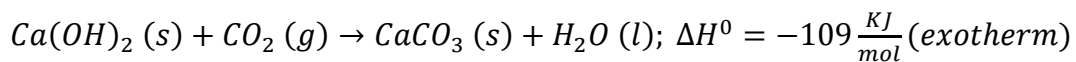
³⁵ In der Literatur findet man auch folgende, synonym verwendete Bezeichnungen: S-DAC, Dry air capture und LT (low temperature)-DAC.

³⁶ Abbildung S- und L-DAC-Verfahren: [50, S.21].

Bei dem Verfahren mit Lösemittel-basierten Technologien (L-DAC) wird Kohlenstoffdioxid durch ein stark basisches Lösemittel wie Calciumhydroxid-Lösung ($\text{Ca}(\text{OH})_2 (\text{aq})$) absorbiert und zur Reaktion gebracht. Es entstehen die Reaktionsprodukte Calciumcarbonat und Wasser (siehe Reaktionsgleichung (18) nach [9, S.10]).

Calciumcarbonat wird bei 900 °C gebrannt und getrocknet und bildet Calciumoxid ($\text{CaO} (\text{s})$). Als weiteres Reaktionsprodukt entsteht konzentriertes Kohlenstoffdioxid (siehe (19)). Wird die Verbindung abschließend mit Wasser versetzt, entsteht erneut Calciumhydroxid, welches wieder in den Prozess eingebracht werden kann (siehe Reaktionsgleichung (20)). Alternativ können hier auch Lösemittel wie Natron- oder Kalilauge eingesetzt werden [37, S.154].

(18) *Absorption:*



(19) *Kalkbrennen:* $\text{CaCO}_3 (\text{s}) \rightarrow \text{CaO} (\text{s}) + \text{CO}_2 (\text{g}); \Delta H^0 = 179,2 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} (\text{endotherm})$

(20) *Kalklöschen:* $\text{CaO} (\text{s}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 (\text{s}); \Delta H^0 = -64,5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} (\text{exotherm})$

Beide Verfahren können in verschiedensten Regionen, ohne Konkurrenz zu landwirtschaftlichen Nutzflächen etabliert werden. Je nach Standort, eignet sich eher das L-DAC bzw. S-DAC Verfahren, da beide nach unterschiedlichen Voraussetzungen funktionieren. Eine Übersicht der verschiedenen Merkmale kann Tabelle 2 entnommen werden. S-DAC-Anlagen benötigen z.B. mehr Landfläche, weil sie modular aufgestellt werden. Sie können jedoch bei niedrigeren Temperaturen betrieben und das für die Produktion benötigte Wasser, kann aus der Luft extrahiert werden. L-DAC ist nur in großen Anlagen mit erhöhtem Wasserverbrauch umsetzbar, hat jedoch einen geringeren Strom- und Energieverbrauch, bei höherer CO_2 -Abscheidekapazität.

Tabelle 2. Gegenüberstellung zentraler Merkmale der S-DAC und L-DAC-Technologie³⁷

Merkmale	S-DAC	L-DAC
Energieverbrauch (GJ/tCO ₂)	7,2-9,5	5,5-8,8
Anteil am Stromverbrauch (%)	20-25%	0-20%
Anteil am Wärmeverbrauch (%)	75-80%	80-100%
Regenerationstemperatur	80-100 °C	900 °C
Wasserverbrauch (tH ₂ O/tCO ₂)	1	0-50
Landverbrauch (km ² /MtCO ₂)	1,2-1,7	0,4
Abscheidekapazität	Modular z.B. 50 tCO ₂ /Jahr pro Modul	Großanlage [engl. large-scale] z.B. 0,5-1 MtCO ₂ /Jahr

Zur Zeit befindet sich die DAC Technologie im Stadium der Pilotierung mit vereinzelten Demonstrationsanlagen (TRL 7) [9, S.10]. Im Gegensatz zu den in Kapiteln 2.2.1.1 - 2.2.1.4 geschilderten Technologien ist DAC nicht an eine feste CCS-Prozesskette gebunden und könnte auch für Emissionen aus mobileren Quellen wie z.B. dem Verkehrssektor eingesetzt werden.

³⁷ Selbsterstellte Tabelle Merkmale S- und L-DAC: basierend auf Werten aus [50, S.23] gekürzt und übersetzt.

Außerdem bestünde die Möglichkeit, etwaig auftretende Emissionen und Leckagen der CCS-Prozesskette aus geologischen Speicherstätten aufzufangen [37, S.154].

Wenn DAC mit CCS kombiniert wird, bezeichnet man die Technologie als *DACCS (Direct Air Carbon Capture and Storage)* oder *DACS (Direct Air Capture and Storage)*. Die gesamte Prozesskette gilt dann als Negativemissions-Technologie (NET) bzw. Carbon Dioxide Removal (CDR)- Technologie und soll vor allem zum Ausgleich von Restemissionen eingesetzt werden [11].

Nach der Abscheidung von Kohlenstoffdioxid aus der Luft wird es aufbereitet und zu einer geologischen Lagerstätte weitertransportiert. Da das DAC-System an vielen Standorten einsetzbar ist, kann es flexibel direkt an bestehende Emittenten integriert werden. Voraussetzung ist der Zugang zu Wasser und erneuerbaren Energiequellen in der Nähe der Anlagen [51, S.14]. Im Einsatz könnte DACCS ein Abscheidopotential von 5-40 Gt Kohlenstoffdioxid pro Jahr einbringen.

Ein limitierender Faktor für die Implementation sind bisher besonders der hohe Energiebedarf und die hohen Kosten [39, S.1266]. Diese könnten nur durch weitere Investitionen in Entwicklungs- und Forschungsvorhaben reduziert werden.

2.2.1.6 Zusammenfassung

Der Prozess der Abtrennung und Kompression stellt den energie- und kostenintensivsten Schritt der CCS-Technologie dar [9, S.6]. Die meisten Capture Technologien können, wenn sie in Kraftwerken etabliert werden, 85-95% Kohlenstoffdioxid-Emissionen aus den Prozessen abscheiden (siehe Tabelle 3). Diese Integration ist jedoch mit einem höheren Energiebedarf von 10-40% verbunden, als wenn die Kraftwerke ohne CCS laufen würden [52, S.2]. Dies schlägt sich in einer Erhöhung der Energiekosten von 0,01-0,05 USD pro kWh im Vergleich zu einem regulären Kraftwerk nieder [52, S.9]. Darüber hinaus wird die Effektivität der Kraftwerke je nach Capture Technologie um 6-14% herabgesetzt [41, S.204].

Tabelle 3. Übersicht der verschiedenen Capture Technologien³⁸

Capture Technologie	CO ₂ -Abtrennungseffizienz [Vol-%]	Energiebedarf [GJ/t CO ₂]	Entwicklungsstand (*hier wurde bei mehreren Abscheideoptionen, die am weitesten entwickelte ausgewählt)	Kosten [USD/t CO ₂]
Pre-Combustion	90	3,35	*TRL 9 – Marktreife Anwendung	34 – 63
Oxyfuel-Combustion	>90	4,05	*TRL 7 - Demonstrationsanlagen	52
Post-Combustion	90	4,14	*TRL 9 – Marktreife Anwendung	46 -74
Chemical Looping Combustion	96-99	0,95	TRL 6 - Pilotanlagen	< 59,20
Industrielle Abscheidung	90	5,00	variiert je nach Anwendung	34,80 - 60,90
Direct Air Capture	85-93	5,25	TRL 6 - Pilotanlagen	140 - 340

Welches der Verfahren für eine Sequestrierung in Frage kommt, hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Neben Abtrennungseffizienz, Kosten, Energiebedarf und Entwicklungsstand der Capture Technologie, stehen die Zusammensetzung, Kohlenstoffdioxid-Konzentration, Temperatur und Fließgeschwindigkeit des bei der Capture Technologie entstehenden Rauchgases [*engl. flue gas*] im Vordergrund.

³⁸ Tabelle Übersicht Capture Technologien selbst erstellt: basierend auf Daten aus [9, S.7-8] und [38, S.1065].

Diese unterscheidet sich je nach Verfahren teilweise sehr deutlich (vgl. Abbildung 28). Je niedriger die Kohlenstoffdioxid-Konzentration in industriellen Rauch- und Abgasen ist, desto größer gestaltet sich auch der Abtrennungsaufwand in der Anlage [27, S.256].

The flue gas composition of different CO₂ capture strategies.

Composition of flue gas	Pre-combustion [36,37]	Oxy-fuel combustion [13,38,39]	Post-combustion [36,37]
CO ₂	37.7%	85.0%	10–15%
N ₂	3.9%	5.8%	70–75%
H ₂ O	0.14%	100 ppm	5–10%
H ₂	55.5%	–	–
O ₂	–	4.7%	3–4%
CO	1.7%	50 ppm	20 ppm
NO _x	–	100 ppm	< 800 ppm
SO _x	–	50 ppm	< 500 ppm
H ₂ S	0.4%	–	–

Abbildung 28. Rauchgas-Zusammensetzungen bei Pre-, Post- und Oxyfuel-Combustion Verfahren³⁹

Darüber hinaus entscheidet die Weiterverarbeitung über die Auswahl des Abtrennverfahrens. Je nach Zielprodukt, muss Kohlenstoffdioxid eine bestimmte Konzentration und wenige Verunreinigungen aufweisen. Je nachdem wie das Gas weitertransportiert und gespeichert wird, müssen bestimmte Drücke appliziert, Umweltauswirkungen und Kosten beachtet werden [35, S.265-266]. Bei der Abtrennung aus industriellen Prozessen und über Direct Air Capture ist bisher das letztgenannte Verfahren am energieintensivsten und am teuersten.

Der Entwicklungsstand der anderen Sequestrierungsverfahren ist höher und sie können meist in bestehende Systeme integriert werden, weshalb die Kosten etwas geringer ausfallen. Trotz alledem bleibt der Energieaufwand für alle Verfahren hoch. Weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit wird nötig sein, um Unklarheiten zu identifizieren und die Effektivität der Anlagen in Langzeitanalysen zu bestätigen. Eine Übersicht der weltweit existierenden CCS-Anlagen kann der Website vom Global CCS Institute⁴⁰ entnommen werden. Einen Überblick über globale CCS-Projekte aus den Jahren 2001-2024 bietet die Geoengineering Map⁴¹ der Heinrich Böll Stiftung.

2.2.2 Abscheidetechnologien von Kohlenstoffdioxid (CO₂ separation)

Innerhalb der Abtrennungverfahren, die in Kapitel 2.2.1 geschildert wurden, wird zwischen der Art der genutzten Abscheidetechnologien unterschieden. Eine Auswahl dieser Abscheidetechnologien ist in Abbildung 29 zu finden. Dort werden drei zentrale Methoden herausgestellt: die Absorption, die Adsorption und die natürliche Einbindung. In dieser Arbeit wird ein besonderer Schwerpunkt auf diese Ansätze gelegt, da sie für das entwickelte, bilinguale Lernangebot relevant sind.

In folgenden Teilkapiteln werden diese Abscheidetechnologien vorgestellt und erläutert. Abschließend werden die Methoden im Kapitel 2.2.2.4 gegenübergestellt und die Erkenntnisse zusammengefasst.

³⁹ Abbildung Rauchgaszusammensetzung [35, S.267].

⁴⁰ Global CCS Institute Facility Database: <https://co2re.co/FacilityData> (letzter Zugriff 02.06.24).

⁴¹ Geoengineering Map Heinrich Böll Stiftung: <https://map.geoengineeringmonitor.org/> (letzter Zugriff 02.06.24).

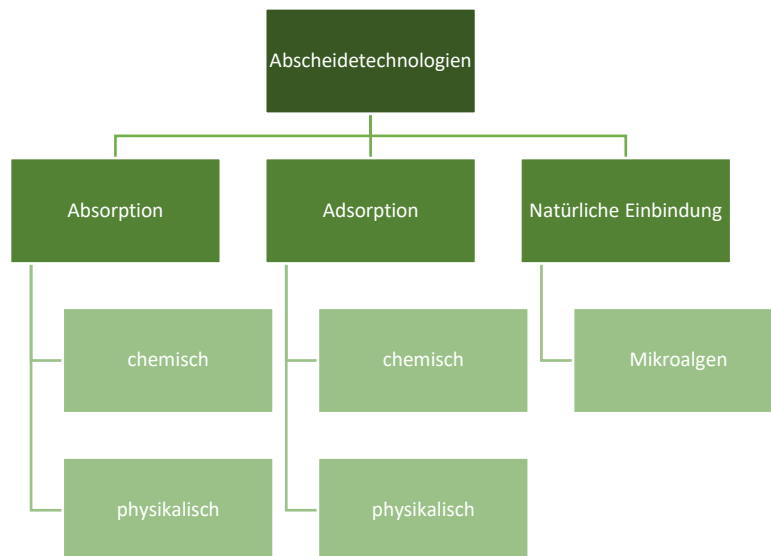


Abbildung 29. Übersicht der Abscheidetechnologien mit Prozessbezeichnungen und Beispielen⁴²

2.2.2.1 Absorption

Die Absorption ist die ausgereifteste und etablierteste Option zur Abscheidung von Kohlenstoffdioxid. Es wird zwischen chemischer und physikalischer Absorption unterschieden. Chemisch wird ein flüssiges Lösemittel durch eine Gas-Flüssigkeitsreaktion [27, S.274] an Kohlenstoffdioxid gebunden und mit Erwärmung wieder regeneriert [engl. *temperature swing absorption (TSA)*]. Bei der physikalischen Absorption wird Kohlenstoffdioxid in einem organischen Lösemittel gelöst und durch Temperatur- oder Druckveränderung [engl. *pressure swing absorption (PSA)*] abgetrennt [9, S.10]. Die physikalische Absorption wird im Pre-Combustion Verfahren eingesetzt, chemische Absorption meist für Post-Combustion und Pre-Combustion Prozesse.

Chemische Absorption

Im industriellen Rahmen werden seit ca. 50 Jahren vor allem 20-30%ige-Lösungen primärer Alkanolamine (z.B. Monoethanolamin, MEA), aber auch sekundäre und tertiäre Amine zur Gaswäsche verwendet. Exemplarische Strukturen von primären und sekundären Aminen können Abbildung 30 entnommen werden. Grund für die weite Verbreitung ist deren Reaktivität und Absorptionsrate, sowie die relativ geringen Kosten. Der Zwitterionenmechanismus (siehe Abbildung 31 Reaktion a) setzt bei 40 °C ein und es entstehen Carbamate. Die entstehende Absorberlösung wird dann weiter mit Wasserdampf erhitzt und Kohlenstoffdioxid freigesetzt. Das Lösemittel wird bei leicht erhöhtem Druck und Temperaturen von 100-140 °C regeneriert. Dies erfordert eine hohe Energiemenge, da Carbamate eine große Bildungswärme aufweisen [36, S.6198]. Da ein Teil des Carbamats hydrolysiert wird und als Hydrogencarbonat vorliegt, verringert sich die Aufnahmekapazität von primären und sekundären Aminen für Kohlenstoffdioxid (siehe Abbildung 31 Reaktion a). Deshalb werden zunehmend tertiäre Amine wie z.B. N-Methyldiethanolamin (MDEA) (Struktur siehe Abbildung 30) eingesetzt, um die Bildung von Carbamaten zu umgehen.

⁴² Abbildung Abscheidetechnologien: gekürzt nach [27, S.267].

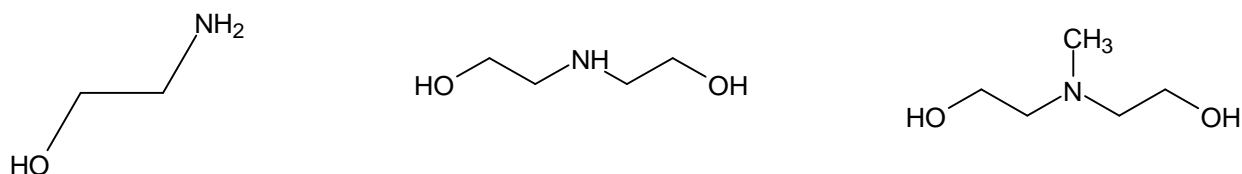


Abbildung 30. (von links nach rechts) Monoethanolamin (MEA), Diethanolamin (DEA) und N-Methyldiethanolamin (MDEA)

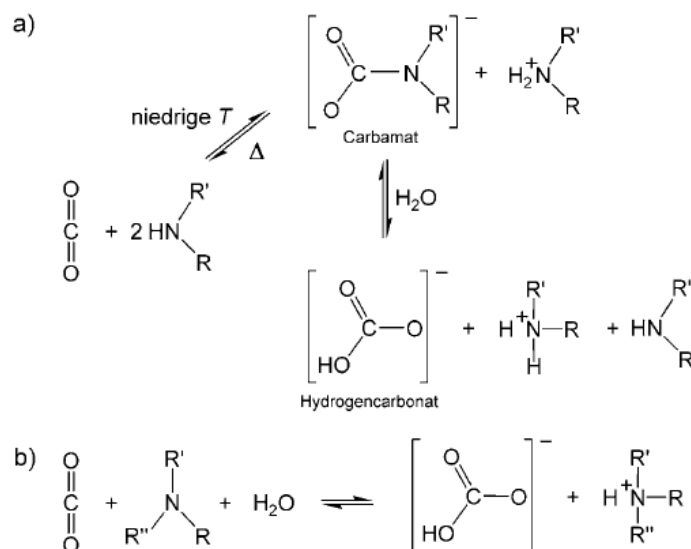


Abbildung 31. Reaktionsschema zur chemischen Absorption von a) primären und sekundären und b) tertiären aminhaltigen Lösemitteln⁴³

Tertiäre Amine haben eine höhere Aufnahmekapazität für Kohlenstoffdioxid, aber eine geringere Reaktivität. Beim Einsatz dieser Verbindungen bildet sich kein Carbamat (siehe Abbildung 31 Reaktion b), sondern direkt Hydrogencarbonat aus. Für die Regeneration des Amins wird weniger Energie benötigt. Meist werden deshalb Gemische von primären, sekundären⁴⁴ und tertiären Aminen als Lösemittel eingesetzt [36, S.6198]. Da die Absorptions- und Desorptionsgeschwindigkeit der Reaktion und deren thermodynamische Kapazität sehr stark von der sterischen Hinderung der Amine und deren Basizität abhängt, werden auch sterisch gehinderte Amine synthetisiert, wie z.B. 2-Amino-2-methyl-1-propanol (AMP) oder 2-Piperidinethanol (vgl. Abbildung 32). Diese Verbindungen verfügen über weniger stabile Carbamate, sind schneller regenerierbar als andere Amine und unterscheiden sich in ihren Adsorptionsgeschwindigkeiten [36, S.6199].

⁴³ Abbildung Reaktionsschema primäre, sekundäre und tertiäre Amine [36, S.6198].

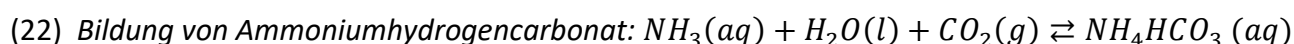
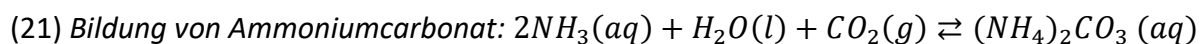


Abbildung 32. Sterisch gehinderte Amine: (links) AMP, (rechts) 2-Piperidinethanol.

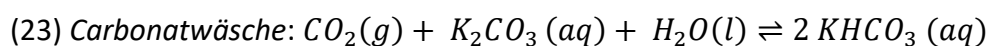
Ein großer Nachteil des Einsatzes von Aminen ist deren korrosive Wirkung, der hohe Energiebedarf zur Regeneration des Lösemittels und die Herabsetzung der Reaktivität durch thermische Einflüsse oder SO_x - und NO_x -Verunreinigungen im Rauchgas [9, S.11]. Der damit verbundene Abbau der Lösemittel macht ca. 10% der Carbon Capture Kosten aus [35, S.267]. Folglich wird weiterhin nach Alternativen geforscht.

Die chemische Absorption kann auch mit anorganischen Lösemitteln wie Lösungen von Kalium- und Natriumcarbonaten oder Ammoniak durchgeführt werden. Bei Letzterem wird 0-10 °C kalte Ammoniaklösung mit Kohlenstoffdioxid im *Chilled-Ammonia-Prozess* zu Ammoniumcarbonat-Lösung bzw. Ammoniumhydrogencarbonat-Lösung umgesetzt (siehe (21) und (22) nach [53, S.12]). Die Regeneration des Lösemittels erfolgt bei 80 °C [36, S.6199]. Kohlenstoffdioxid wird abkondensiert und Ammoniak (NH_3) kann zurückgewonnen werden. Der Einsatz des Lösemittels Ammoniak bietet den Vorteil, dass es weder in Lösung oxidiert noch thermisch zerfällt. Außerdem hat es eine gute Absorptionsrate für CO_2 , ist nicht korrosiv und der Regenerationsprozess ist weniger energieintensiv.

Um die Löslichkeit von Ammoniak zu erhöhen, wird das Verfahren bei niedrigen Temperaturen durchgeführt. Dies erhöht jedoch die Komplexität der Trennung der Flüssigkeits- und Gasphase und benötigt mehr Energie [38, S.1081].



Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung von 20-40-prozentiger Kaliumcarbonat-Lösung. Diese ist weniger giftig, flüchtig, korrosiv und kostengünstiger. Kohlenstoffdioxid kann mit Hilfe der Carbonatwäsche bei hohen Temperaturen abgeschieden werden (siehe (23), [7, S.13]), was den Energiebedarf für die Regeneration erheblich herabsetzt [38, S.1081].



Physikalische Absorption

Eine Alternative zu chemischen Methoden ist die physikalische Absorption mit Lösemitteln wie Rectisol⁴⁵ und Selexol⁴⁶. Diese aufnehmenden Medien werden als Absorbentien bezeichnet. Kohlenstoffdioxid wird mit van-der-Waals-Kräften an das flüssige Absorbens gebunden [27, S.270]. Die CO_2 -Aufnahmekapazität folgt dem Henry-Dalton'schen Absorptionsgesetz. Die Absorptionskapazität entspricht der linearen Funktion des Dampfdrucks des Gases.

⁴⁵ **Rectisol:** Methanol (CH_3OH), welches auf -40°C abgekühlt wurde.

⁴⁶ **Selexol:** Eine Mischung aus Polyethylenglykoldimethylethern, DMEPG ($\text{CH}_3\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{CH}_3$) mit unterschiedlichen Kettenlängen $n = 2-9$.

Die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid ist von Druck und Temperatur abhängig. Um eine optimale Aufnahme in das Absorbens zu gewährleisten, werden die Prozesse bei hohen Absorberdrücken von 20 bar durchgeführt.

Der Rectisol-Prozess wird besonders in der Kohle- und Schwerölindustrie zur Reinigung des Synthesegases eingesetzt. Methanol absorbiert selektiv H_2S und CO_2 und ermöglicht so eine Reduktion der Schwefelkonzentration im Synthesegas.

Bei Umgebungstemperatur herrscht ein hoher Dampfdruck (167 hPa), weshalb der Rectisol-Prozess bei niedrigen Temperaturen von -40°C durchgeführt wird [27, S.294-295].

Selexol wird industriell schon seit einiger Zeit zur Reinigung von sauren Erdgasen [*engl. sweetening*] und zur Rauchgasbehandlung eingesetzt. DMPEG als Lösemittel ist auf Grund seines niedrigen Dampfdruckes (0,00097 hPa) auch bei hohen Temperaturen einsetzbar. Ebenso wie Rectisol ist es für eine selektive Trennung von H_2S und CO_2 geeignet [27, S.295]. Die Trennung von Kohlenstoffdioxid und Lösemittel [*engl. stripping*] erfolgt durch Druckverminderung (Blitzdestillation) oder thermische Einwirkungen [36, S.6200].

Die physikalische Absorption birgt im Vergleich zu chemischen Wäschen einige Vorteile. Da keine chemischen Reaktionen stattfinden, wird weniger elektrische Energie und Wärmeenergie bei der Regeneration verbraucht. Die eingesetzten Absorbentien bleiben langfristig stabil, können selektiv eingesetzt werden und sind nicht toxisch und nicht korrosiv [27, S.320, 292]. Diese Art der Absorption eignet sich besonders für Pre-Combustion-Verfahren, bei denen Gasströme bei hohen Drücken abgeschieden werden müssen [36, S.6200].

Je nach eingesetztem Lösemittel, schwanken die Werte für Absorptionsraten, Energieverbrauch und Kosten. In Tabelle 4 wird eine Auswahl an chemischen und physikalischen Lösemitteln gegenübergestellt, die in diesem Kapitel beschrieben wurden. Im direkten Vergleich haben die chemischen Lösemittel eine höhere Absorptionsrate als die physikalischen Lösemittel. Die kostengünstigere Absorption wird durch den Einsatz physikalischer Lösemittel erreicht.

Tabelle 4. Ausgewählte Lösemittel für das Absorptionsverfahren⁴⁷

Lösemittel	Absorptionsrate [mol CO_2 /kg Lösemittel]	Temperatur [$^\circ\text{C}$]	Energieverbrauch für CO_2 - Abscheidung [GJ/t CO_2]	Kosten [USD/t CO_2]
Chemische Lösemittel				
Primäres Amin (Beispiel MEA)	4,09	40	5,20	39,38
Tertiäre Amine (Beispiel MDEA)	8,38	20	3,26	52,10
Sterisch gehinderte Amine (Beispiel AMP)	2,24	40	2,90	69,30
Ammoniak	1,91	10	3,64	36,57
Physikalische Lösemittel				
Rectisol	0,21	-40	1,88	26,65
Selexol	0,14	bis 175°C	7,54	7,46

⁴⁷ Tabelle Lösemittel für Absorptionsverfahren im Vergleich: Werte ausgewählt und übersetzt nach [9, S.12].

2.2.2.2 Adsorption

Für Adsorptionsverfahren kommen Adsorbentien mit großen Oberflächen in Frage, die das Gas, das adsorptiv, durch chemische oder physikalische Adsorptionsprozesse abtrennen können. Bei dem physikalischen Prozess wirken auf die Adsorptive physikalische Kräfte, meist van-der-Waals-Kräfte, die durch hohe Drücke und tiefe Temperaturen begünstigt werden.

Die Moleküle werden an der Oberfläche des Adsorbens angelagert, man spricht auch von Adhäsion [10, S.809]. Bei der chemischen Adsorption wird nach der Adhäsion an die Oberfläche auch noch eine chemische Bindung z.B. eine kovalente Bindung ausgebildet. Eine Regeneration der Adsorbentien und die Abtrennung von Kohlenstoffdioxid erfolgt meist durch mehrzyklische Druck- oder Temperaturwechsel, wie TSA und PSA-Verfahren [27, S.276-277]. Es können thermodynamische Gleichgewichtseffekte, Molekularsiebeffekte oder kinetische Effekte zur Abtrennung genutzt werden [36, S.6201]. Im Vergleich zum Einsatz von aminhaltigen Lösemitteln (siehe vorheriges Kapitel), lassen sich die Adsorbentien in vielfältigen Temperatur- und Druckbereichen anwenden und sind dadurch flexibler einsetzbar [38, S.1082]. Adsorptionsverfahren können an Pre- und Post-Combustion-Anlagen nachgerüstet werden. Außerdem finden Adsorptionen im S-DAC-Verfahren Verwendung (siehe Kapitel 3.2.1.5) [9, S.13]. Man unterscheidet chemische und physikalische Adsorptionsverfahren.

Chemische Adsorption

Bei der chemischen Adsorption findet eine chemische Reaktion zwischen Oberfläche der festen Adsorbentien und Kohlenstoffdioxid statt. Das Abscheideverfahren eignet sich besonders für geringe CO₂-Konzentrationen [9, S.13]. Amin-modifizierte Kieselgele, Metalloxide oder Materialien mit Alkalimetallen können als chemische Adsorptionsmittel verwendet werden.

Bei Amin-modifizierten Kieselgelen, wird eine Kieselgeloberfläche mit Aminen behandelt, um die Adsorptionseigenschaften zu verbessern, die durch die Bildung von Carbamaten ermöglicht wird (siehe 3.2.2.1) [36, S.6201]. Eine Beispielverbindung ist Polyethylenimin (PEI), ein synthetisches Polymer (Strukturausschnitt vgl. Abbildung 33). Der Stoff ist nur bei Temperaturen von 50-75°C und einem vorgereinigten Abgas einsetzbar. Er kann durch TSA-Verfahren regeneriert werden [53, S.19].

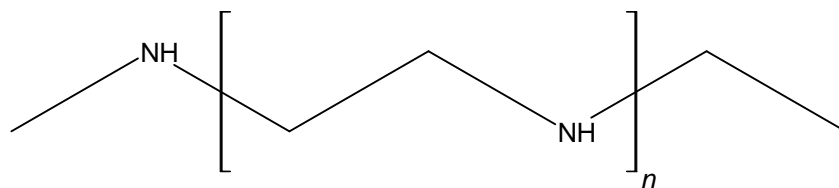


Abbildung 33. Strukturausschnitt eines linearen PEI

Metalloxide wie Calciumoxid (CaO) oder Magnesiumoxid (MgO) eignen sich ebenfalls als chemische Adsorptionsmittel. Sie sind bei hohen Temperaturen von über 300 °C z.B. für das Pre- Combustion Verfahren einsetzbar. Die Reaktionen verlaufen langsam und auf Grund der hohen Temperaturen ist die Regeneration der Metalloxide sehr energieintensiv [9, S.13].

Weitere günstige und leicht regenerierbare Adsorbentien sind Alkalimetallverbindungen, wie z.B. Natriumcarbonat. Bei Temperaturen von bis zu 200 °C sind sie im Rauchgasstrom einsetzbar, gehen aber Nebenreaktionen mit Schwefeloxid und Chlorwasserstoff ein [9, S.13]. Dies führt zur Bildung von Hydrogencarbonaten, weshalb die Regeneration bei Temperaturen von 120 °C erfolgen muss [36, S.6201].

Physikalische Adsorption

Die physikalische Adsorption zeichnet sich durch eine Interaktion zwischen dem elektrischen Feld der festen Adsorbentien und physikalischen Kräften der CO₂-Moleküle aus. Letztere können z.B. elektrostatische, Dipol-Dipol und van-der-Waals Wechselwirkungen sein. Die Gasmoleküle haften temporär an der Oberfläche der Adsorbentien an. Die Größe und Beschaffenheit der Oberflächen- und Porenstruktur ist entscheidend, um eine hohe Adsorptionskapazität zu gewährleisten [53, S.17]. Das Verfahren eignet sich besonders gut für Gasströme mit hohen CO₂-Konzentrationen [9, S.13]. Mögliche physikalische Adsorptionsmittel sind z.B. Aktivkohle, Metallorganische Gerüste (MOFs) und Zeolithe.

Aktivkohle verfügt über eine große Oberfläche und ein großes Porenvolumen. Sie ist bei niedrigen Temperaturen und hohen Drücken einsetzbar und kann durch PSA-Verfahren regeneriert werden [53, S.18-19]. Durch eine hohe Verfügbarkeit ist sie außerdem ein günstiger Rohstoff [10, S.810]. Durch den Einsatz von erhöhten Drücken kann die Adsorptionsfähigkeit noch gesteigert werden (vgl. 2.4.1). Aktivkohle ist jedoch nicht sehr selektiv bei der Gasabscheidung, weshalb eine Rauchgasreinigung vor der Adsorption erfolgen muss. Sie wird meist in Pre-Combustion Verfahren verwendet [36, S.6202].

Metallorganische Gerüste, auch Metal Organic Frameworks (MOFs) genannt, sind dreidimensionale, kristalline Strukturen mit einem oder mehreren Metallionen (Zn²⁺, Al³⁺, Cr³⁺, Cu²⁺) im Zentrum, die an funktionelle Gruppen wie Carboxylat- oder Pyridylgruppen koordiniert sind [36, S.6203]. Eine Beispielsubstanz mit Cr³⁺-Zentrum ist MIL-101. Die Struktur kann Abbildung 34 entnommen werden. Die Stoffe haben eine hohe Porosität und Oberfläche und sind thermisch stabil. Als Adsorptionsmittel sind sie nur in aufgereinigten Gasströmen ohne SO_x und NO_x-Verunreinigungen einsetzbar, da sie sonst mit den genannten Stoffen reagieren [38, S.1086]. Bisher ist der Einsatz von MOFs noch nicht weit verbreitet, weil deren Synthese sehr teuer ist [9, S.15].

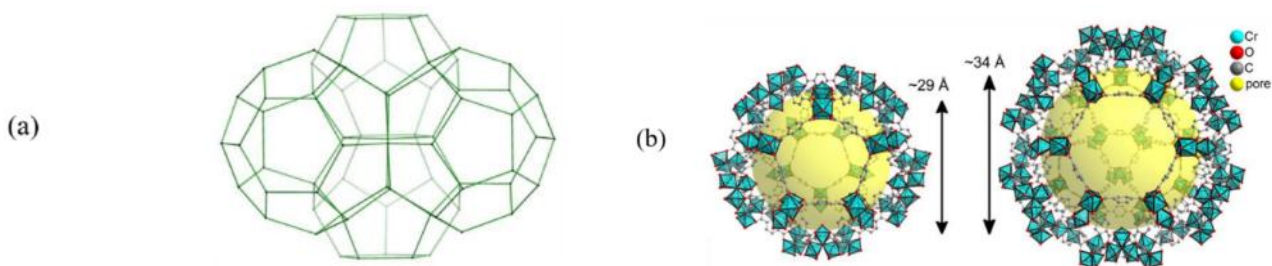


Abbildung 34: Struktur MIL-101⁴⁸

⁴⁸ Abbildung MIL-101: [54, S.1].

Zeolithe sind weitere mögliche physikalische Adsorptionsmittel. Die Bezeichnung setzt sich aus den griechischen Begriffen *zeo* (ich siede) und *lithos* (Stein) zusammen. Zeolithe sind mikroporöse, mineralische Aluminiumsilikate mit kristalliner Struktur [38, S.1086] (vgl. Abbildung 35). Beim Erhitzen bleibt das Aluminiumsilicatgerüst stabil und gibt zeolithisch gebundenes Wasser ab, woraus sich der Name ableitet. Zeolithe verfügen ebenfalls wie Aktivkohle und MOFs über eine große Oberfläche und Porenvolumen. In den Hohlräumen der Poren befinden sich Wassermoleküle und Kationen (z.B. Erdalkali- und Alkaliionen) und es herrschen elektrostatische Anziehungskräfte und van-der-Waals-Wechselwirkungen. Der Zeolith ist aus Schichten aus eckenverknüpften $[(Al_3SiO_4)]$ -Tetraedern aufgebaut und zu einem Raumnetzwerk verbunden, welches von langen, anionischen Kanälen durchzogen ist [32, S.1124]. Zeolithe sind thermisch und mechanisch stabil und günstig zu produzieren [9, S.13]. Ein bekannter Vertreter für Adsorptionsprozesse ist Zeolith 13X. Er kann bei Drücken über 2 bar eingesetzt werden. Wenn Feuchtigkeit im Gas vorhanden ist, werden Regenerationstemperaturen von über 300 °C benötigt.

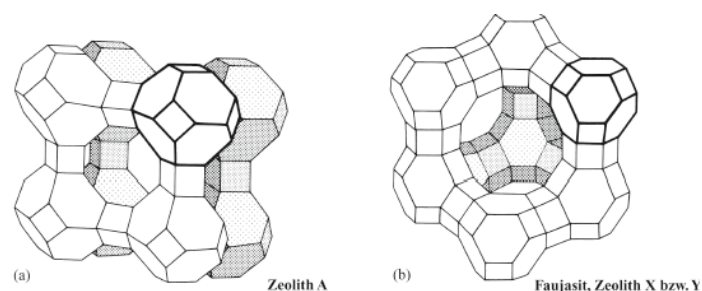


Abbildung 35: Grundstruktur Zeolith⁴⁹

In Tabelle 5 sind die in diesem Kapitel erwähnten chemischen und physikalischen Adsorptionsmittel und deren Adsorptionsraten bei bestimmten Temperaturen gegenübergestellt. Die höchsten Adsorptionsraten werden durch Calciumoxid, als chemisches Adsorptionsmittel und MIL-101 (Cr), als physikalisches Adsorptionsmittel erreicht. Der Einsatz der verschiedenen Stoffe ist stark abhängig von den Reaktionsbedingungen des Sequestrierungsverfahrens.

Tabelle 5. Ausgewählte Adsorptionsmittel für chemische und physikalische Adsorptionsverfahren⁵⁰

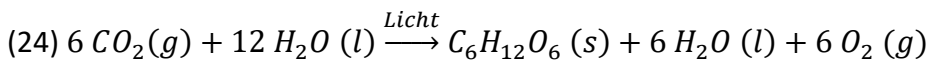
Adsorptionsmittel	Beispielstoff	Adsorptionsrate [mol CO ₂ /kg Lösemittel]	Temperatur [°C]
Chemische Adsorptionsmittel			
Amin-modifizierte Kieselgele	PEI	4,81	75
Metalloxide	CaO	9,31	25
Metalloxide	MgO	1,82	25
Alkalimetallverbindungen	Na ₂ CO ₃	7,70	45
Physikalische Adsorptionsmittel			
kohlenstoffbasierte Adsorbentien	Aktivkohle	2,25	25
metallorganische Gerüste (MOFs)	MIL-101 (Cr)	14,40	30
Zeolithe	13X Zeolith	6,18	25

⁴⁹ Abbildung Zeolith: [32, S.1124].

⁵⁰ Tabelle Adsorptionsmittel für Adsorptionsverfahren im Vergleich: Werte ausgewählt und übersetzt nach [9, S.14].

2.2.2.3 Natürliche Einbindung

Bei einer biologischen Abscheidung in Mikroorganismen (z.B. Pilze, Algen, Bakterien) oder anderen Pflanzen wie Bäumen, wird das Kohlenstoffdioxid in ein biologisches Milieu überführt. Als Kohlenstoffdioxid-Quellen können Abgasströme oder die Luft dienen. Kohlenstoffdioxid wird mit Hilfe des Prozesses der Photosynthese (vgl. Reaktion (24)) umgesetzt. Damit diese erfolgreich ablaufen kann, benötigen die biologischen Organismen Licht, Feuchtigkeit, Nährstoffe und bestimmte Temperaturen [27, S.278-279]. Beispielhaft für diese Art der biologischen Abtrennung wird in diesem Teilkapitel die Kultivierung von Mikroalgen thematisiert.



Natürliche Einbindung mit Mikroalgen (*microalgae-based carbon capture*)

Mikroalgen sind meist einzellige Organismen der Linie der Eukaryoten⁵¹ [55, S.70] und unterscheiden sich sehr stark in Größe, Form, Farbe und Zusammensetzung. Schätzungen zufolge gibt es 40.000 Arten von Mikroalgen. Sie wachsen in Frisch- oder Salzwasserumgebungen [56, S.1164, 1166]. Mit Hilfe von Sonnenlicht sind Mikroalgen in der Lage, Wasser und Kohlenstoffdioxid in Biomasse umzusetzen. Durch ihre hohe photosynthetische Aktivität sind Mikroalgen 10-50-fach effizienter als Landpflanzen, um Kohlenstoffdioxid zu fixieren [35, S.269]. Dabei wachsen sie in wässrigen Suspensionen sehr schnell heran, woraufhin die entstandenen Überschüsse abgetrennt, zentrifugiert, gefiltert und der entstehende *Slurry* [dt. *Algenschlamm, Paste*] anschließend getrocknet wird. Bisher wurden Mikroalgen vor allem großindustriell für die Kosmetik- und Lebensmittelindustrie gezüchtet. Dabei sind die Mikroalgen *Spirulina* und *Chlorella* die häufigsten Vertreter [57, S.237-238]. Einen Einblick in die Anwendungsmöglichkeiten von Algenbiomasse und Zellbestandteilen bietet Abbildung 36. Auf Grund ihrer Eigenschaften und Anpassungsfähigkeit lassen sie sich Algen für die natürliche Einbindung von Kohlenstoffdioxid und z.B. zur Produktion von Kraftstoffen nutzen.

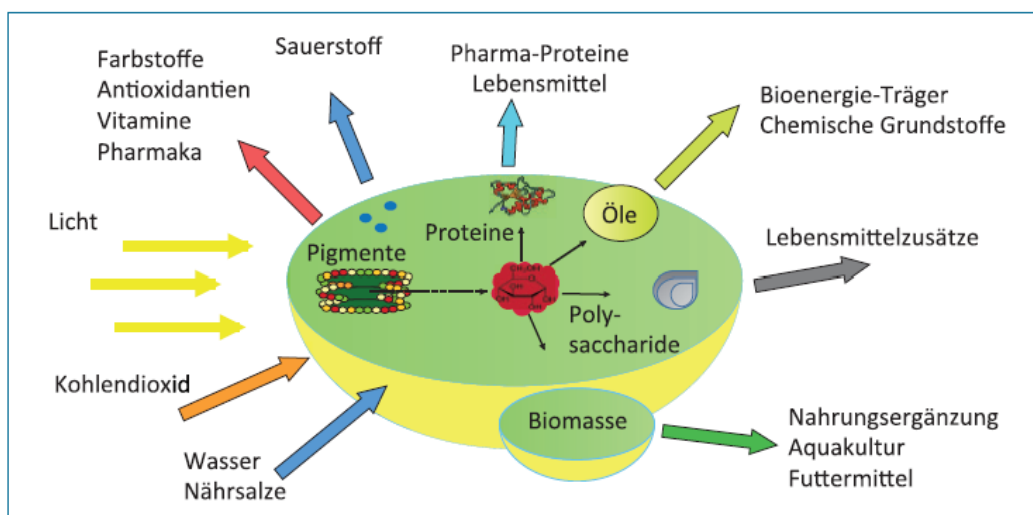


Abbildung 36. Anwendungsgebiete für Mikroalgen⁵²

⁵¹ **Eukaryoten** [griech. *karyon* = Nusskern] Organismen, die einen Zellkern mit Zellmembranen (Eucyte) und Ribosomen besitzen. (Definition umformuliert nach <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/eukaryoten/22873> (letzter Zugriff 11.06.24)).

⁵² Abbildung Anwendungsgebiete Algen: [58, S.8].

Mikroalgen können in offenen oder geschlossenen Photobioreaktionen (PBR) gezüchtet werden. In offenen Systemen wird Kohlenstoffdioxid mit der Umgebungsluft vermischt und direkt in das wässrige Milieu injiziert. Mit Hilfe eines Schaufelrads [engl. *paddle wheel*] wird ein optimales Mischungsverhältnis in den 1.5 m tiefen Tanks sichergestellt. Eine schematische Zeichnung und ein Foto einer solchen Anlage können Abbildung 37 entnommen werden.

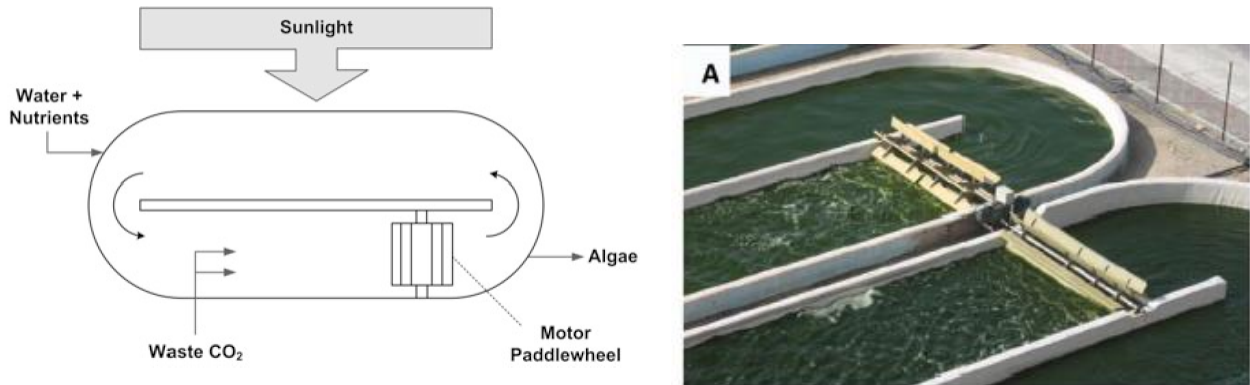


Abbildung 37. (links) Schema eines offenen PBR⁵³, (rechts) Foto eines offenen PBR⁵⁴

Eine weitere Möglichkeit ist die Kultivierung in geschlossenen PBR. Hierzu werden meist transparente Flachpanele, Röhren- oder Beutelreaktoren (siehe Abbildung 38) verwendet, in denen die Algensuspension eingeschlossen wird. Die Zirkulation und Durchmischung der Suspension wird durch eingeführte Luftblasen im Flachpanelreaktor oder Umpumpungen im Röhren- und Beutelreaktoren realisiert. Geschlossene Systeme haben einige Vorteile gegenüber offenen Systemen z.B. können die Wachstumsbedingungen besser kontrolliert und die Verdunstung von Wasser minimiert werden. Die Anlagen lassen außerdem auch mit künstlichem Licht bestrahlen [56, S.1168]. Folglich sind die geschlossenen Systeme energieintensiver und teurer als die offenen PBR.

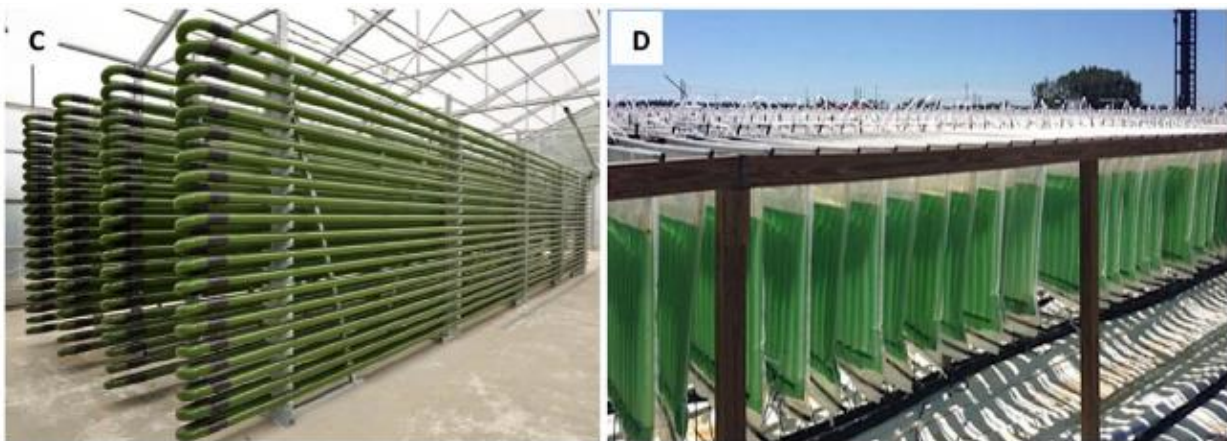


Abbildung 38. (links) geschlossener Röhrenreaktor in Wolfsburg (D), (rechts) geschlossener Plastikbeutelreaktor in Florida (USA)⁵⁵

⁵³ Schema offener PBR: [57, S.239].

⁵⁴ Foto offener PBR: [56, S.1168].

⁵⁵ Abbildungen geschlossener PBR: [56, S.1168].

Die Umsetzung von Kohlenstoffdioxid in den PBR erfolgt mit Hilfe der „oxygenen Photosynthese“ [59, S.211] innerhalb der Mikroalgen-Zelle. Dort liegen verschiedene „kohlen-saure“ Verbindungen und Ionen (CO_2 , H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-}) nebeneinander vor, die alle nutzbar gemacht werden können. Die Bedingungen für die vorliegenden Ionen und Verbindungen variieren sehr stark nach Mischungsrate, verwendeter Mikroalgen-Konzentrationen und dem eingestellten pH-Wert [56, S.1165]. Im Innenraum der chloroplastischen Mikroalgen-Zelle, dem Stroma, kann CO_2 durch den Calvin-Zyklus⁵⁶ (vgl. Abbildung 39) umgesetzt werden.

Dies erfolgt unter Einsatz von energiereichen Trägerstoffen wie ATP (Adenosintriphosphat) und NADPH (Nicotinamidadenindinukleotidphosphat), welche durch den Photosynthese-Prozess generiert werden (vgl. (25) [60, S.500]). Dabei entstehen als Reaktionsprodukte u.a. Kohlenhydrate und Wasser. Grundlage für eine erfolgreiche Umsetzung von Kohlenstoffdioxid in den PBR sind eine geeignete Lichtintensität (natürlich oder künstliche Beleuchtung), Temperaturen (15-30°C) und pH- Werte (pH 4-7), sowie die Versorgung mit Nährstoffen, z.B. Nitrate und Hydrogenphosphate [56, S.1169-1170].

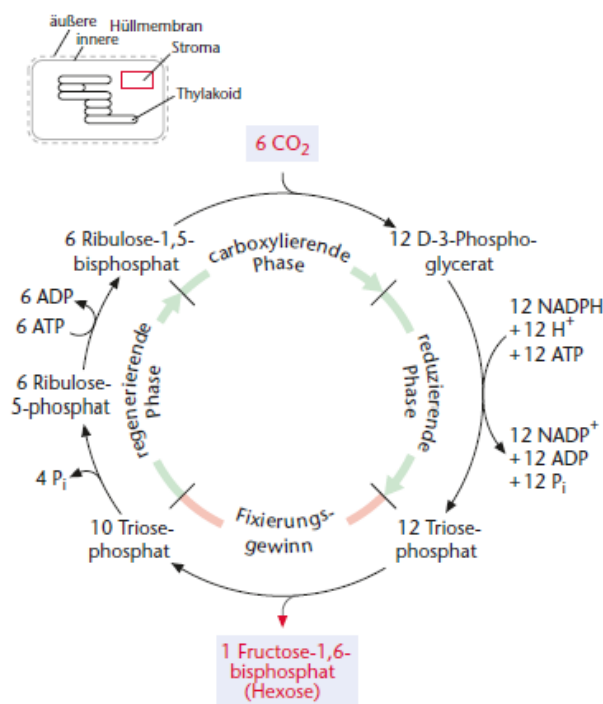
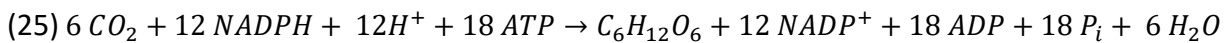


Abbildung 39. Calvin-Zyklus⁵⁷

Offene und geschlossene PBR können an Kraftwerke angeschlossen und zur Biomasseproduktion genutzt werden. Dies wird z.B. in Bergheim-Niederaußem von der Firma RWE⁵⁸ an einem Kohlekraftwerk pilotiert. Einen exemplarischen Anschluss an eine solche industrielle Anlage, mit Nutzung von erneuerbaren Energien kann Abbildung 40 entnommen werden.

⁵⁶ **Calvin-Zyklus:** wird in der Literatur auch als CALVIN-BENSON-Zyklus oder reduktiver Pentosephosphat-Zyklus bezeichnet und beschreibt die Kohlenstoffdioxid-Assimilation in einem zyklischen Prozess. Dieser läuft über drei Phasen ab: (1) die carboxylierende Phase, (2) die reduzierende Phase und (3) die regenerierende Phase [59, S.212].

⁵⁷ Abbildung Calvin Zyklus: [60, S.500].

⁵⁸RWE-Algenprojekt in Bergheim-Niederaußem: <https://www.koenigshoven.net/altehp/braunkohle-Dateien/algenprojekt.pdf> (letzter Zugriff 10.06.24).

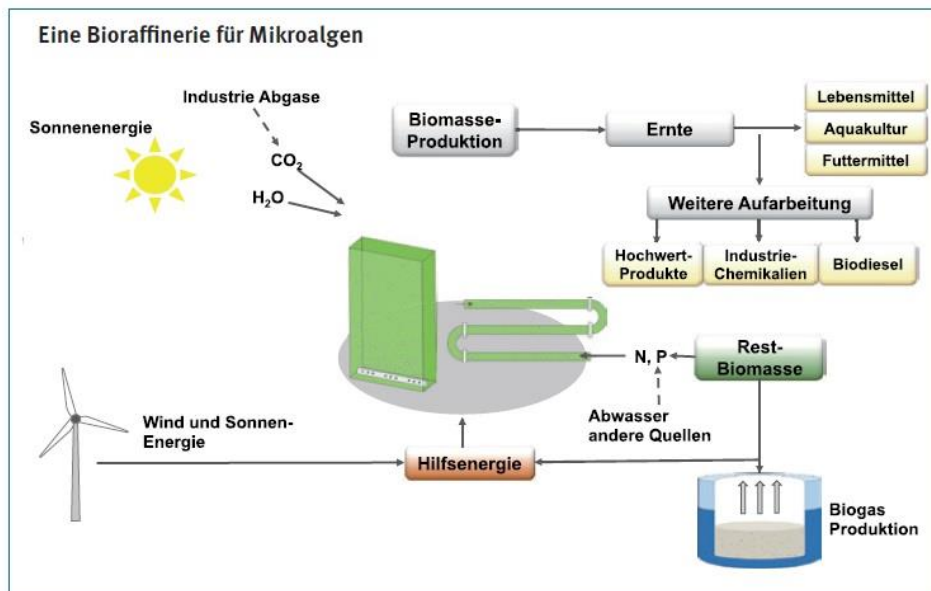


Abbildung 40. Anschluss einer Kohlenstoffdioxid-Abscheidung mit Mikroalgen im geschlossenen PBR an bestehende Kraftwerke⁵⁹

Die durch die PBR generierte Biomasse kann zur Produktion von weiteren Rohstoffen, z.B. Nahrungsergänzung- oder Futtermitteln genutzt werden. Besonders interessant ist, dass Mikroalgen über hohe Lipidanlagerungen von bis zu 60% in der generierten Biomasse verfügen [57, S.238] und sehr schnell wachsen. Dies macht sie zu einem guten Ausgangsstoff zur Produktion von Kraftstoffen. Mit Hilfe von Solarenergie und einer thermochemischen Behandlung [61, S.10], könnten die in den Mikroalgen enthaltenen Öle zur Herstellung von Biokraftstoffen⁶⁰ dienen. Es wird argumentiert, dass im Gegensatz zu anderen Biokraftstoffe keine Ackerflächen zum Anbau benötigt werden und die Kultivierung auch mit Salz- oder Abwässern erfolgen kann. Bisher bedarf diese Produktion jedoch eines hohen Energie- und Ressourcenaufwands und wird nur ökologisch und wirtschaftlich rentabel, wenn erneuerbare Energien und CO₂-Abgasströme genutzt werden [62, S.10]. Die Nutzung der entstehenden Biomasse zur Rohstoffproduktion ist ein Beispiel für einen *Carbon Capture and Utilisation*-Prozess (siehe Kapitel 2.5.6).

2.2.2.4 Zusammenfassung

Welche Abscheidetechnologie für die Abtrennung von Kohlenstoffdioxid in Frage kommt, hängt sehr stark von der Anlage, der Abscheideeffizienz, dem Energiebedarf, den Reaktionsbedingungen und den Kosten ab. Der Vergleich solcher Technologien ist schwierig und variiert stark nach den Verfahren und eingesetzten Edukten. In Tabelle 6 wurden exemplarisch Vertreter aus allen in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren gegenübergestellt. Da sich viele der Technologien noch in der Entwicklung befinden, schwanken Abscheideeffizienzen, Energiebedarfe und Kosten je nach Quelle.

⁵⁹ Abbildung Anschluss Mikroalgen PBR an Kraftwerk [58, S.14].

⁶⁰ In der Literatur wird dieser Prozess auch als „Solar-to-fuel“ oder „Algae-to-biofuel“ bezeichnet.

Tabelle 6. Ausgewählte Abscheidetechnologien im Vergleich ⁶¹

Abscheidetechnologie	Abscheideeffizienz von CO ₂ [Vol-%]	Energiebedarf [GJ/t CO ₂]	Kosten [USD/t CO ₂]
Chemische Absorption mit Aminen	85-90	3,80	62,80
Physikalische Adsorption mit Zeolithen	88-95	1,17	89,66
Natürliche Einbindung mit Mikroalgen	offene PBR 10-40	3,09	793,00
	geschlossene PBR -95	8,31-70,36	

Absorptionsverfahren eignen sich besonders für den Einsatz in hochkonzentrierten Gasströmen und können dort eine Abscheideeffizienz von bis zu 90 Vol% CO₂ erreichen. Die eingesetzten Lösemittel sind kostengünstig und können durch Erhitzen bzw. Druckerniedrigung regeneriert werden. Von allen in diesem Kapitel vorgestellten Abscheidetechnologien, sind die Absorptionsverfahren die am ausgereiftesten (TRL 9), wobei besonders die chemische Absorption mit Aminen und die physikalische Adsorption mit Selexol bei der Erdgasaufbereitung zu nennen sind (vgl. Tabelle 7). Die Abscheidetechnologien kommen besonders bei Pre- und Post-Combustion-Verfahren zum Einsatz. Problematisch bei diesem Verfahren bleiben die eingesetzten Solventien und die energieintensive Regeneration der Lösemittel [9, S.11-12].

Mit Hilfe von Adsorptionsverfahren können ebenfalls hohe Abscheideraten erzielt werden. Die eingesetzten Adsorbentien sind umweltfreundlicher, regenerierbar, weniger korrosiv und flexibler bei verschiedenen Reaktionsbedingungen einsetzbar. Physikalische Adsorbentien sind temperatur- und feuchtigkeitsempfindlich und in Anwesenheit von Gasgemischen gegenüber CO₂ wenig selektiv. Chemische Adsorbentien haben einen hohen Energiebedarf, um die hohen Temperaturbedarfe der Sorption und Desorption zu decken. Trotz des insgesamt geringeren Energiebedarfs sind Adsorptionsverfahren etwas teurer als Absorptionsverfahren [9, S.11-12], da sie bisher nur in Demonstrationsanlagen (TRL 7) für Post-Combustion und S-DAC-Prozesse umgesetzt werden.

Tabelle 7. Übersicht Entwicklungsstadien Abscheidetechnologien mit Sequestrierungsverfahren ⁶²

	Pre-Combustion	Post-Combustion Capture	Direct Air Capture
Chemische Absorption	TRL 5 - Validierung in simulierter Umgebung	TRL 9 - Marktreife Technologie Amine in Kraftwerken	TRL 7 - Demonstration mit Alkali-Hydroxidlösungen
Physikalische Absorption	TRL 9 - Marktreife Technologie Erdgasförderung mit Selexol TRL 7 - Demonstration IGCC-Kraftwerke	Möglich, aber wahrscheinlich unwirtschaftlich	Keine Angaben
Adsorption	möglich, aber wahrscheinlich unwirtschaftlich	TRL 7 - Demonstration Temperature Swing Adsorption (TSA)	TRL 7 - Demonstration Physikalische Adsorption S-DAC mit Aktivkohle, MOFs oder Zeolithen
Natürliche Einbindung	TRL 6 - Pilotstandorte	TRL 6 - Pilotstandorte	TRL 6 - Pilotstandorte

⁶¹ Tabelle Abscheidetechnologien im Vergleich: Daten ausgewählt und übersetzt nach [9, S.11].

⁶² Tabelle Entwicklungsstadien Abscheidetechnologien: Daten entnommen aus [27, S.273] und ergänzt mit Werten aus eigener Literaturrecherche (z.B. [9, S.8]).

Die natürliche Einbindung in Mikroalgen ist die am wenigsten ausgereifte (siehe Tabelle 7) und somit auch teuerste und energieintensivste Technologie (siehe Tabelle 6). Bisher gibt es nur begrenzte Daten zu Langzeit- und Großprojekten, da sich die Etablierung der Technologie in Großanlagen schwierig gestaltet [63, S.8]. Dies hat mehrere Gründe. Viele Mikroalgen können nur bei begrenzten Kohlenstoffdioxid-Konzentration von ca. 5% gut wachsen. Rauchgasströme enthalten aber meist höhere Konzentrationen von 10-15%. Diese Konzentrationen sind nur für bestimmte Mikroalgen wie z.B. Chlorella verträglich.

Es besteht noch Forschungsbedarf, um weitere geeignete Algenspezies zu finden. Für die Verwendung von offenen Anlagen müssen große Flächen zur Verfügung stehen. Die Abscheidungseffektivität in offenen PBR ist stark von saisonalen Schwankungen und Temperaturänderungen abhängig. Jegliche Änderungen führen zu geringeren Wachstumsraten. Problematisch bleibt auch weiterhin der Energiebedarf solcher Anlagen. Besonders die Kultivierung und die Trocknung der Algenbiomasse sind sehr energieintensiv [35, S.269]. Dieser Energiebedarf muss mit Hilfe von nicht fossilen Energieträgern gedeckt werden, um die Technologie als zukunftsfähige Abscheideoption zu etablieren. Das Verfahren bietet jedoch auch einige Vorteile. Im Gegensatz zu Adsorption und Absorption entstehen keine Gefährdungen durch den Einsatz von chemischen Gefahrstoffen. In geschlossenen PBR unter kontrollierten Bedingungen, können Abtrennungseffizienzen von bis zu 95% erreicht werden. Außerdem ist die Nutzung von Algenbiomasse zur Produktion weiterer Rohstoffe attraktiv.

Die Auswahl der geeigneten Abscheidetechnologie richtet sich nach der Art der Kohlenstoffdioxidsequestrierung und den damit verbundenen Reaktionsbedingungen. Bei allen hier geschilderten Abscheidetechnologien besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um z.B. die Energieeffizienz zu verbessern und die Ökobilanz der Verfahren vollumfänglich zu beurteilen.

2.3 Transport von Kohlenstoffdioxid

Der Transport des aufgefangenen Kohlenstoffdioxids ist ein wichtiger Teil der Prozesskette und erfolgt nach der Abtrennung des Kohlenstoffdioxids. Er ermöglicht die Verbindung zu den Lagerstätten oder zur Weiterverarbeitung des Rohstoffs.

Bevor der Transport jedoch beginnen kann, muss das aufgefangene Gas komprimiert und ggf. verflüssigt werden. Die Kompression erfolgt über mehrere Stufen mit Zwischenkühlung, um Wasser aus dem Gasstrom zu entfernen [64, S.426]. Durch die Kompression über den kritischen Druck von 73,9 bar und bei einer Temperatur von 31,1 °C wird die überkritische Phase erreicht, die eine 500 fach höhere Dichte als im Gaszustand [52, S.6] aufweist. Die Lage des überkritischen Bereichs wird mit Hilfe des Phasendiagramms in Abbildung 41 visualisiert. Die Kompression des Gases in diesen Bereich sorgt dafür, dass das Gas weniger Volumen und somit weniger Platz einnimmt. Dieses Volumen kann durch eine Verflüssigung noch weiter reduziert werden und ermöglicht so einen einfacheren Transport [65, S.181]. Der Komprimierungs- bzw. Verflüssigungsschritt der Prozesskette ist sehr energieintensiv und kann bis zu 12% der Effektivität eines Kraftwerkes mindern, weshalb Forschende effizientere Methoden untersuchen [38, S.1110].

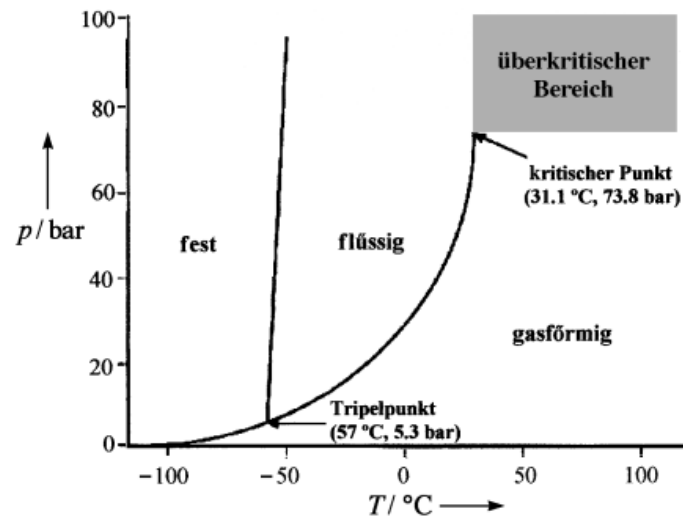


Abbildung 41. Phasendiagramm Kohlenstoffdioxid⁶³

Für den Weitertransport unterscheidet man kontinuierliche und diskontinuierliche Transportoptionen. Ein kontinuierlicher Transport wird per Pipeline realisiert. Diskontinuierliche Transportwege, erfolgen in einzelnen aufeinander folgenden Ladungen per Schiff, LKW oder der Schiene. Kontinuierliche und diskontinuierliche Transportwege können auch kombiniert werden, dies erfordert jedoch meist eine Form von Zwischenspeicher [64, S.436]. Besonders der Pipeline- und Schiffstransport werden schon als ausgereifte Technologie kommerziell angewendet (TRL 9) [9, S.19]. In den folgenden Teilkapiteln werden die verschiedenen Transportoptionen vorgestellt, beginnend mit dem Pipelinetransport.

2.3.1 Pipeline

Der Transport von CO₂ durch eine Pipelinestruktur gilt als ausgereifteste der Transportoptionen, weil man bestehende Strukturen nutzen und große Mengen des Rohstoffs über lange Strecken an Land [engl. *onshore*] und unter Wasser transportieren kann [9, S.19].

An Land werden Pipelines in einer Tiefe von 1 m unterirdisch verlegt und vor der Küste [engl. *offshore*] werden sie im seichten Wasser verbaut. Die Pipelines bestehen aus Carbon-Mangan-Stählen. Zum äußeren Korrosionsschutz werden sie mit Teer ummantelt, zusätzlich können Materialien zum kathodischen Korrosionsschutzes verbaut werden [64, S.437]. Nach der Komprimierung kann Kohlenstoffdioxid im superkritischen oder flüssigen Zustand per Pipeline transportiert werden. Beim Transport über längere Distanzen können jedoch Druckverluste auftreten. Diese müssen entlang der Strecke durch „Zwischenverdichterstationen“ ausgeglichen werden [64, S.438]. Der Transport per Pipeline gilt als sicher, kosteneffektiv und jederzeit einsetzbar [67, S.5]. Er verläuft kontinuierlich und benötigt deshalb keine zusätzlichen Zwischenspeicher [68, S.388].

Wird Kohlenstoffdioxid aus anthropogenen Quellen wie z.B. Kohle- und Gaskraftwerken abgeschieden, liegt kein „reines“ Kohlenstoffdioxid vor, sondern es müssen Gasgemische mit Verunreinigungen wie z.B. Stickoxiden, Kohlenstoffmonoxid und Wasser transportiert werden.

⁶³ Abbildung Phasendiagramm CO₂: [66, S.536].

Diese Gemische variieren je nach Herkunft der Emissionen und der verwendeten Abscheidungstechnologie (siehe Tabelle 8). Der optimale Druck für den Transport liegt bei 50- 100 bar [67, S.15], hängt jedoch stark von der Zusammensetzung des Gasgemisches und dessen Temperatur [68, S.389] ab. Die Verunreinigungen beeinflussen durch ihre unterschiedlichen Dampfdrücke den Druck des Kohlenstoffdioxidstroms und könnten z.B. zu einem Zwei-Phasen Strom (gasförmig, flüssig) führen [67, S.9]. Um dies zu vermeiden, müssen die Drücke beim Transport erhöht werden. Durch die Verunreinigung des Gasstroms durch Anteile von H₂S, SO_x und NO_x, steigt das Gefahrenpotential einer toxischen Exposition.

Tabelle 8. Verunreinigung in Gasströmen nach Abtrennungsverfahren⁶⁴

Impurities	Post-Combustion	Oxy-fuel Combustion	Pre-Combustion
CO ₂	>99%	>90%	>95.6%
O ₂	<0.1%	<3%	trace
H ₂ O	0.14%	0.14%	0.14%
H ₂	trace	trace	<3%
H ₂ S	trace	trace	<3.4%
CH ₄	<0.01%	-	<0.035%
N ₂	<0.8%	<1.4%	balance
Ar	trace	<5%	<0.05%
SO _x	<0.001%	<0.25%	-
NO _x	<0.001%	<0.25%	-

Folglich ist die Zusammensetzung des zu transportierenden Gasgemisches von entscheidender Bedeutung. Bislang gibt es keine verbindlichen Spezifikationen oder Regularien für die Zusammensetzung des zu transportierenden Gasstroms [69, S.10]. Da die bisherigen Pipeline-Systeme aus Carbonstahl bestehen [65, S.182], könnte Wasser als Bestandteil des Gasgemisches, Korrosionsprozesse an der Pipeline beschleunigen. Andere Verunreinigungen wie z.B. Schwefelwasserstoff oder Schwefel- und Stickoxide könnten die Prozesse noch verstärken. Hochwertigere Pipeline-Materialien wie z.B. Edelstahl und die Reinheit des zu transportierenden Gases wären dann Grundvoraussetzungen für einen sicheren und korrosionsarmen Transport [65, S.181]. Die Aufreinigung und Kompression von Kohlenstoffdioxid, erfordert jedoch wie bereits beschrieben, zahlreiche, energieintensive Schritte [68, S.389].

Über die Sicherheit des Transports existieren bisher nur wenig empirische Daten, um genauere Aussagen zu treffen [67, S.31]. Daten aus den USA aus den Jahren 1986-2008 stellen Korrosionsprozesse (45%) und Material- und Ausrüstungsschäden (34%) als Hauptursachen für Vorfälle an Pipelines heraus [69, S.4]. Im Vergleich zu Erd- und Flüssiggastransport liegt der CO₂-Transport im Mittelfeld mit 0,64 Vorfällen pro 1000 km Pipeline über einem Zeitraum von 1994-2013. Ein Vorteil im Vergleich zu anderen Gaspipelines besteht jedoch darin, dass CO₂ keine explosiven oder entflammaren Gemische mit der Luft bildet. Dennoch besteht eine potenzielle gesundheitliche Gefahr durch die Verunreinigungen im transportierten Gas wie z.B. Schwefelwasserstoff. Weiterhin ist die höhere Dichte von Kohlenstoffdioxid im Vergleich zur Luft problematisch, da diese im Falle eines Lecks der Pipeline in niedrig gelegenen Gegenden zu hohen Konzentrationen des Gases führen könnten [65, S.188].

⁶⁴ Abbildung Verunreinigungen in Gasströmen nach Abtrennungsverfahren: [67, S.13].

Tritt eine Leckage auf, bildet sich ein CO₂-See, der Lebewesen in der direkten Umgebung ersticken würde. Solche Effekte sind aus natürlichen CO₂-Quellen, wie dem Nyos-See⁶⁵ in Kamerun bekannt.

Besonderes Gefahrenpotential birgt der Transport von superkritischem Kohlenstoffdioxid. Sollte es zu einem Leck kommen, tritt der Joule-Thomson Effekt ein, der mit einer Verflüssigung des Gases und einer damit verbundenen Expansion einhergeht (vgl. Abbildung 42). Dies sorgt für eine drastische Abkühlung der Pipeline und kann durch die damit verbundene Kraft zu Rissen im Pipelinematerial führen [67, S.20].

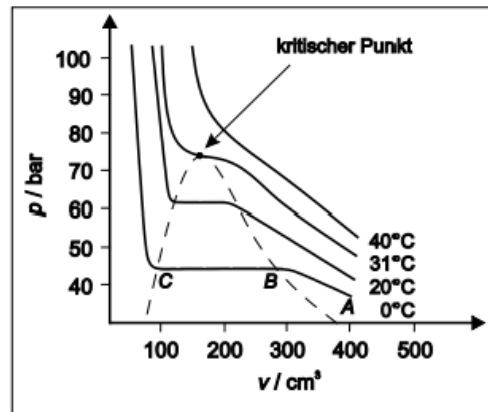


Abbildung 42. Druck-Volumen Isothermen bei verschiedenen Temperaturen für reales Gas CO₂⁶⁶

Zur Abschwächung von solchen Leckagen werden z.B. Notventile, Überdruckschutz und Rissableiter verbaut [38, S.1111], gänzlich auszuschließen sind sie jedoch nicht.

Das größte Netz an zusammenhängenden Pipelines existiert in den USA und Kanada (vgl. Tabelle 9). Das Pipelinenetz erstreckt sich über eine Entfernung von 6000 km [67, S.4].

Tabelle 9. Übersicht CO₂-Pipelinenetze weltweit⁶⁷

Country	System	Length (km)	Capacity (Mt/year)
United States	Permian Basin (West Texas, New Mexico, Colorado)	4 180	
	Gulf Coast (Mississippi, Louisiana, East Texas)	1 190	
	Rocky Mountains (Colorado, Wyoming, Montana)	1 175	
	Midcontinent (Oklahoma, Kansas)	770	
	Other (North Dakota, Michigan)	345	
Canada	Alberta Carbon Trunk Line	240	14.6
	Quest	84	1.2
	Saskatchewan	66	1.2
	Weyburn	330	2
Norway	Hammerfest	153	0.7
Netherlands	Rotterdam	85	0.4
United Arab Emirates	Abu Dhabi	45	
Saudi Arabia	Uthmaniyah	85	

⁶⁵ **Nyos-See-Katastrophe:** 1986 kam es an dem See, der auf einem Vulkangebiet liegt, zu einer Katastrophe. Da der See kein Kohlenstoffdioxid mehr aufnehmen konnte, bildete sich eine Gaswolke, die sich glockenhaft 23 Kilometer weit über die Umgebung legte. In Konzentrationen von über 10 Vol-% führt Kohlenstoffdioxid zu Erstickungen, weshalb 1800 Menschen und viele Tiere und Pflanzen an den Folgen der Gaskuppel starben [64, S.442].

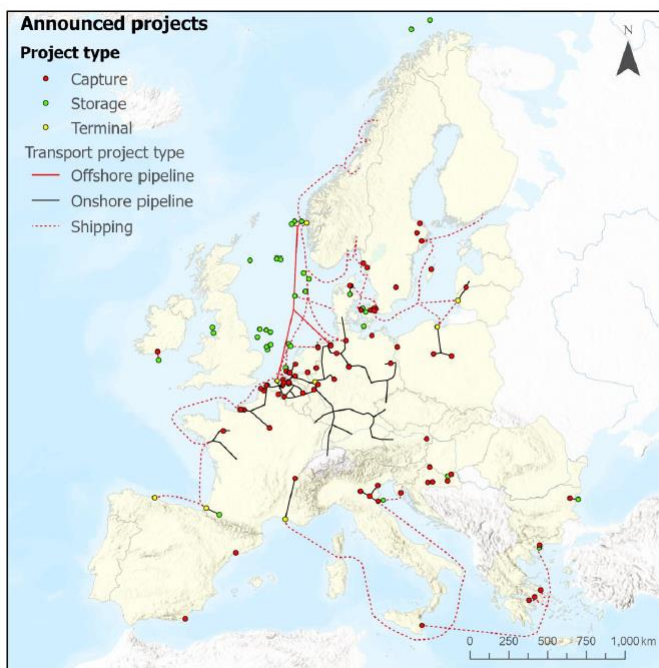
⁶⁶ Abbildung Druck Volumen Isothermen CO₂: [70, S.25].

⁶⁷ Tabelle weltweites Pipelinenetz: [26, S.104].

Bisher beruhen die Erfahrungen im CO₂-Pipeline-Transport jedoch hauptsächlich auf dem Transport von Kohlenstoffdioxid aus natürlichen Ressourcen im Rahmen des Enhanced Oil Recovery (EOR) Prozesses (siehe Kapitel 2.4.1) [69, S.3]. Es bestehen kaum Erfahrungswerte im Umgang und Transport von Gasgemischen aus anthropogenen Quellen.

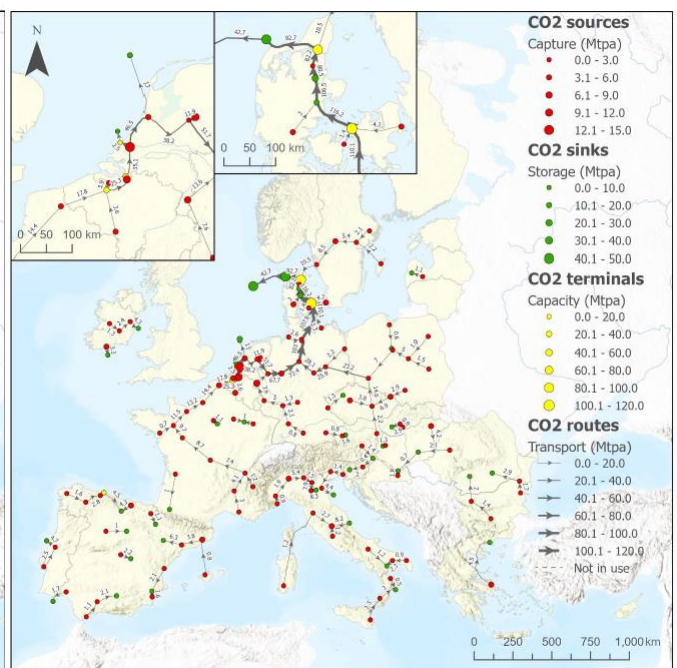
In der EU steht die Pipeline-Infrastruktur noch am Anfang. In einer Studie von Tumara, Uihlein und Hidalgo Gonzalez im Auftrag der EU-Kommission aus dem Jahr 2024, haben die Autoren verschiedene Szenarien für Transportwege per Pipeline modelliert. Grundlage für ihre Kalkulationen waren die bisher angekündigten CCS- und Pipelineprojekte (Abbildung 43 links). Geplante Offshore-Pipelines sind in der Abbildung mit roten Linien, Onshore-Pipelines mit schwarzen Linien auf der Karte eingezeichnet. Ein europaweites Transport-Netzwerk könnte bis 2030 6700-7300 km und bis 2050 15000-19000 km umfassen. Die Kosten für ein solches Projekt würden bis 2050 zwischen 9,3 und 23.1 Milliarden Euro betragen [71, S.5]. Ein beispielhaftes, prognostiziertes Pipelinenetz kann Abbildung 43 rechts entnommen werden. Kohlenstoffdioxid-Quellen sind in der Abbildung mit roten Punkten dargestellt, mögliche geologische Speicherstätten an Land und unter dem Meeresboden mit grünen Punkten. Die gelben Punkte symbolisieren Terminals, in denen Kohlenstoffdioxid zwischengespeichert werden kann.

Figure 47. Simplified overview of the announced CO₂ capture, transport, terminal and storage projects



Source: JRC, 2024

Figure 25. Scenario C1 - CTP 2040 & NZIA 2030 targets (EU), year 2050



Source: JRC, 2024

Abbildung 43. (links) angekündigte Infrastrukturprojekte im Zusammenhang mit CCS, (rechts) mögliches europaweites Pipeline-Netzwerk⁶⁸

Die Kosten für den Transport via Pipeline variieren je nach Land, bestehender Infrastruktur, Transportweg und Speicherziel. Meist sind Transporte an Land günstiger als auf See.

⁶⁸ Abbildung Infrastruktur Pipeline EU: [71, S.48, 72].

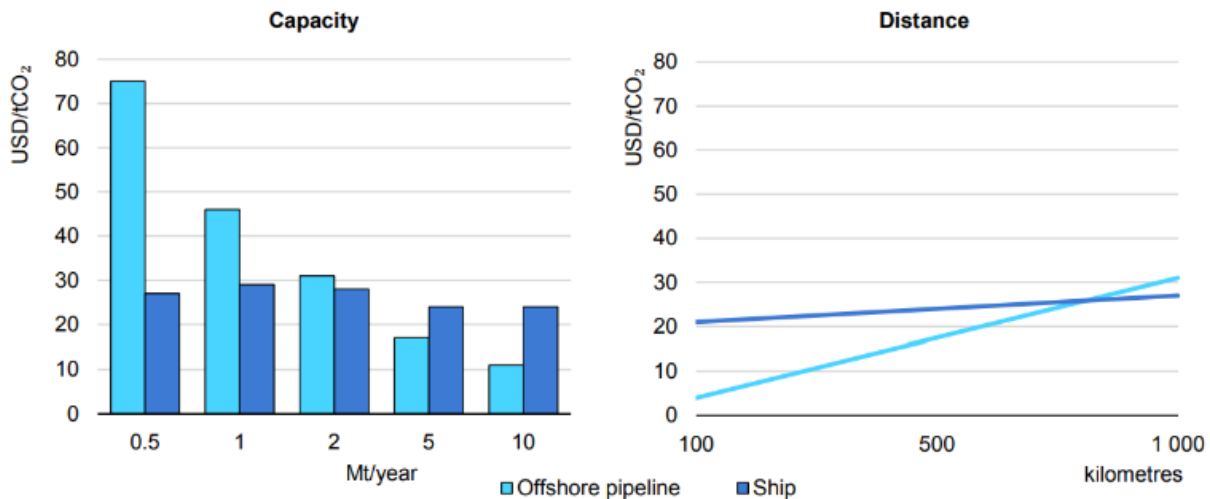
Je mehr CCS-Projekte an eine Transportinfrastruktur angeschlossen werden, desto günstiger wird der Transport. Bisher verlaufen bestehende CO₂-Pipeline-Netze entlang wenig stark besiedelter Gebiete. Müssen die Pipelines in dicht besiedelten Gebieten etabliert werden, ergeben sich weitere Fragen zu Materialauswahl und Gefahrenprävention und denen damit verbundenen Kosten [38, S.1111].

Perspektivisch gilt der Pipelinetransport an Land als realistischste, konstant nutzbare und ökonomischste Option. Man könnte die bestehende Pipeline-Infrastruktur weltweit ausbauen, um die Entfernungen zwischen Erzeugern und Speicherstätten ggf. mit Zwischenspeichern zu überbrücken und den Ausbau der CCS-Technologie zu realisieren [69, S.4-5]. Alte Erdgas und Erdölpipelines [26, S.106-107] könnten umgenutzt werden, sofern sie den geänderten Reaktionsbedingungen (höherer Feuchtigkeitsgehalt und Druck) standhalten. Dabei kann ein „trunk pipeline“- System, an das mehrere Emittenten angeschlossen werden können, eine gemeinschaftliche Infrastruktur ermöglichen [38, S.1110]. Politische Entscheidungen zur Energiewende, Regularien und Gesetze sowie die Akzeptanz der ansässigen Bevölkerung zu dieser Transportform sind jedoch essenziell, damit das Vorhaben gelingen kann.

2.3.2 Schiff

Auf dem Meer gilt der Schifftransport als gute Transportperspektive (TRL 9), besonders für längere Transportwege von mehr als 1000-1500 km [38, S.1109]. Das Gas wird vor dem Transport verflüssigt. So können größere Mengen bei gleichem Volumen transportiert werden. Die Verflüssigung stellt den kostenintensivsten Schritt dieser Transportart dar [38, S.1111]. Anschließend wird das flüssige Kohlenstoffdioxid per Schiff in Temperaturbereichen von -50 bis -20 °C und bei 7-20 bar in isolierten Kühltanks transportiert [52, S.6]. Im Gegensatz zur Pipeline handelt es sich hier um eine diskontinuierliche Transportart, bei der Zwischenspeicher benötigt werden. Das flüssige Kohlenstoffdioxid wird am Anlieferungsort zwischengelagert, um dann in einen gekühlten Transporttank umgelagert und zur Lagerstätte weitertransportiert zu werden [52, S.6].

Heute werden schon kleinere Mengen flüssiges CO₂ für die Lebensmittelindustrie per Schiff transportiert [68, S.390], außerdem gibt es Erfahrungswerte mit dem Flüssiggas- und Erdgastransport, die auf vergleichbare Technologien zurückgreifen. Die Transportbedingungen, die Ausstattung der Schiffe sowie die Ladeinfrastruktur der Häfen müssen jedoch auf die spezifischen Eigenschaften (z.B. mögliche Toxizität, Korrosionsverhalten) des sequestrierten Kohlenstoffdioxids angepasst werden [68, S.390].



Notes: Left-hand chart assumes a distance of 1 000 km. The right-hand chart assumes a capacity of 2 Mt/year.
Source: IEAGHG (2020b), The Status and challenges of CO₂ Shipping Infrastructure.

Abbildung 44. Offshore Pipeline- und Schifftransport im Vergleich⁶⁹

Vergleicht man Offshore-Pipeline Transport mit dem Transport per Schiff, lässt sich feststellen, dass auf 1000 km die Transportkosten per Schiff bei kleineren Mengen rentabler (vgl. Abbildung 44) sind. Je weiter die Entfernung, desto mehr nähern sich die Kosten von offshore Pipeline- und Schiffstransport für kleineren Mengen Kohlenstoffdioxid an. Beim Transport mit dem Schiff muss jedoch berücksichtigt werden, dass durch den Prozess der Verflüssigung und des Betreibens der Schiffsmotoren, ca. 18% zusätzliche CO₂-Emissionen pro 12.000 km entstehen [65, S.192]. Sollen größere Mengen transportiert werden, sind offshore Pipelines die günstigere Option.

Der Transport per Schiff gilt als sicher. Dennoch kann es im Rahmen von Unfällen z.B. durch Kollisionen mit anderen Schiffen oder Feuer, zu Leckagen an Bord kommen. Dies würde den Austritt von flüssigem Kohlenstoffdioxid zur Folge haben. Im Vergleich zum Austritt von flüssigem Erdöl, gelten diese Expositionen jedoch als weniger umweltbelastend. Wie sich eine potentielle Exposition auf den umgebenden Ozean auswirken würde, muss noch weiter untersucht werden [65, S.188-189].

2.3.3 LKW und Zug

Der Transport von Kohlenstoffdioxid kann alternativ auch per LKW (TRL 8-9) und Zug (TRL 7-9) erfolgen. Bisher wird im Rahmen dieser Logistikoption meist nur flüssiges Kohlenstoffdioxid transportiert. Dies wird z.B. von der Getränkeindustrie genutzt [26, S.103]. Der diskontinuierliche Transport erfolgt in gekühlten Drucktanks bei Temperaturen unter -20 °C und bei einem Druck von ca. 20 bar. Mit diesen Bedingungen können Kapazitäten von 20 t Kohlenstoffdioxid per LKW und 1300 bis 3000 t per Güterzug [68, S.390] zu potenziellen Speicherstätten gebracht werden. Da im Vergleich zu anderen diskontinuierlichen Transportarten eine geringere Menge an Gas befördert werden kann (siehe Tabelle 10), gelten diese Optionen als teuer [65, S.184] und nicht rentabel für Kraftwerksanwendungen. Sie eignen sich meist nur für den Transport über kurze Distanzen und für kleinere Mengen.

⁶⁹ Abbildung Vergleich Offshore Pipeline-Transport und Schiffstransport: [26, S.108].

Tabelle 10. Gegenüberstellung Transportmethoden⁷⁰

Transportmethode	Bedingungen	Aggregatzustand/Phase CO ₂	Aktuelle Kapazität [MtCO ₂ /Jahr]
Kontinuierlich			
Pipeline	40-200 bar, 10-34°C	flüssig bzw. überkritisch	110
Diskontinuierlich in Kühltanks und mit Zwischenspeichern			
Schiff	7-20 bar, -50 bis -20°C	flüssig	3
LKW	20 bar, -20 °C	flüssig	1
Zug	20 bar, -20 °C	flüssig	1

Ein effektiver CO₂-Transport kann nur mit einer zusammenhängenden Infrastruktur gelingen. Alle vier Transportoptionen sind dabei einsetzbar, wobei die größten Mengen zukünftig wahrscheinlich über den Schiffs- und Pipelinetransport abgewickelt werden. Eine Transportinfrastruktur kann Onshore- und Offshore-Transportoptionen enthalten.

Auch eine Verschränkung von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Transportwegen z.B. zwischen Pipeline und Schiffstransport ist möglich [64, S.443]. Dabei muss jedoch bedacht werden, dass alle Transportoptionen mit zusätzlichen CO₂-Emissionen verbunden sind.

2.4 Geologische Speicherung von Kohlenstoffdioxid

Bereits in den 1970er Jahren gab es erste Vorschläge, die geologische Speicherung als Emissionsreduktionsstrategie zu nutzen. Zwanzig Jahre später wurden erste Recherchebemühungen durch verschiedene Forschergruppen angebahnt. 1996 konnte die erste Pilotanlage mit dem Namen „Schleipner Projekt“⁷¹ in Betrieb genommen werden. Seitdem haben sich viele öffentlich und privat finanzierte Forschungsprojekte mit der geologischen Speicherung von Kohlenstoffdioxid beschäftigt. Seit den 2000er Jahren wird die Technologie als notwendig angesehen, um anthropogene Emissionen zu reduzieren [65, S.199-200].

Die Speicherung ist der letzte Teil der CCS-Prozesskette und kann an Land oder unter dem Meeresboden erfolgen. Die technische Machbarkeit wurde in Pilotprojekten demonstriert und steht zur Zeit mit mehreren Demonstrationsanlagen (TRL 7-9) [9, S.22] vor dem kommerziellen Einsatz. Mit den bisher existierenden Anlagen konnten pro Speicherstätte bis zu einer Megatonne CO₂ pro Jahr injiziert und gespeichert werden [38, S.1111].

In den nächsten Teilkapiteln werden verschiedene Optionen, Mechanismen und Vorkommen für Speicher vorgestellt. Daran schließen sich Schilderungen zur Überwachung und Sicherheit von Speicherstätten sowie zu deren Kosten an.

⁷⁰ Tabelle Gegenüberstellung Transportmethoden: Daten entnommen und übersetzt aus [42, S.66].

⁷¹ **Schleipner Projekt:** Eine Offshore-Speicheranlage 250 km vor der Küste von Norwegen, betrieben von der Firma Statoil. Die Speicherung erfolgt in einem Erdgasfeld unter dem Meeresboden der Nordsee, der hauptsächlich mit salinaren Aquiferen versehen ist.

2.4.1 Speicherarten

Eine Speicherstätte muss zahlreiche Kriterien erfüllen, um für die Speicherung von Kohlenstoffdioxid ausgewählt zu werden. Eine Lagerstätte kann an Land oder unter dem Meeresboden genutzt werden. Allgemein müssen ausreichende Speicherkapazitäten und Injektionsmöglichkeiten, sowie stabile geologische Bedingungen und somit eine Integrität der Speicherstätte sichergestellt sein [65, S.213-215]. Überkritisches Kohlenstoffdioxid wird nach dem Transport zu einer Flüssigkeit komprimiert und anschließend über Bohrungen mit Hilfe von Pumpen in das mindestens 800 m tiefe geologische Reservoir verbracht. Diese Mindestdtiefe ist von Belang, da Kohlenstoffdioxid hier auf Grund von höherer Temperatur (38 °C) und Druck (8 MPa, 80 bar) mit einer hohen Dichte (225 kg/m³) wieder im überkritischen Zustand vorliegt, wie in Abbildung 45 visualisiert. Je tiefer Kohlenstoffdioxid verpresst wird, desto geringer ist das Volumen und desto höher die Dichte (roter Graph). Mit zunehmender Tiefe der Erdschichten, steigen auch Druck (grüner Graph) und Temperatur (blauer Graph) an.

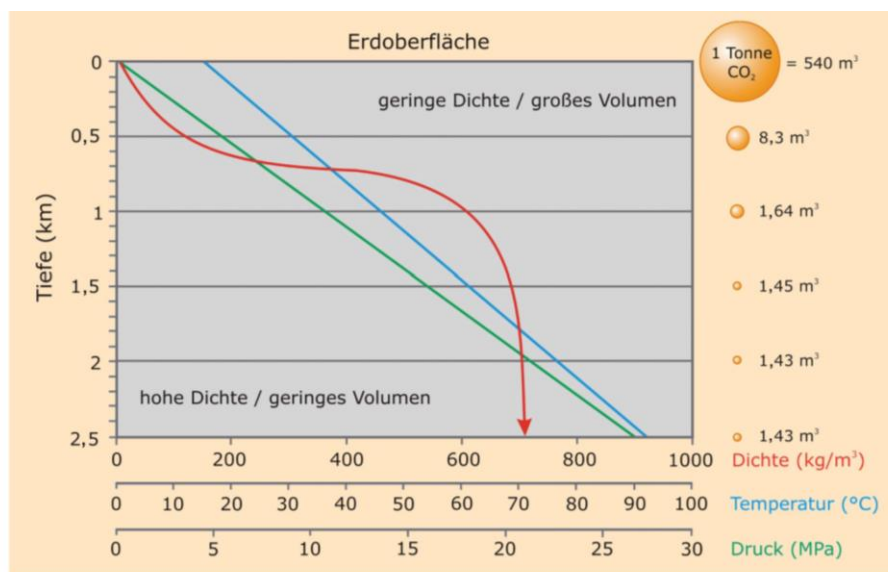


Abbildung 45. Volumen von Kohlenstoffdioxid in Abhängigkeit von der Einlagerungstiefe⁷²

Grundlegend werden zwei Speicherarten in Betracht gezogen, diese sind Porenspeicher und sorptive Speicher. Porenspeicher bestehen aus verfestigten Sedimenten wie z.B. Sandstein, die über eine ausreichende Porosität⁷³ und Permeabilität⁷⁴ verfügen [34, S.132].

Ein Fünftel des Volumens von Sandstein besteht aus Porenräumen zwischen den Sandkörnern, die mikroskopisch klein sind [72, S.52], wie in Abbildung 46 dargestellt. Der Porenraum zwischen den Sandkörnern ist zur Verdeutlichung mit blauem Harz gefüllt. Beispiele für Porenspeicher sind salinare Aquifere, erschöpfte Erdöl- und Erdgaslagerstätten, Speicherstätten mit Enhanced Oil Recovery und Basaltformationen.

⁷² Abbildung Diagramm Volumen-Einlagerungstiefe: [34, S.130].

⁷³ **Porosität:** Anteil des Porenraums, der mit Gasen oder Flüssigkeiten gefüllt sein kann, am Gesamtvolumen eines Gesteins [34, S.128].

⁷⁴ **Permeabilität:** Durchlässigkeit eines Mediums unter bestimmten Druckbedingungen [34, S.128].

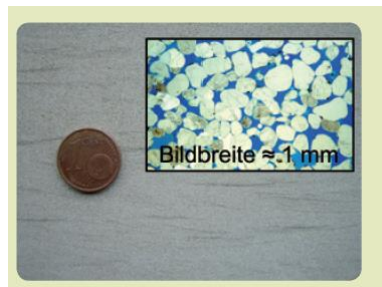


Abbildung 46. Dünnschliffaufnahme Porenraum Sandstein⁷⁵

Bei Porenspeichern wird CO₂ in die Porenräume des porösen Speichergesteins mit Hilfe eines bestimmten Injektionsdrucks injiziert. Darüber liegt undurchlässiges Barrieregestein [engl. *Cap Rock*] (vgl. Abbildung 47).

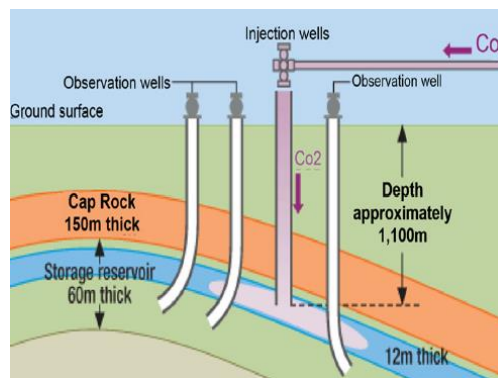


Abbildung 47. Injektionsmöglichkeiten eines Porenspeichers⁷⁶

Innerhalb des Porenraums steigt das CO₂ auf Grund von Auftriebskräften so lange nach oben, bis es auf das Barrieregestein trifft. Das Reservoir wird so abgeschlossen und hindert das Kohlenstoffdioxid daran nach oben zu wandern und ggf. in die Atmosphäre abgegeben zu werden [26, S.112]. Im Porenraum befindet sich außerdem Formationswasser⁷⁷. Dieses weist eine höhere spezifische Dichte auf, weshalb zum Auftrieb des Kohlenstoffdioxids kommt. Durch Akkumulation füllt sich der Porenraum immer weiter mit CO₂. Dieses kann dann langfristig durch chemische Speichermechanismen (siehe Kapitel 2.4.2) mit dem Formationswasser reagieren und Minerale bilden oder sich in diesem lösen [73, S.417].

Neben Porenspeichern existieren auch sorptive Speicher. Hierzu zählen z.B. Kohleflöze. Im Gegensatz zu den Porenspeichern, erfolgt die Anreicherung des Kohlenstoffdioxids über Adsorptionsprozesse an organischen Materialien wie z.B. Kohleoberflächen.

Diesen Effekt nutzt man in der *Enhanced Coal Bed Methane Recovery* (ECBM), um parallel zur Adsorption von Kohlenstoffdioxid auch Methan zu gewinnen. Eine Übersicht der möglichen Lagerstätten von sorptiven und Porenspeichern enthält Abbildung 48.

⁷⁵ Abbildung Porenraum Sandstein: [72, S.53].

⁷⁶ Abbildung Injektionsmöglichkeiten Porenspeicher: [52, S.6].

⁷⁷ **Formationswasser:** damit wird Wasser oder andere Flüssigkeiten bezeichnet, die in den Gesteinsporen enthalten sind.

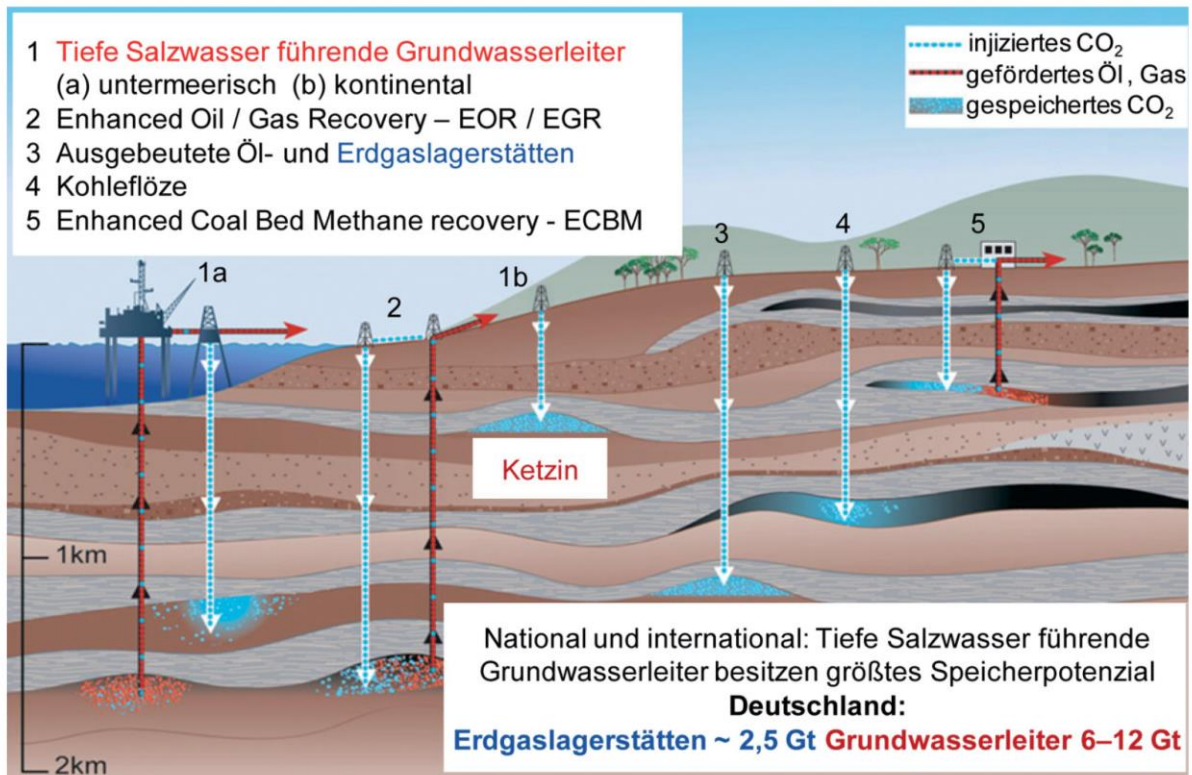


Abbildung 48. Übersicht der geologischen Speicherarten⁷⁸

In den folgenden Teilabschnitten werden die in der Abbildung genannten Speicherorte genauer vorgestellt.

Salinare Aquifere

Salinare⁷⁹ Aquifere bezeichnen Speicherstätten, die über tiefe, salzwasserführende Wasserschichten verfügen. Durch den hohen Salzgehalt (100-300 g/L) sind diese Reservoirs nicht für die Trinkwasserversorgung geeignet [72, S.54]. Die Speicherstätte ist von porösen Gesteinen wie Kalk- oder Sandstein durchzogen, deren Porenräume mit salzhaltigem Formationswasser gefüllt sind (vgl. Abbildung 49). Daher auch die Bezeichnung Porenspeicher. Der salinare Aquifer wird von einem undurchlässigen Deckgestein wie z.B. Granit, Ton umschlossen [65, S.217]. In der Abbildung ist dies als undurchlässige Deck- und Basisschicht vereinfacht dargestellt. Kohlenstoffdioxid wird in das salzhaltige Porenwasser eingespeist, sammelt sich unter dem Deckgestein und geht über längere Zeit in Lösungs- oder Mineralisierungsprozesse über. Eine detaillierte Schilderung der Speichermechanismen kann Kapitel 2.4.2 entnommen werden.

⁷⁸ Abbildung geologische Speicherarten: [34, S.129]. Ketzin war ein Pilotspeicherstandort in Brandenburg, der 2013 eingestellt wurde.

⁷⁹ In der Literatur wird neben dem Begriff salinarer Acquifer auch der Begriff saliner Acquifer verwendet.

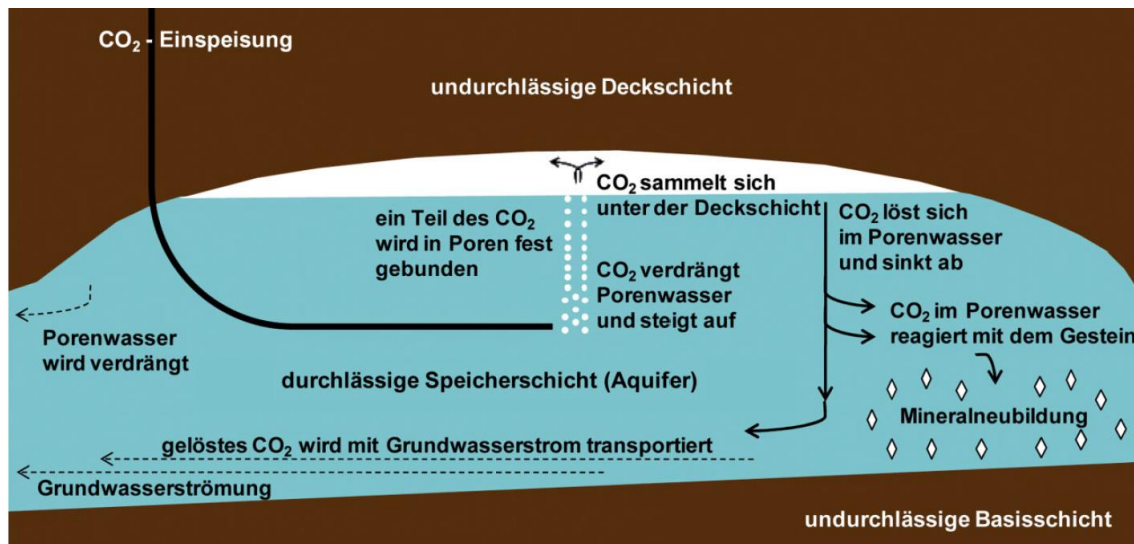


Abbildung 49. CO₂-Speicherung in einem salinen Aquifer⁸⁰

Salzwasserführende Grundwasserleiter sind weltweit zahlreich verbreitet und on- und offshore nutzbar. Man geht deshalb davon aus, dass sie das größte Speicherpotential für Kohlenstoffdioxidemissionen besitzen [52, S.7]. Ein weiterer Vorteil von salinen Aquiferen ist, dass diese Lagerstätten meist in der Nähe von Kohlenstoffdioxid-Emittenten vorhanden sind [74, S.48].

Erschöpfte Erdöl- und Erdgaslagerstätten

Diese Speicher sind Lagerstätten, die sich für die kommerzielle Erdöl- oder Erdgasförderung nicht mehr als rentabel erweisen und deshalb für die Kohlenstoffdioxid-Speicherung in Erwägung gezogen werden [9, S.22]. Sie gelten als günstige Option, da alte Infrastruktur der Erdöl- und Gasförderung und die Erfahrungen und Kenntnisse zur Lagerstätte genutzt werden können [27, S.420].

Problematisch ist bei diesem Lagerstättentyp, dass zwischen Reservoir und Pipeline große Druckunterschiede bestehen. Erhöht man den Druck durch Injektion, könnte es in den Speichern zu Rissen im Deckgestein kommen [9, S.23].

Darüber hinaus ist die Zahl der verfügbaren Lagerstätten, die vollständig ausgefördert sind, rar. Deshalb werden eher Konzepte in Verbindung mit noch förderbaren Erdöl- und Erdgaslagerstätten und der Enhanced Oil Recovery Technologie in Erwägung gezogen.

Enhanced Oil Recovery (EOR)

Öl- und Gasreserven lagern meist in Lagerstätten mit porösen Gesteinsmaterial und können durch Enhanced Oil Recovery (EOR) oder Enhanced Gas Recovery (EGR)- Verfahren aus den Lagerstätten gefördert werden. Dazu wird CO₂ aus fossilen Lagerstätten gefördert, komprimiert und in das Ölvorkommen injiziert. Dort vermischt sich das Gas mit dem dort gelagerten Erdöl. Dessen Viskosität nimmt ab, sodass die Fließeigenschaften zunehmen. Durch Diffusionsvorgänge wird eine leichtere Extraktion des Erdöls möglich [9, S.22]. Kohlenstoffdioxid wird zur Erschließung von Ölreserven genutzt und wieder an die Oberfläche gepumpt. Anschließend wird ein Teil des Gases durch Gaswäsche wieder aufgefangen und erneut verwendet (vgl. Abbildung 50).

⁸⁰ Abbildung CO₂-Speicherung in einem salinen Aquifer: [34, S.131].

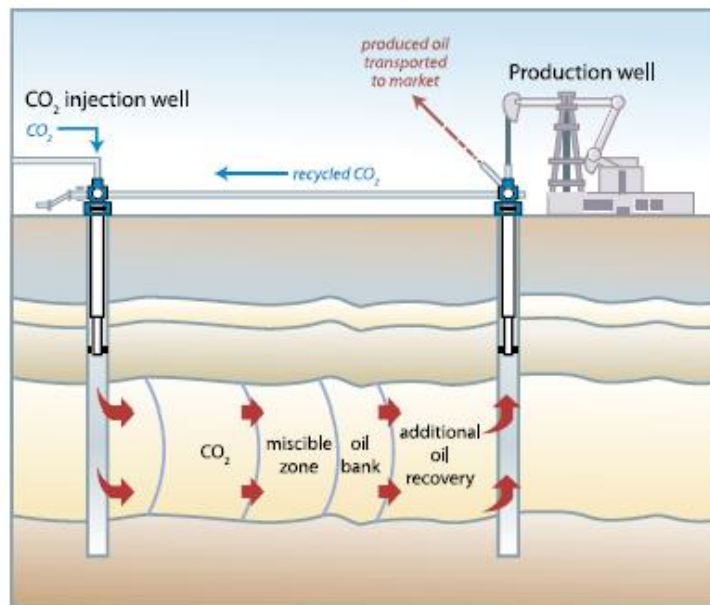


Abbildung 50. Prozessschema des Enhanced Oil Recovery (EOR)- Verfahrens⁸¹

Bei diesem traditionellen EOR werden nur 50% der Anteile des eingesetzten Kohlenstoffdioxids geologisch gespeichert, der Rest entweicht in die Atmosphäre [75, S.520]. Durch das Verfahren kann die Erdölausbeute solcher Standorte um bis zu 60% gesteigert werden [9, S.22]. 140 dieser Projekte sind aktuell etabliert und tragen zu 0,35% der globalen Ölproduktion bei. Die Anlagen befinden sich zum größten Teil in den USA. Das Enhanced Oil Recovery Verfahren gilt als etabliert [73, S.421] und wird kommerziell angewendet (TRL 9).

Traditionelles EOR kann mit CCS verbunden werden. Das Verfahren wird dann als *CCS-EOR* oder *CO₂-EOR* bezeichnet. Dafür wird Kohlenstoffdioxid aus anthropogenen anstatt natürlichen Quellen verwendet. Das Gas wird per Pipeline von den Emittenten zur Lagerstätte transportiert, dort komprimiert und in die Lagerstätte verpresst. 50% des injizierten Kohlenstoffdioxids verbleibt im Erdreich und wird dauerhaft im Speicher eingelagert [75, S.520].

Um einen EOR-Standort an die CCS-Prozesskette anzuschließen, müssen zusätzliche Standortcharakteristika und Gefahrenanalysen durchgeführt werden, um eine langfristige Speicherung sicherzustellen [38, S.1116-1117]. Dies hat bisher zu einer zögerlichen Etablierung der Technologie geführt.

Auch ist die Distanz zwischen industriellen CO₂-Ressourcen und den Ölfeldern und dem damit verbundenen langen Pipeline-Transport ein Hinderungsgrund [6, S.7374]. Darüber hinaus gibt es in den meisten Regionen der Welt zu wenig EOR-Speicher, für zu viele Emissionen (vgl. Abbildung 51). Ob die Technologie zur Reduktion von Emissionen beiträgt, hängt außerdem sehr stark von der Art der EOR-Förderung, der speicherbaren Kohlenstoffdioxidmenge und der Verwendung des gewonnenen Erdöls ab. Die globale Ölpreisentwicklung und politischen Entscheidungen zur CO₂-Bepreisung werden neben Transport und Etablierungskosten den Preis und die zukünftige Rentabilität der Technologie beeinflussen [38, S.1118].

⁸¹ Abbildung Prozessschema des EOR-Verfahrens: [65, S.216].

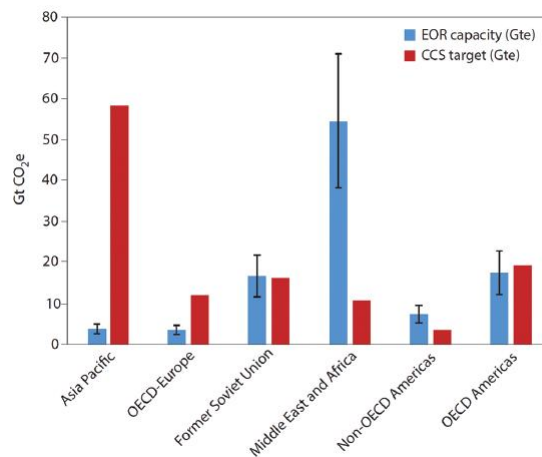
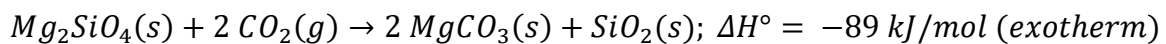


Abbildung 51. Globale Kapazitäten von CO₂-EOR (blau) und Emissionsreduktionsziele (rot)⁸²

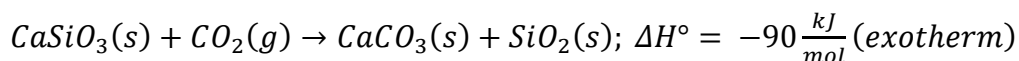
Basaltgestein

Basalte bestehen aus porösem Vulkangestein mit Anteilen aus Calcium-, Magnesium- und Eisenoxid und Erdalkalisilikaten wie z.B. Wollastonit (CaSiO₃) oder Olivin (Mg₂SiO₄) [7, S.13]. Wird Kohlenstoffdioxid in Basalte injiziert, reagieren die beteiligten Stoffe zu stabilen Mineralen wie z.B. Carbonaten, in denen Kohlenstoffdioxid chemisch gebunden werden kann. Exemplarische Reaktionen sind Reaktionsgleichung (26) und (27) unter Standardbedingungen [65, S.323] zu entnehmen. Diese Prozesse bezeichnet man als *in situ* Mineralisierung⁸³. Auf Grund der großen Vorkommen von Basalten an Land und im Meeresboden weltweit, sind diese als langfristige Speicheroptionen interessant.

(26) Olivin:



(27) Wollastonit:



Ein Problem der Speicherstätten entsteht bei der Reaktion der Erdalkalisilikate mit Kohlenstoffdioxid. Als Produkte entstehen neben den Carbonaten auch Siliziumoxide. Diese können eine Passivierungsschicht ausbilden, die die Durchlässigkeit des Speichergesteins beeinflussen könnten [9, S.23]. Darüber hinaus sind die Prozesse sehr energieintensiv.

Ein Pilotprojekt wird zurzeit in Island unter dem Namen *CarbFix* durchgeführt. Man versucht Kohlenstoffdioxid in Basaltformationen an Land und in der ozeanischen Kruste zu verpressen. Dabei wird das Kohlenstoffdioxid über *Direct Air Capture* atmosphärisch abgetrennt und danach in geologische Basaltspeicher injiziert. Die Energieversorgung erfolgt über geothermische Anlagen (siehe Abbildung 52).

⁸² Abbildung Globale Kapazitäten für CO₂-EOR und Emissionsreduktionsziele: [38, S.1118].

⁸³ Es gibt auch Bestrebungen zur **ex situ Mineralisierung**. Zermahlene, silikathaltige Gesteine sollen an Land oder über dem Ozean zerstreut werden, um so eine geochemische Bindung und Speicherung zu ermöglichen. Der Prozess ist auch als CDR-Methode unter dem Namen *Enhanced rock weathering* bekannt [76, S.18].

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass schon nach zwei Jahren bis zu 98% des injizierten Kohlenstoffdioxids zu Calzit (Calciumcarbonat) mineralisiert werden konnten [77, S.53]. Bisher befindet sich die Nutzung solcher Speicherstätten in einer frühen Entwicklungsphase (TRL3) und muss noch genauer beforscht werden [26, S.112].

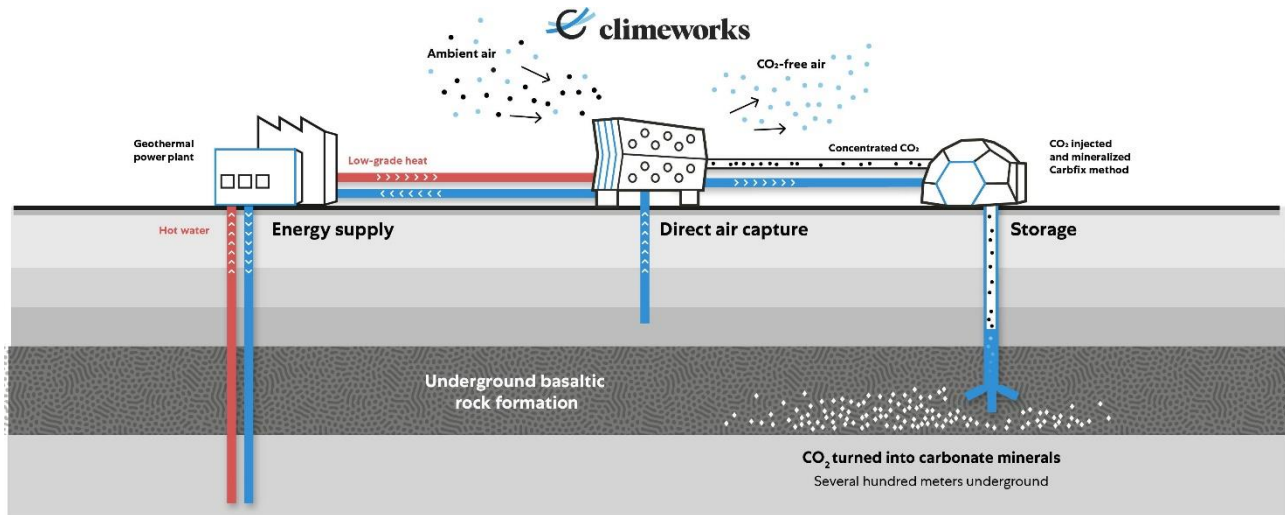


Abbildung 52. Prozessschema des CarbFix-Projektes in Island⁸⁴

Tiefe, nicht abbaubare Kohleflöze

Die Speicherung in nicht abbaubaren Kohleflözen ist im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Speicherarten kein Porenspeicher, sondern eine sorptive Speichermethode. Nach der Injektion wird das Kohlenstoffdioxid durch Adsorption (vgl. Kapitel 3.2.2.2) an der Oberfläche der Kohle gebunden [73, S.421]. Grundlage für eine erfolgreiche Adsorption ist eine gewisse Permeabilität und Porengröße der Kohleflöze [73, S.422]. Kohle ist ein kompliziertes Gemisch kohlenstoffreicher Verbindungen⁸⁵ [32, S.995]. Neben organischen befinden sich auch anorganische Bestandteile in Kohlen wie z.B. Wasser, Aschen und Mineralien [74, S.162].

Man bezeichnet Kohlen aus diesem Grund auch als heterogenes, poröses organisches Gestein [engl. *dual-porosity rock*], das über Mikro- und Makroporen verfügt. Die Porengröße der Makroporen beträgt 50 nm, die von Mikroporen 2 nm. Wird Kohlenstoffdioxid in die Kohlelagerstätte injiziert, diffundiert das Gas in die Kohlematrix und wird adsorptiv in den Poren gebunden [52, S.7].

Als tiefe, nicht abbaubare Kohleflöze [engl. *unmineable coal seams*] bezeichnet man Kohlelagerstätten, die sich nicht für den Abbau von Kohlevorkommen eignen. Dies kann aus geologischen, technologischen oder ökonomischen Faktoren der Fall sein.

Da es keine fest akzeptierte Definition für diese Art der Lagerstätte gibt, variieren mögliche Speichertiefen und Anforderungen sehr stark nach dem Land, in dem die Kohleflöze lokalisiert sind [78, S.99].

⁸⁴ Abbildung Prozessschema des CarbFix-Projektes: CarbFix Project Website <https://www.carbfix.com/direct-air-capture> (letzter Zugriff 22.06.24).

⁸⁵ prozentualer Anteil von Kohlenstoff in Kohlen: Braunkohle: 65–75%, Steinkohle: 75–90%, Anthrazit: > 90%.

Nichtsdestotrotz bietet diese Art der Speicherung im Gegensatz zu Porenspeicherarten einige Vorteile. Kohle ist als natürliche Speicherstätte für Kohlenstoffdioxid über lange Zeiträume etabliert und verlässlich. Es wird gasförmiges Kohlenstoffdioxid adsorbiert. Die Adsorption kann so bei hohen Konzentrationen und niedrigem Druck erfolgen. Darüber hinaus findet die Adsorption hauptsächlich in den Mikroporen der Kohle statt, was Leckagerisiken der Lagerstätte minimiert [79, S.137-138]. Die Speicherung steht jedoch auch vor einigen Herausforderungen. Durch die Injektion des Gases wird die Permeabilität der Kohle verringert, sie schwillt an. Je nach Zusammensetzung der Kohle schwankt der Schwellgrad sehr stark und erschwert Adsorptionsprozesse.

Hier muss noch genauer zu geeigneten Kohlevorkommen geforscht werden [6, S.7375]. Durch das Anschwellen wird auch die Injektion in die Lagerstätte gehemmt, was zusätzliche Bohrungen nötig macht und Kosten verursacht [9, S.24]. Aus diese Gründen muss die Sicherheit solcher Lagerstätten noch genauer untersucht und die Auswirkungen auf die Umwelt umfassend geklärt werden [78, S.99-100]. Die Speicherung in Kohleflözen befindet sich zurzeit noch im Entwicklungs- und Forschungsstadium (TRL3). In einigen Pilotprojekten in China untersucht man die Auswirkungen auf das Kohleflöz nach der Injektion und die Adsorptions- sowie mögliche Desorptionsprozesse in den Mikroporen, sowie mögliche Rissbildungen [52, S.7].

Eine weitere Idee besteht darin, die Speicherung von Kohlenstoffdioxid in Kohleflözen mit der gleichzeitigen Förderung von Methan zu verbinden. Methan kann in Kohleflözen als Flözgas eingelagert sein. Um es zu gewinnen, wird CO₂ in das Flöz injiziert und adsorptiv gebunden. Daraufhin kann Methan desorbiert und abgetrennt werden (siehe Abbildung 53). Die Technologie wird als *Enhanced coal bed methane recovery* (CO₂-ECBM) bezeichnet [73, S.421]. Dieses Verfahren ist besonders für Länder wie die USA, Australien, China und Indonesien interessant, die über sehr große Kohlelagerstätten verfügen. Das gewonnene Methan kann anschließend als Treibstoff oder Rohstoff für chemische Synthesen weiterverwendet werden. Die Kosten für die Einlagerung von Kohlenstoffdioxid in Kohleflözen könnten so reduziert werden [78, S.93]. Aktuell befindet sich die Technologie noch in der Demonstrationsphase (TRL 7) und ist im Vergleich zur EOR-Technologie noch nicht wettbewerbsfähig [9, S.24].

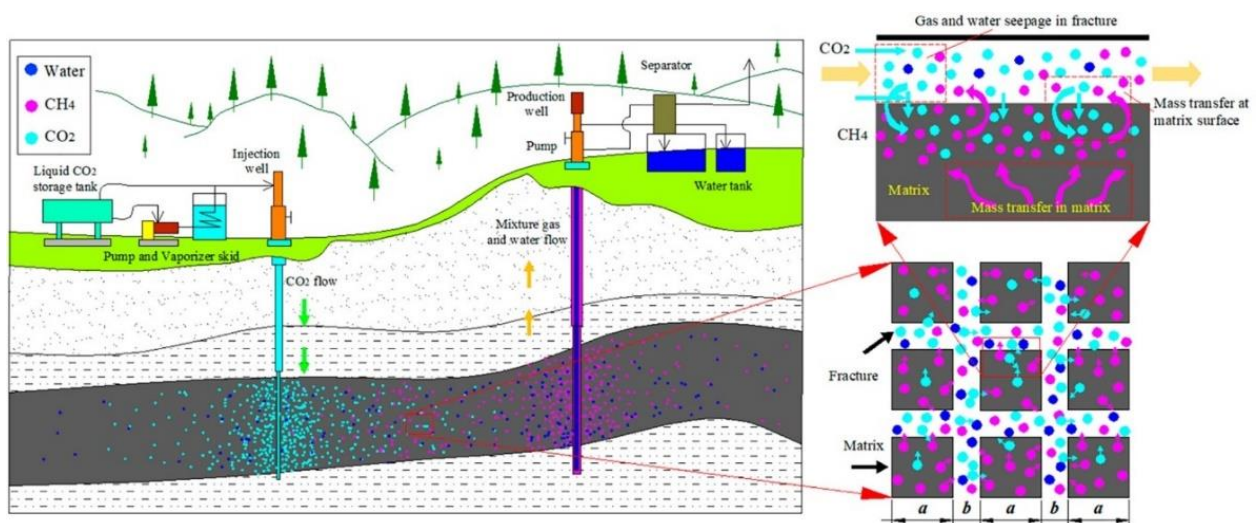


Abbildung 53. Funktionsweise einer CO₂-ECBM-Anlage⁸⁶

⁸⁶ Abbildung Funktionsweise einer CO₂-ECBM-Anlage: [80, S.3372].

2.4.2 Speichermechanismen

Um eine permanente und effektive Speicherung sicherzustellen, müssen verschiedene physikalische und chemische Speichermechanismen zusammenwirken. Die Poren, Hohlräume und Risse der Speicherstätte sind mit Flüssigkeiten wie Wasser und Erdöl oder Gasen wie Erdgas gefüllt. Injiziert man Kohlenstoffdioxid in diese Bereiche der Speicherstätte, kommt es zu einer Vermischung mit den vorhandenen Flüssigkeiten oder mineralischen Partikeln [65, S.205]. Je nach Verweildauer in der Speicherstätte, treten verschiedene Rückhaltemechanismen gleichzeitig auf (siehe Abbildung 54). Je länger das Kohlenstoffdioxid geologisch gelagert wird, desto weiter erhöht sich die Sicherheit der Speicherstätte, weil eine zunehmend größere Menge des Gases durch die verschiedenen Speichermechanismen zurückgehalten wird. Im Folgetext werden vier Rückhaltemechanismen erläutert, beginnend mit physikalischen Speichermechanismen in Form von strukturellen und kapillarischen Rückhaltemechanismen. Daran schließen sich chemische Speichermechanismen mit Lösungsrückhalt und mineralischen Rückhaltemechanismen an.

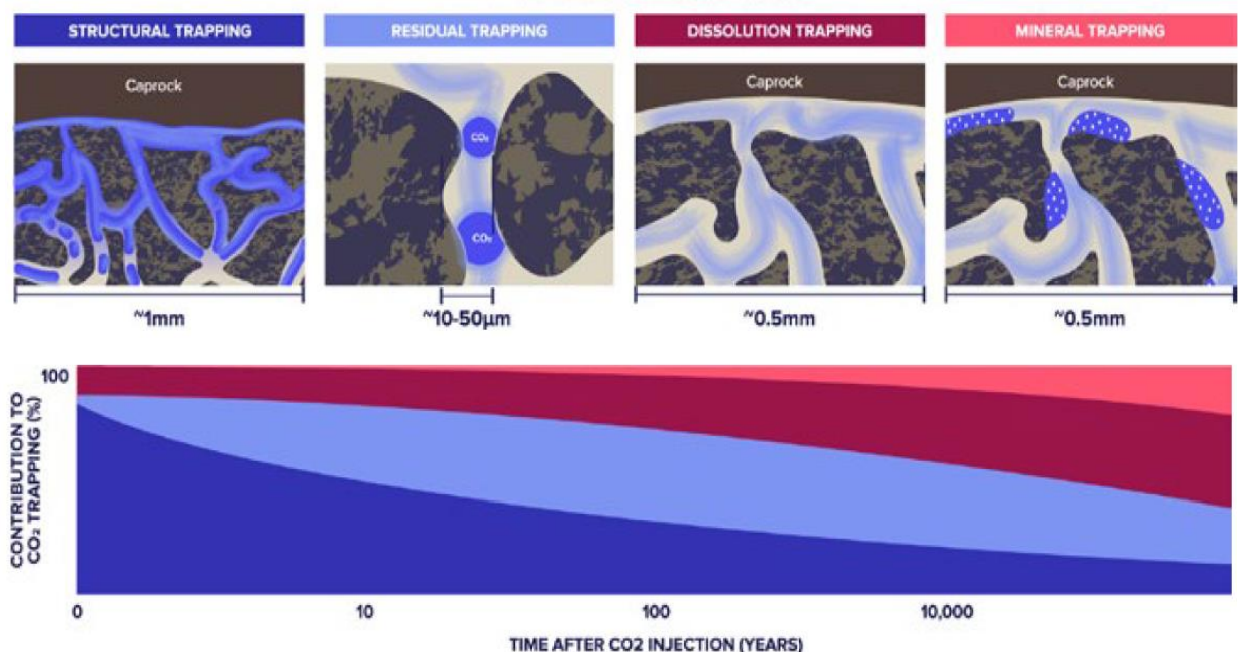


Abbildung 54. Übersicht der auftretenden Rückhaltemechanismen⁸⁷

Strukturelle Rückhaltemechanismen [engl. structural trapping]

Strukturelle Rückhaltemechanismen setzen zu Beginn der Lagerungsphase ein, indem das eingespeiste Kohlenstoffdioxid durch Auftriebskräfte nach oben steigt und physikalisch unter dem undurchlässigen Deckgestein gesammelt und zurückgehalten wird. Diese Art des Rückhaltemechanismus ist langfristig, sofern das Deckgestein keine Risse aufweist. Folglich ist es wichtig, Lagerstätten auf solche geologischen Kriterien hin zu evaluieren und auch den Einsatz von Überdrücken bei der Injektion mit Bedacht zu wählen, um die Integrität des Deckgesteins nicht zu beeinträchtigen [73, S.418].

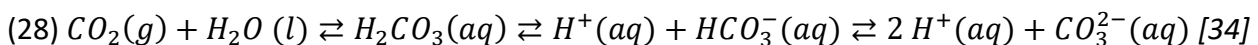
⁸⁷ Abbildung Übersicht der auftretenden Rückhaltemechanismen [81, S.49].

Kapillare Rückhaltemechanismen [engl. residual trapping]

Ein weiterer physikalischer Rückhaltemechanismus ist die Rückhaltung von Kohlenstoffdioxid mit Hilfe von Kapillarkräften in den Porenräumen. Dieser setzt nach 10 Jahren Speicherung ein. Kohlenstoffdioxid wird auf Grund der Enge der Porenräume durch Kapillarkräfte in den Gesteinsporen zurückgehalten. Kohlenstoffdioxid steigt nicht weiter auf und verbleibt in den Porenräumen. Eine Verdrängung des Gases kann nur durch den Einsatz von erhöhtem Druck und anderen Fluiden erreicht werden [34, S.132].

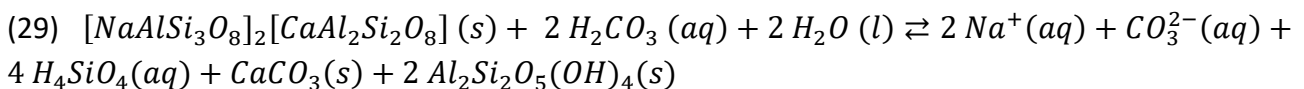
Lösungsrückhalt [engl. solubility trapping]

Über längere Zeiträume von 100 Jahren setzen dann auch chemische Rückhaltemechanismen wie der Lösungsrückhalt ein. Kohlenstoffdioxid löst sich über diese Zeit in dem Formationswasser der Lagerstätte und bildet Kohlensäure (Reaktionsgleichung (28)) und reagiert mit den vorhandenen Mineralien. Diese Reaktionen verlaufen sehr langsam. Für die Speicherung wird gelöstes Kohlenstoffdioxid, gegenüber dem überkritischen Zustand favorisiert, weil es weniger beweglich ist und sich so Leckagerisiken minimieren [65, S.209].



Mineralische Rückhaltemechanismen [engl. mineral trapping]

Nach etwa tausend Jahren beginnt die mineralische Bindung von Kohlenstoffdioxid, meist in Form von Carbonaten. Kohlenstoffdioxid löst sich im Formationswasser, wie in (28) beschrieben. Die entstehende Kohlensäure reagiert mit den alkalischen Bestandteilen des Gesteins (meist Feldspate⁸⁸), die ähnlich zur herkömmlichen Verwitterungsreaktionen abläuft. In Reaktionsgleichung (29) ist eine exemplarische Reaktion eines basischen Feldspats wie z.B. Oligoklas⁸⁹ mit Kohlensäure zu Kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), einem Tonmineral, Kieselsäure (H_4SiO_4) und Calcit (CaCO_3) dargestellt [34, S.132].



Chemische und physikalische Rückhalteprozesse laufen parallel ab. Während der Injektionsphase überwiegen die physikalischen Speichermechanismen.

Erst nach einiger Zeit werden die chemischen Speichermechanismen bedeutsamer (siehe Abbildung 55). Die Speichersicherheit nimmt über die Dauer der Speicherung zu, weil immer mehr Kohlenstoffdioxid mineralisch gebunden bzw. ausgefällt wird und sich im Formationswasser löst [73, S.419]. Mit den chemischen Rückhaltemechanismen, kann ca. 18% des Kohlenstoffdioxids mit der Zeit langfristig an das Gestein gebunden werden. Übrig bleibt in Wasser gelöstes Kohlenstoffdioxid und freies Gas, welches seine Auftriebskraft behält und den Porenspeicher potenziell verlassen könnte [34, S.132].

⁸⁸ **Feldspat:** Silikatminerale mit der allgemeinen chemischen Zusammensetzung $(\text{Ba}, \text{Ca}, \text{Na}, \text{K}, \text{NH}_4)(\text{Al}, \text{B}, \text{Si})_4\text{O}_8$.

⁸⁹ **Oligoklas:** Mischkristalle bestehend aus Albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) und Anorthit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)

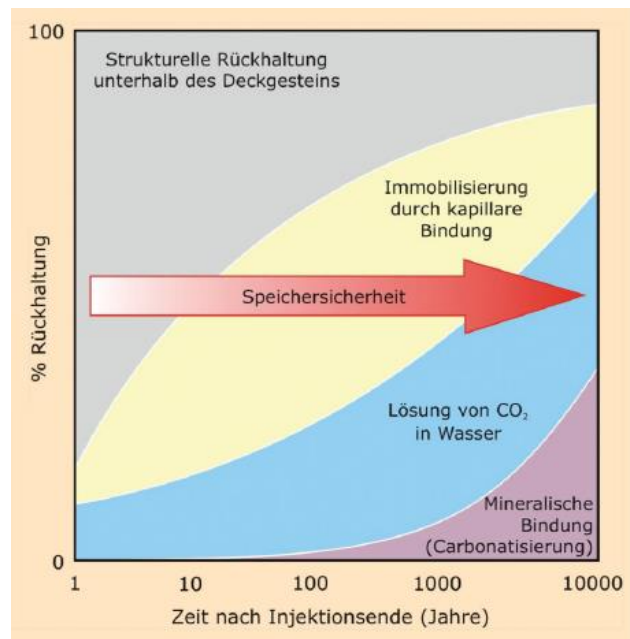


Abbildung 55. Rückhaltemechanismen und Speichersicherheit⁹⁰

2.4.3 Geschätzte Speicherkapazitäten

Als Speicher kommen verschiedene Arten von geologischen Untergründen in Frage (siehe Speicherarten 2.4.1), die sowohl an Land als auch unter dem Meeresboden gelegen sein können. Über konkrete Speicherpotentiale der einzelnen Lagerstätten gibt es Schätzwerte. Insgesamt geht man weltweit an Land von 6000-42.000 Gt CO₂ aus, offshore werden Schätzungen nach ca. 2000-1300 Gt vermutet [26, S.112]. Dabei sind Afrika, Euroasien sowie Nord- und Südamerika die Regionen mit dem größten geschätzten Speicherpotential (siehe Abbildung 56).

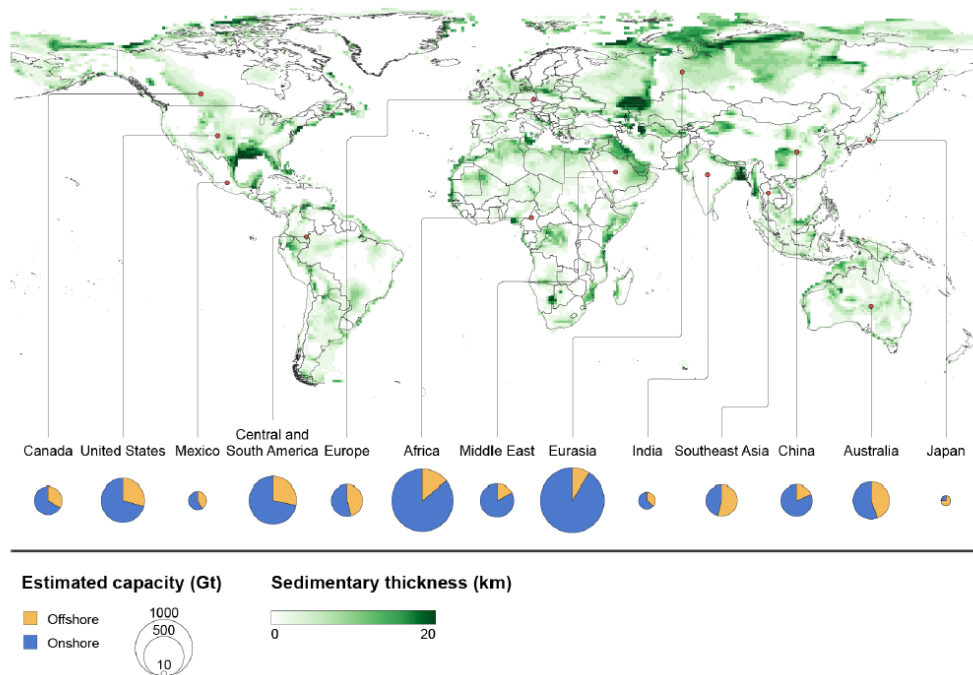


Abbildung 56. Geschätzte, weltweite Speicherkapazitäten aufgeschlüsselt nach Regionen⁹¹

⁹⁰ Abbildung Rückhaltemechanismen und Speichersicherheit: [34, S.132].

⁹¹ Abbildung Geschätzte, weltweite Speicherkapazitäten: [26, S.113].

Tabelle 11 zeigt eine Schätzung der weltweiten Kapazitäten, aufgeschlüsselt nach Speicherarten. Hier liegt das größte Potential bei den Porenspeichern, im Besonderen bei salinaren Aquiferen und (ausgeförderten) Erdöl- und Erdgasfeldern. Kohleflöze als sorptive Speicher nehmen den kleinsten Anteil ein.

Tabelle 11. Geschätzte Speicherkapazitäten nach Speicherart⁹²

Reservoir type	Lower estimate of storage capacity (Gt CO ₂)	Upper estimate of storage capacity (Gt CO ₂)	Upper estimate as a proportion of total emissions in next 50 years (%)
Depleted oil and gas fields	675	900	45
Deep saline reservoirs	1000	400–10,000	20–500
Unmineable coal seams	3–15	200	>1

In Europa werden Speicherpotentiale besonders in der Region der Nordsee und offshore-Speicherprojekten gesehen (siehe Abbildung 57). Großbritannien, Norwegen und Dänemark setzen dort schon Speicherprojekte um. Auch an Land werden Möglichkeiten zur Speicherung evaluiert.

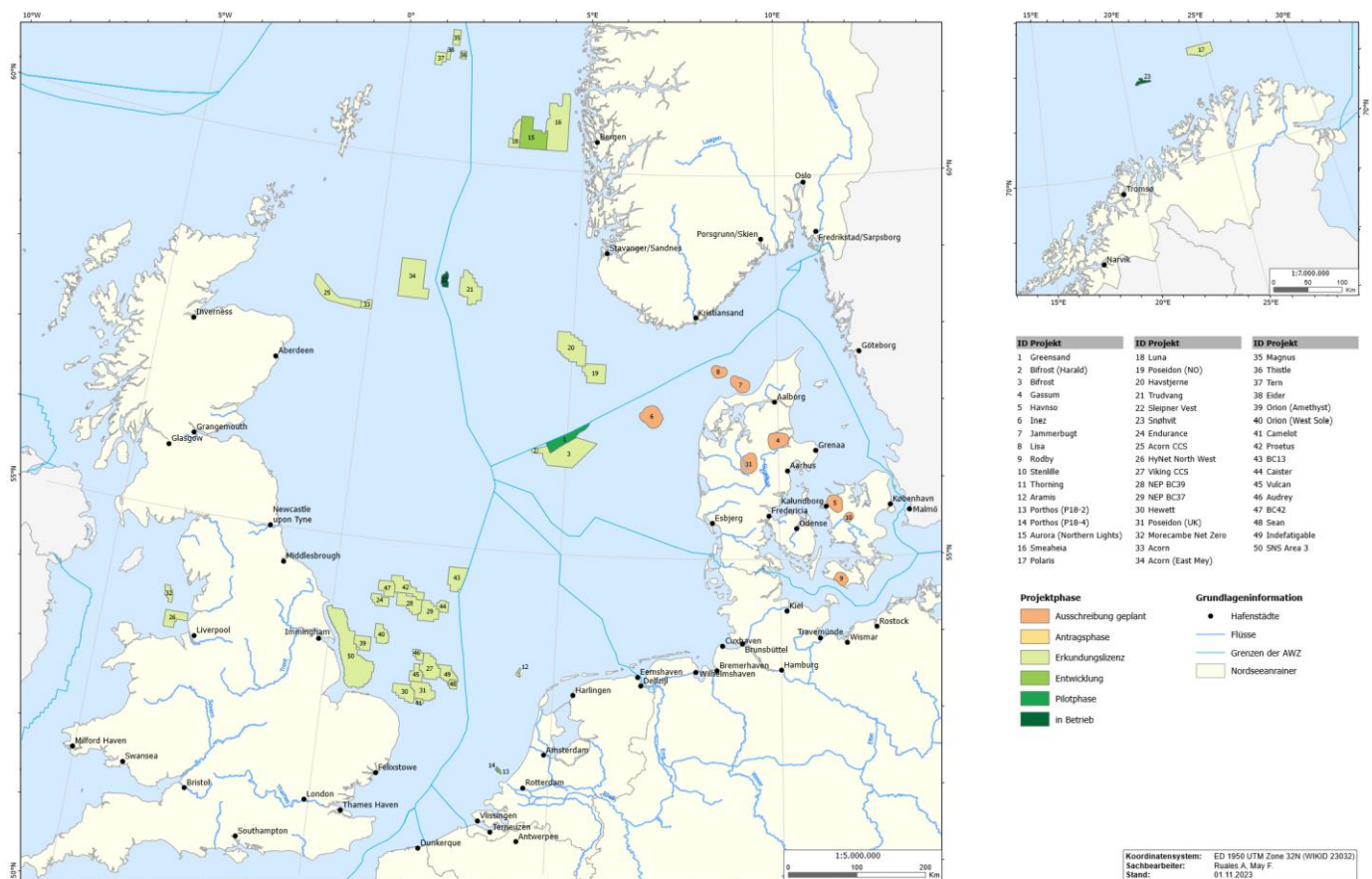


Abbildung 57. Speicherprojekte im Nordseeraum⁹³

⁹² Tabelle geschätzte Speicherkapazitäten nach Speicherart: [74, S.49].

⁹³ Abbildung Speicherprojekte im Nordseeraum: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Downloads/Projektphasen.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (letzter Zugriff 24.06.24).

In Deutschland könnten salinare Aquifere, ausgeförderte Erdöl/Erdgas-Lagerstätten und Kohleflöze für die geologische Speicherung in Frage kommen. Kohleflöze sind jedoch meist nicht attraktiv, da sie in sehr großen Tiefen mit ungeeigneten Kohlen versehen sind, die eine Speicherung sehr erschweren [73, S.422]. Erdöllagerstätten sind in Deutschland nur in kleinen Bereichen mit geringen Kapazitäten verfügbar, weshalb salzwasserführende Speichergesteine favorisiert werden. Salinare Aquifere sind in ganz Deutschland z.B. im norddeutschen Becken, im Alpenvorland oder in den Nord- und Ostseeregionen vorhanden. Mögliche Lagerstätten sind in Abbildung 58 durch grüne Bereiche visualisiert.

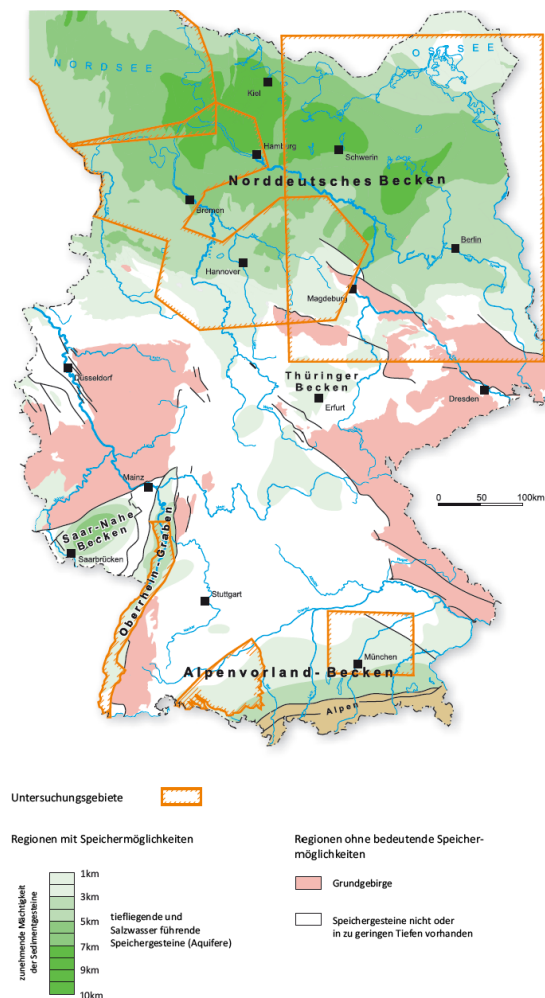


Abbildung 58. Speichermöglichkeiten in Aquifere on- und offshore in Deutschland⁹⁴

Insgesamt werden die geologischen Speicherkapazitäten in Deutschland auf 295 Milliarden Tonnen CO₂ geschätzt, was 40 Jahre Kraftwerksemissionen entsprechen würde [7, S.13].

Alle in diesem Kapitel erwähnten Werte, ob weltweit, für Europa oder für Deutschland sind Schätzwerte. Forschende gehen von großen Kapazitäten aus, die jedoch je nach Literaturquelle sehr stark schwanken können. Um genauere Werte zu erhalten und Aussagen treffen zu können, müssen potenzielle Speicher erschlossen und weitere Daten gesammelt werden. Da die aktuelle Datenlage auf theoretischen Kalkulationen beruht, ist es wahrscheinlich, dass nur ein kleiner Teil der Speicheroptionen überhaupt in Frage kommt [26, S.114]. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

⁹⁴ Abbildung Speichermöglichkeiten in Aquifere On- und Offshore in Deutschland: [82, S.76].

Die Kosten für solche geologische Speicherungen variieren je nach Art der Injektion, Speicherort und Eigenschaften des ausgewählten Reservoirs (siehe Tabelle 12). Die Preisgestaltung hängt sehr stark mit den Speicherstätten, der Speichertiefe und einer offshore- oder onshore-Verwendung zusammen. Im direkten Vergleich ist die offshore-Speicherung meist teurer als die Speicherung an Land, weil die Etablierung der nötigen Infrastruktur schwieriger ist. Die bisher kostengünstigste Option ist die geologische Speicherung an Land in Verbindung mit Enhanced Oil Recovery (EOR). Dies wird in Tabelle 12 als negative Kosten dargestellt. Durch die Gewinnung von Erdöl als Produkt des Prozesses, sinken die Gesamtkosten für eine Speicherung von Kohlenstoffdioxid.

Darüber hinaus ist auch entscheidend, in welchem Land sich die Speicherstätte befindet. In den USA sind die Kosten für die Speicherung geringer als in Europa, da dort schon eine Infrastruktur zum Transport und zur Speicherung besteht, auf die zurückgegriffen werden kann.

Tabelle 12. Übersicht Speicherstätten und mögliche Kosten⁹⁵

Storage options	Onshore/Offshore	CO ₂ storage cost in Europe (USD/t CO ₂ stored)		CO ₂ storage cost in the US ^a (USD/t CO ₂ stored)
		Range	Mean	
EOR	Onshore	-13.51 to 13.51	0	-11.44 ^b
	Offshore	-13.51 to 27.03	6.76	-
Depleted oil field	Onshore	1.49 to 4.86 ^c	3.18	3.81 ^d
	Offshore	4.86 to 10.41 ^e	7.64	-
Depleted gas field	Onshore	1.49 to 4.86 ^c	3.18	4.86 ^e
	Offshore	4.86 to 10.41 ^e	7.64	-
Saline formations	Onshore	2.43 to 7.97 ^e	5.20	2.97 ^b
	Offshore	6.08 to 15.41 ^e	10.75	-
ECBM	Onshore	0 to 40.54	20.27	-5.45 ^f

Notes:

^a Negative cost indicates the cost reduction/credit to the storage system.

^b Storage depth of 1.2 km.

^c Storage depth between 1 km and 3 km.

^d Storage depth of 1.5 km.

^e Storage depth of 1.6 km.

^f Storage depth of 0.6 km.

2.4.4 Sicherheit von Speicherstätten

Speicherstätten müssen vor Beginn einer Injektion des Kohlenstoffdioxids sorgfältig geologisch untersucht, ausgewählt und überwacht werden. Dabei sollten die Speicher nur in geologisch stabilen Gebieten ohne seismische Aktivitäten erschlossen werden [72, S.57]. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass je länger das Kohlenstoffdioxid geologisch gelagert wird, umso mehr erhöht sich die Sicherheit der Speicherstätte, weil eine zunehmend größere Menge des Gases durch die verschiedenen Speichermechanismen zurückgehalten wird (vgl. 3.4.2). Natürliche Kohlenstoffdioxid-Speicher zeigen, dass der Stoff für lange Zeiträume geologisch gespeichert und von Deckgesteinen effektiv zurückgehalten werden kann [34, S.133]. Industriell werden in Nordamerika seit 30 Jahren Erfahrungen mit Kohlenstoffdioxidspeicherung durch EOR gesammelt. Die Einspeicherung von Kohlenstoffdioxid wird außerdem seit 1996 im Untergrund der Nordsee (siehe Kapitel 2.4) erfolgreich durchgeführt [72, S.52].

Nichtsdestotrotz birgt die Speicherung einige Risiken. Durch die Injektion mit erhöhten Drücken kann es in den Deck- und Porengesteinen zu Deformationen und Rissen kommen.

⁹⁵ Tabelle Speicherstätten und Kosten: [9, S.23].

Außerdem könnte das salzhaltige Formationswasser durch die Injektion partiell verdrängt werden und so in Trinkwasserreservoirs [34, S.133] oder an die Erdoberfläche gelangen und das dort vorhandene Ökosystem belasten [72, S.52]. Durch die Lösevorgänge von Kohlenstoffdioxid im Formationswasser steigt die Acidität im Porenraum. Dies könnte die Integrität der Porenspeicher beeinträchtigen und zu Korrosionsprozessen an Einleitungsrohren führen [65, S.228]. Darüber hinaus bieten Altbohrungen, Brunnenstrukturen, Minen sowie natürlich vorkommende Risse und Spalten im Gestein Möglichkeiten für Leckagewege. An solchen Standorten sind geologische „Multibarrieresysteme“ [34, S.134] notwendig, bei denen sich Speicher- und Deckgesteine innerhalb des Speicherstandorts abwechseln.

Sollte es trotz sorgfältiger vorheriger geologischer Evaluation zu einer Leckage in einer Speicherstätte kommen, kann dies vielfältige Auswirkungen haben. Im Gegensatz zu anderen Gasen wie z.B. Erdgas ist Kohlenstoffdioxid ein nicht brennbares, nicht explosives und ungiftiges Gas. Erfahrungen aus natürlichen Kohlenstoffquellen wie z.B. in der Eifel zeigen, dass diese Austritte meist lokal auf wenige Quadratmeter begrenzt sind [72, S.58]. Außerdem kann sich bei Leckagen, bei denen geringe Konzentrationen austreten, das Gas sehr schnell mit der Umgebungsluft vermischen. Da es jedoch eine höhere Dichte als Luft hat, können bei hohen Konzentrationen in Tälern mit wenig Luftbewegungen, erhöhte Gefährdungen auftreten (vgl. Kapitel 2.3).

Das Gefährdungspotential für den Menschen ist gering, solange keine sehr hohen Konzentrationen über längere Zeit eingeatmet werden. Auswirkungen auf die Grundwasserqualität durch austretendes Kohlenstoffdioxid oder Formationswasser können nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Dieses Restrisiko kann jedoch durch eine umfangreiche Überwachung und stetige Untersuchung des Speicherstandorts weiter reduziert werden [34, S.133-135]. In Deutschland müssen Speicherstandorte z.B. bis zu 40 Jahre nach der Stilllegung noch überwacht werden (§31 Absatz 1, KSpG⁹⁶).

Forschende sprechen sich dafür aus, dass die verfügbaren Überwachungsinstrumente, ebenso wie geeignete Speicherarten noch genauer untersucht werden. Bisher bleiben noch einige Aspekte und Fragen offen. Dazu zählen z.B. die Auswirkungen von Verunreinigungen im Gasstrom auf die Speicherung, die Rolle von überkritischem Kohlenstoffdioxid und dessen Interaktion und Einfluss auf das Deckgestein und die mineralischen Prozesse innerhalb der Speicherstätte [38, S.1115].

Aktuell wird in Deutschland bundespolitisch die geologische offshore Speicherung forciert (vgl. 3.5.3). Eine onshore Speicherung kann auf Ebene der Bundesländer entschieden werden. Laut einer Stellungnahme der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina aus dem Jahr 2024, spricht wissenschaftlich nichts gegen eine unterirdische Speicherung an Land oder unter dem Meeresboden, solange die Standorte sorgfältig untersucht, ausgewählt und überwacht werden [83, S.2].

⁹⁶ KSpG: Kohlenstoffdioxid-Speichergesetz; https://www.gesetze-im-internet.de/kspg/_31.html (letzter Zugriff 10.07.24).

2.5 Bewertung der Technologie

In Europa war Carbon Capture and Storage zu Beginn der 2000er Jahre eine wenig populäre Technologie. Die Etablierung schritt nur sehr langsam voran. CCS galt als teuer und technisch schwierig umsetzbar. Dies lag besonders an den hohen Investitions- und Betriebskosten, sowie der fehlenden Infrastruktur für Transport und Speicherung. Auf politischer Ebene gab es keine klaren Rahmenbedingungen und Gesetzgebungen. Öffentliche und private Fördergelder für Forschungsprojekte fehlten. Darüber hinaus gab es in der Bevölkerung vermehrt Widerstand gegen Etablierung von geologischen Speicherstandorten [8, S.9, 17-18]. Dies waren einige Gründe für die fehlende Verbreitung der Technologie bis Mitte der 2010er Jahre in Europa.

Dies änderte sich mit dem IPCC-Berichten ab den Jahren 2018, in denen CCS als essentiell benannt wurde, um Klimaziele im Energie- und Industriesektor überhaupt noch erreichen zu können [38, S.1145]. CCS wurde und wird nun vermehrt als notwendige Brückentechnologie wahrgenommen, die den Weg zu den erneuerbaren Energien mitgestalten könnte [67, S.3].

Durch verschiedene Pilotprojekte konnten außerdem technische Neuerungen etabliert und die Kosten für die Prozesskette reduziert werden. Investitionen in innovative Ansätze wie DACCS, ermöglichten die schnellere Umsetzung von Entwicklungs- und Forschungsvorhaben [26, S.34-35]. CCS-Projekte wurden seit 2018 weltweit vermehrt geplant und entwickelt. Im Jahr 2023 belief sich die Abscheidekapazität der Anlagen auf 312 Megatonnen pro Jahr, eine Steigerung zum Vorjahr um 57% (siehe Abbildung 59). Rechnet man die bereits etablierten CCS-Anlagen mit ein, kann seit 2023 weltweit von einer Abscheidekapazität von insgesamt 361 Megatonnen Kohlenstoffdioxid pro Jahr ausgegangen werden [42, S.11]. Weltweit werden pro Jahr ca. 39.000 Megatonnen Kohlenstoffdioxid emittiert⁹⁷.

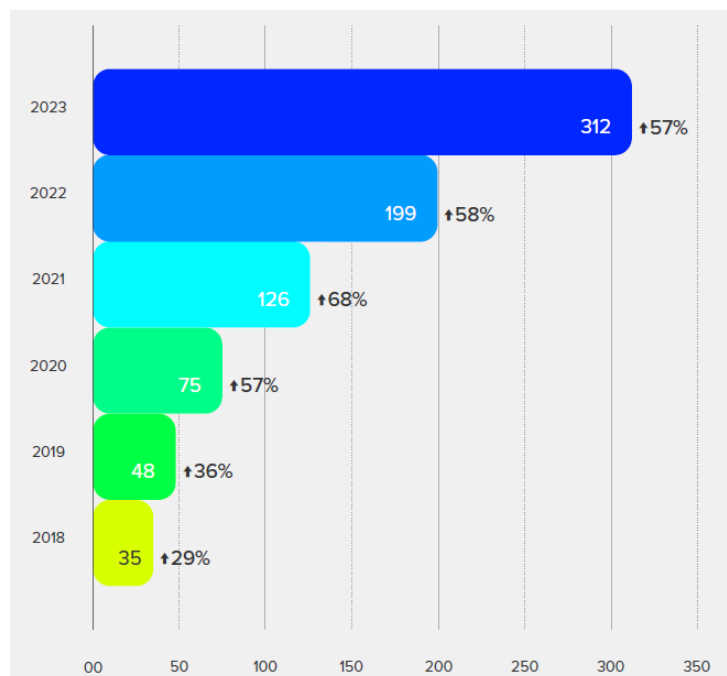


Abbildung 59. Abscheidekapazität [Mt CO₂/Jahr] der geplanten und in Entwicklung befindlichen CCS-Projekte⁹⁸

⁹⁷ Daten aus https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Internationales/Thema/umwelt-energie/umwelt/G20_CO2.html (letzter Zugriff 11.11.24).

⁹⁸ Abbildung Abscheidekapazität der geplanten und in Entwicklung befindlichen CCS-Projekte [42, S.6].

Eine so komplexe Technologieoption mit vielfältigen Prozessschritten umfassend zu bewerten, ist eine schwierige Aufgabe. Nichtsdestotrotz soll im folgenden Teilkapitel mit Hilfe von verschiedenen Dimensionen versucht werden, die vielfältigen Perspektiven und Problematiken aufzuzeigen. Dabei wird schwerpunktmäßig auf ökonomische, ökologische, politische und soziale Aspekte eingegangen. Diese vier Dimensionen werden in den folgenden Unterkapiteln geschildert. Abschließend werden die Erkenntnisse aus der mehrdimensionalen Betrachtung zusammengefasst und im Teilkapitel 3.5.6 ein Versuch unternommen, CCS in den größeren Komplex des Emissionsmanagements zu verorten.

2.5.1 Ökonomische Dimension

Für die Abwägung von ökonomischen Entscheidungen zur Implementation der CCS-Technologie, sind die Investitions- und Betriebskosten, die Dauer der Projektentwicklung sowie die Verfügbarkeit von Infrastruktur zentrale Parameter. Diese werden im Folgetext vorgestellt.

Investitions- und Betriebskosten

Die Gesamtkosten eines solchen Vorhabens zu kalkulieren sind herausfordernd, da viele Faktoren die Prozesse beeinflussen. Da zahlreiche Technologien der CCS-Prozesskette noch nicht marktreif sind, basieren die Schätzungen der Kosten auf Pilotanlagen und Machbarkeitsstudien. Man geht dabei davon aus, dass die Kostenschätzungen mit Unsicherheiten von $\pm 30\text{-}50\%$ einhergehen [84, S.572].

Wenn CCS in einen Produktionsprozess integriert wird, entstehen in jedem Fall Mehrkosten im Vergleich zur Nutzung ohne die Technologie. Soll ein Kraftwerk mit CCS nachgerüstet werden, muss mit höheren Investitionskosten von 70-75%⁹⁹ gerechnet werden. Dies liegt zum einen an den zusätzlichen Komponenten wie z.B. einer Kompressionsanlage. Wird CCS nachgerüstet, führt dies zu Einbußen im Wirkungsgrad des Kraftwerkes. Diese Einbußen können bis zu 10% betragen [84, S.573]. Um diese Verluste zu kompensieren, muss das Kraftwerkskapazität meist erweitert werden, was mit zusätzlichen Energie- und Kraftstoffkosten einhergeht [85, S.166]. All diese Faktoren machen die Nachrüstung von Kraftwerken sehr teuer. Transport und Speicherung von Kohlenstoffdioxid verursachen weitere Kosten (siehe Kapitel 2.3.2 und 2.4.3). Darüber hinaus gibt es weiterhin weltweit Unsicherheiten, welche gesetzlichen Rahmenbedingungen und Umweltauflagen zu beachten sind, die auch Einfluss auf die Kosten haben könnten. Ein Beispiel ist die mögliche Einführung einer CO₂-Bepreisung, wie sie in der EU und in den USA diskutiert werden. Je höher der Preis für Kohlenstoffdioxid, desto eher werden CCS Technologien von der Industrie in Betracht gezogen [6, S.7376].

⁹⁹ Einige Quellen geben sogar 70-90% höhere Investitionskosten im Vergleich zu einem Kraftwerk ohne CCS an [85, S.166].

Projektentwicklung

Um eine Anlage mit CCS in Betrieb zu nehmen, bedarf es einer Reihe von Studien und Genehmigungsverfahren. Neben staatlichen Genehmigungen zur Etablierung einer solchen Prozesskette müssen geologische Gutachten zu den Speicherstätten und Studien zu Abtrennung und Transport durchgeführt und eingereicht werden. Diese Maßnahmen sollen helfen, ökologische Auswirkungen abzuschätzen und Leckagerisiken so weit wie möglich zu reduzieren.

Dies ist vergleichbar mit Prozessen zur Erschließung von geeigneten Öl- oder Gasförderstätten oder Minen für den Bergbau. Von der Planung bis zur eigentlichen kommerziellen Umsetzung von CCS-Anlagen muss mit einem Zeitraum von 6-9 Jahren gerechnet werden [81, S.47]. Damit diese umfassenden Planungszeiträume von privaten Firmen umgesetzt werden, bedarf es klarer politischer Entscheidungen und langfristiger Strategien [38, S.1137].

Transport und Infrastruktur

Bisher wurde die CCS-Technologie als isoliertes Phänomen von einzelnen Standorten betrachtet. Um eine vollständige Prozesskette von CCS erfolgreich zu etablieren, muss im Besonderen die Transportinfrastruktur ausgebaut werden [11, S.3]. Deshalb gibt es in den letzten Jahren vermehrt Bestrebungen alle Glieder der CCS-Prozesskette zu verbinden.

In der Europäischen Union entstehen sowohl in den Niederlanden mit dem Projekt Aramis¹⁰⁰, als auch in Norwegen mit dem Projekt Langskip¹⁰¹, industrielle Netzwerke mit Knotenpunkten [86, S.21], bei denen Transport und Speicherinfrastruktur von verschiedenen industriellen Quellen geteilt werden. Die Speicherung des Kohlenstoffdioxidgases soll bei beiden Projekten offshore in der Nordsee erfolgen. Diese Bündelung der Infrastruktur könnte die Kosten der Anlagen sowie des Gesamtprozesses reduzieren und grundlegend für viele industrielle Prozesse attraktiver machen [9, S.4].

2.5.2 Ökologische Dimension

Im wissenschaftlichen Diskurs besteht der Konsens, dass CCS besonders für die Reduktion bei schwervermeidbaren Restemissionen eingesetzt werden soll [87]. Neben der Nachrüstung von Kraftwerken durch CCS, müssen die Energieeffizienz der Anlagen erhöht und weniger fossil-basierte Kraftstoffe eingesetzt werden, um Klimaziele zu erreichen. Sind Anlagen nicht mit CCS nachrüstbar, sollten sie weniger genutzt oder vollständig vom Netz genommen werden [26, S.60]. Die Implementation von CCS in Kraftwerk- und Industrieprozesse hat jedoch auch einige ökologische Auswirkungen, die in die Überlegungen zur Einführung einer solchen Technologie einbezogen und abgewogen werden müssen.

¹⁰⁰ Projekt Aramis in den Niederlanden: <https://www.aramis-ccs.com/> (letzter Zugriff 01.07.24).

¹⁰¹ Projekt Langskip [engl. Longship] in Norwegen: <https://ccsnorway.com/current-status-of-the-longship-project/> (letzter Zugriff 01.07.24).

Erhöhte Kosten und Energiebedarfe

Durch die Implementation der Technologie entstehen erhebliche Mehrkosten (vgl. ökonomische Dimension). Wie stark diese ausfallen, ist sehr stark vom Reifegrad der Technologien der Prozesskette und der abzuscheidenden Emissionsquelle abhängig [11, S.2]. In Studien zur Ökobilanzierung der Technologie wurde der erhöhte Energiebedarf (10-40% [88, S.83]) und der damit einhergehende erhöhte Kohle- bzw. Erdgasverbrauch als besonders problematisch herausgestellt. Die entstehenden CO₂-Emissionen können zwar bis zu 95% am Kraftwerk abgeschieden werden, die Emissionen entlang der Prozesskette werden jedoch nicht reduziert. Diese entstehen durch den Transport, die Lagerung und die Herstellung von Lösemitteln [89, S.622].

Auswirkungen auf die Wasserressourcen

Im Carbon Capture Verfahren wird Wasser zur Kühlung der Anlagen eingesetzt. Dies erhöht den Wasserbedarf einer nachgerüsteten Anlage enorm. Außerdem entstehen bei den Prozessen Abwässer, die für Wasserorganismen schädlich sein können [52, S.7]. Sollte Kohlenstoffdioxid aus dem Kraftwerk austreten, ginge dies mit einer Erhöhung der Acidität (pH-Wert sank von 6,3 auf 3,0) im Umgebungswasser einher. Betrachtet man die spätere Speicherung in geologischen Lagerstätten, besteht auch hier die Gefahr einer Grundwasserkontamination durch Leckagen des Speichergesteins, in den Brunnen sowie durch Bohrungen, die Kapillar- und Diffusionseffekte auslösen können [89, S.626].

Seismische und geomechanische Effekte

Durch Carbon Storage entstehen weitere ökologische Gefahren. Durch die Injektionen des Gases unter hohem Druck und mit großen Volumina könnten unterirdische Schichten in ihrer Integrität beeinflusst werden. Dadurch können Risse im Gestein entstehen. Diese können zu Leckagen und molekularen Diffusionsprozessen im Deckgestein und einer möglichen Freisetzung des Gases führen [88, S.84]. Aus der Erdöl- und Gasförderung gibt es dazu schon Erfahrungswerte. Durch die Injektion von Flüssigkeiten in geologische Schichten können auch leichte seismische Aktivitäten ausgelöst werden, die sich wiederum auch auf die Integrität der Speicherstätte auswirken können [52, S.8].

Auswirkungen auf Luft- und Bodenqualität

Durch die Implementation einer CCS-Anlage ist eine zusätzliche Infrastruktur und Landnutzung nötig. Bei deren Erschließung und späterem Betrieb können Stäube, verstärkter Einsatz von Maschinen und damit einhergehende Abgase sowie Emissionen des Kraftwerkes, negative Folgen für die Luftqualität der direkten Umgebung haben [52, S.8]. Tritt Kohlenstoffdioxid ungeplant aus, kann dies auch Auswirkungen auf den pH-Wert des Bodens und dessen Schwermetallbelastung haben. Durch Absenkung des pH-Wertes kann die Mobilität von Schwermetallen wie z.B. Pb, Hg, Cd zunehmen. Liegen sie im Überfluss vor, wirken sie toxisch auf aufnehmende Pflanzen des Bodens. Ob und wie sich eine mögliche Kohlenstoffdioxid-Exposition auf die mikrobiellen Organismen im Boden auswirkt, ist noch weitestgehend unklar [89, S.628].

Lagerung und Recycling von Chemikalien

Besonders bei Capture Verfahren mit Aminen (vgl. Kapitel 2.2.2.2), können beim Transport und der Lagerung der Chemikalien ökologische und gesundheitliche Risiken durch MEA-Emissionen auftreten. Deren Auswirkungen sind bisher noch unklar. Sollten Aminprodukte in die Umwelt freigesetzt werden, bilden sich Nitr- und Nitrosamine, die für den Menschen gesundheitsschädlich sind und bei Exposition mit Wasser toxisch wirken können [89, S.626]. Dies ist auch der Grund, weshalb alternative Absorptionsmittel in Betracht gezogen werden. Die Produktion, der Einsatz und das Recycling solcher Lösemittel bedingen zusätzliche Emissionen und Abfälle, die entsorgt werden müssen [90, S.123].

Die hier aufgezeigten Risiken sind noch nicht vollumfänglich wissenschaftlich untersucht. Es besteht weiterer Forschungsbedarf um die Effektivität der Anlagen, Systemparameter und ökologische Auswirkungen umfassend festzustellen und einzuschätzen [90, S.124].

2.5.3 Politische Dimension

Das folgenden Unterkapitel beschäftigt sich mit den rechtlichen Rahmenbedingungen und politischen Entscheidungen auf europäischer und deutscher Ebene, da diese eng miteinander verbunden sind. Da die Implementation der CCS-Technologie auch von der Nutzung und Effektivität einer gemeinsamen Infrastruktur abhängt (vgl. 2.3 Transport), sind auch besonders länderübergreifende Regularien wichtig.

Ausgelöst durch die Vorstellung des europäischen Grünen Deals¹⁰² von EU-Kommissionspräsidentin Ursula von der Leyen im Juli 2019, gab es auf europäischer Ebene zahlreiche Gesetzesvorstöße, um unter anderem eine Klimaneutralität Europas bis 2050 zu erreichen. Die entspricht einem Ausgleich von 500 Megatonnen CO₂-Äquivalenten, zur Erreichung von Netto-Null-Emissionen [91, S.2]. Im Europäischen Klimagesetz aus dem Jahr 2021 wurde diese Zielsetzung noch einmal bestätigt und um die Erreichung einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 55%¹⁰³ bis 2030 konkretisiert. Die detaillierten Strategien und Gesetzesvorschläge zur Umsetzung der Ziele wurden dann im *Fit-for-55-Packet* festgehalten.

Die Netto-Null-Industrieverordnung¹⁰⁴ wurde im März 2023 durch die Europäische Kommission vorgeschlagen. Darin geht es um Technologien, die zur Erreichung der gesetzten Klimaziele im industriellen Sektor eingesetzt werden können. Neben erneuerbaren Schlüsseltechnologien wie Solar- und Windenergienutzung wird auch die Kohlenstoffdioxid-Abscheidung und -Speicherung genannt. Bis 2030 sollen mindestens 50 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid pro Jahr geologisch gespeichert werden.

¹⁰² Die umfangreichen Rahmenvereinbarungen, Themen und Gesetze sind übersichtlich in Infografiken des Europäischen Parlaments unter folgendem Link zu finden: <https://www.europarl.europa.eu/thinktank/infographics/climateaction/en/> (letzter Zugriff 10.04.24).

¹⁰³ Als Referenzwert werden die Treibhausgasemissionen von 1990 angegeben. Die entsprachen 4687,47 Megatonnen CO₂eq. <https://www.europarl.europa.eu/thinktank/infographics/climateaction/en/variables/net-emissions> (letzter Zugriff 10.07.24).

¹⁰⁴ Europäische Kommission: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan/net-zero-industry-act_de (letzter Aufruf 10.07.24).

Darüber hinaus wurde im Februar 2024 der Industrial Carbon Management Plan der europäischen Kommission veröffentlicht, der als Rahmenvorgabe für den industriellen Sektor gelten soll [92, S.1-2]. Aus dem Papier geht hervor, dass bis 2030 von einem geringen Einsatz der Technologie ausgegangen wird. Dies liegt auch an den langen Projektentwicklungs- und Genehmigungszeiten von CCS (vgl. 2.5.1). Zukünftig soll die Technologie immer mehr an Bedeutung gewinnen. Bis 2050 ist ein drastischer Anstieg der Nutzung der Technologie geplant. Dabei sollen die Abscheidungen anteilig durch den Einsatz von Direct Air Capture, CCS und CCU realisiert werden (siehe Abbildung 60). Es sollen europaweit geltende rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen werden, die den Einsatz von CCS für den industriellen Sektor erleichtern und den Ausbau der Transportinfrastruktur ermöglichen. Innovations- und Forschungsprojekte sollen durch die Förderprogramme gezielt unterstützt werden [92, S.3].

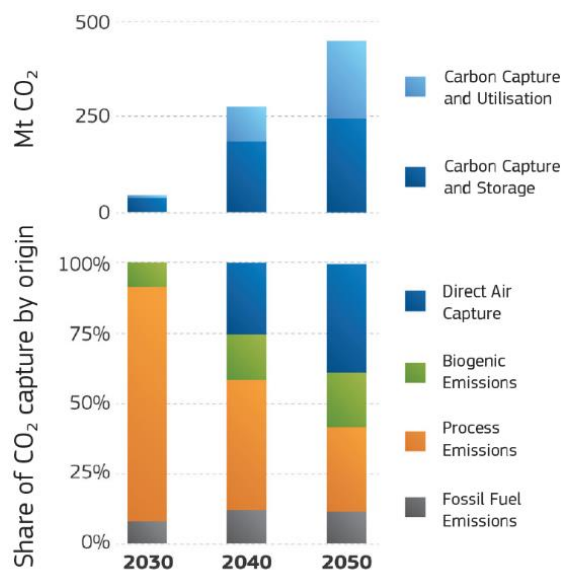


Abbildung 60. Geplante EU-CO₂-Capture-Strategien, Emissionen und Abscheideraten in den Jahren 2030-2050¹⁰⁵

In vielen EU-Mitgliedsstaaten scheint die vorher umstrittene CCS-Technologie als Methode zum Umgang mit schwer vermeidbaren Emissionen und zur Dekarbonisierung eine regelrechtes „Comeback“ zu erhalten und an Bedeutung zu gewinnen. Besonders Länder mit geplanten oder bereits etablierten CCS-Projekten wie z.B. Dänemark, Schweden, Norwegen und die Niederlande setzen sich für einen verstärkten politischen Diskurs über die Technologie ein [91, S.4-5].

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für die geologische Speicherung regelt seit 2009 die Richtlinie 2009/31/EG¹⁰⁶. Sie legt Regularien zur geologischen Speicherung und Durchführung des Verfahrens fest. Darin enthalten sind Erschließungskriterien für Speicherstätten, deren Genehmigung, Nutzung und Überwachung. Nach diesen Richtlinien müssen potenzielle Speicherstätten ausführlich geprüft werden und dürfen keine Risiken für die Gesundheit oder die umliegenden Gewässer bieten. Dieser bestehende Rechtsrahmen wird von europäischen Mitgliedsstaaten in eigene Rechtsprechung umgesetzt. In Deutschland wird dies über das 2012 in Kraft getretene Gesetz zur „Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlenstoffdioxid“¹⁰⁷ realisiert.

¹⁰⁵ Abbildung EU Industrial Carbon Management: [92, S.1].

¹⁰⁶ Gesetzestext zur Richtlinie 2009/31/EG: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32009L0031> (letzter Zugriff 10.07.24)

¹⁰⁷ abgekürzt KSpG: Kohlenstoffdioxidspeichergesetz. <https://www.gesetze-im-internet.de/kspg/> (letzter Zugriff 10.07.24)

Dieses legt fest, dass einzelne Speicher nicht mehr als 1,3 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid pro Jahr einlagern dürfen (KSpG §2 Absatz 2.2). Eine Länderklausel erlaubt es den einzelnen Bundesländern außerdem, die Speicherung gänzlich zu verbieten oder zuzulassen (KSpG §2 Absatz 5). Bis 2022 gab es in Deutschland auf Grund dieser rechtlichen Rahmenbedingungen wenige CCS-Pilotprojekte. Eine großtechnische Umsetzung sowie der damit verbundene Transport waren rechtlich faktisch unmöglich [29, S.21]. Dies änderte sich jedoch durch die veränderte Haltung der EU. Spätestens seit der Etablierung des Europäischen Klimaschutzgesetzes und der damit verbundenen Vorgaben, wird die CCS-Technologie in Deutschland anders wahrgenommen und politisch umgedacht. Im Evaluierungsbericht des Kohlenstoffdioxidspeichergesetzes der Bundesregierung aus dem Jahr 2022, wird die Notwendigkeit der Etablierung einer Carbon Management Strategie hervorgehoben. Diese soll Leitlinien für CCS und CCU definieren, die politisch und gesellschaftlich Unterstützung finden [93, S.20].

In dem Bericht wurde außerdem festgestellt, dass die bestehende Gesetzeslage unzureichend sei, um CCS und CCU zu implementieren und noch viele Unsicherheiten und Hindernisse bei allen Teilen der Prozessschritte bestünden. Das KSpG müsse weiterentwickelt und angepasst werden, um den Anforderungen der Implementation der Prozesskette und den Klimaschutzzielen gerecht zu werden [93, S.119]. Neben der Steigerung von Investitionsanreizen für CCS, sei die Anpassung von internationalen Richtlinien (z.B. London Protokoll) eine weitere Zielsetzung. Diese ermögliche einen internationalen Transport per Pipeline, der Meeresgebiete einschließt [93, S.114].

Auf Grundlage dieses Evaluationsberichtes veröffentlichte das Bundesministerium für Wirtschaft und Klima eine neue „Carbon Management Strategie“ für Deutschland, die im Mai 2024 im Kabinett beschlossen wurde. Das Papier greift einige vorgeschlagene Änderungen des Evaluierungsberichtes auf und stellt CCS- und CCU-Technologien als eine Möglichkeit von verschiedenen Technologien dar, wie die Dekarbonisierung der Industrie vorangetrieben und die angestrebte Klimaneutralität erreicht werden kann [94, S.1,4]. Die Carbon Management Strategie umfasst die Erneuerung des KSpGs und Änderungen des London Protokolls. Diese Gesetzesänderungen sollen CCS- und CCU-Implementationen erleichtern. Der internationale Export von Kohlenstoffdioxid für die Offshore-Speicherung in europäische Partnerländer wie Norwegen, soll durch Anpassungen des London Protokolls erlaubt werden. Darüber hinaus wird durch die Erneuerung des KSpG eine offshore Speicherung in der deutschen Wirtschaftszone ermöglicht. Meeresschutzgebiete in Nord- und Ostsee sind davon jedoch ausgeschlossen. Auf dem Festland soll es keine Speicherung geben. Die Management Strategie gibt den Bundesländern jedoch die Möglichkeit, ein Verbot bzw. eine Erlaubnis der geologischen Speicherung an Land zu beantragen¹⁰⁸. Darüber hinaus soll der Pipelineausbau für private Unternehmen ermöglicht werden. Staatliche Fördergelder für CCU/CCS werden auf nicht vermeidbare Industrieemissionen z.B. Zementproduktion und die Abfallwirtschaft begrenzt. Kohlekraftwerken sollen keine CCU/CCS-Technologien ermöglicht werden, um den Kohleausstieg nicht weiter zu gefährden. Gaskraftwerke und Kraftwerke, die Biomasse zur Verstromung nutzen, soll die Anwendung von CCS/CCU gestattet werden [94, S.2-3].

¹⁰⁸ Einige Bundesländer haben bereits eigene Carbon Management-Strategien veröffentlicht. NRW tat dies beispielsweise schon im Jahr 2021. Neben dem Ausbau einer Pipeline-Infrastruktur mit Etablierung von Rhein- und Westfalen-Clustern, werden besonders Speicherungen im europäischen Ausland (z.B. Niederlande, Norwegen, Dänemark) forciert [95, S.47, 50, 92]. Eine Speicherung auf dem nordrhein-westfälischen Festland ist bisher nicht vorgesehen.

Bei Vertreterinnen und Vertretern aus Industrie-, Gewerkschafts- und einigen Umweltverbänden stoßen diese Pläne der Bundesregierung auf Zustimmung. In einem Thesenpapier sprechen sie sich verstärkt für die Etablierung von CCS in Deutschland als Teil der Carbon-Management Strategie aus [96]. Dennoch ist die Technologie nicht unumstritten, da die Effektivität, sowie die ökologischen und ökonomische Auswirkungen von Carbon Capture and Storage sehr stark von den genutzten Emissionsquellen und dem Forschungsstand der verwendeten Verfahren innerhalb der Prozesskette abhängen (vgl. 2.5.5). Kritischere Stimmen wie Greenpeace, Bürgerinitiativen und der BUND warnen vor unvorhersehbaren Klima- und Umweltschäden durch die Technologie. Sie sehen in CCS nur eine „Scheinlösung“ zur Verlängerung des Einsatzes fossiler Energieträger und eine Verzögerung der Energiewende [97, S.1].

2.5.4 Soziale Dimension

Für die Etablierung einer neuen Technologie, ist die Akzeptanz in der Bevölkerung essentiell. Die öffentliche Meinung trägt zu politischen Entscheidungen bei und beeinflusst damit direkt ökologische und ökonomische Faktoren. Wie sich die öffentliche Meinung zu CCS entwickelt, ist weltweit sehr unterschiedlich, weshalb in diesem Teilkapitel nur die gesellschaftliche Akzeptanz von CCS in Deutschland geschildert wird.

Schon in den 2010er Jahren war die Technologie stark politisiert und die gesellschaftliche Akzeptanz gering [98, S.197]. Der öffentliche Diskurs fokussierte sich verstärkt auf die Suche nach geeigneten geologischen Lagerstätten. Dies führte in der Bevölkerung zu der Wahrnehmung, dass die Technologie Parallelen zur Lagerung von radioaktiven Abfällen oder dem Frackingverfahren aufweisen würde. Allein die Erwägung einer Prüfung von möglichen Speicherstätten führte in Brandenburg und in Schleswig-Holstein zu Bürgerprotesten. Dabei wurde Kohlenstoffdioxid als „tödlich wirkendes Gas“ dargestellt, welches eine „geologische Zeitbombe“ [99, S.47] sei. Die Anwohner in beiden Bundesländern sorgten sich um Leckage- und Gesundheitsrisiken und beurteilten die Technologie als nicht wirtschaftlich und als Teil einer „absurden Energiepolitik“ [99, S.48]. Nach diesen Protesten wurden Bemühungen zur Implementation von beiden Untersuchungsstandorten eingestellt.

Erst im Zeitraum ab 2018, wurde die Technologie durch die Erwähnung im IPCC-Bericht wieder in der Öffentlichkeit wahrgenommen und trug auch zu deren vermehrter Bekanntheit bei. Diesmal wurde sie medial als eine von vielen Möglichkeiten zur Bewältigung von schwer vermeidbaren Emissionen eingeführt. Der Fokus in der Berichterstattung wurde auf die Kompensation von Kohlenstoffdioxid und die Erzeugung von negativen Emissionen gelegt [98, S.198, 202]. Trotzdem hielten die Bedenken in der Bevölkerung an. Es wurden besonders fehlende rechtliche Rahmenbedingungen, Forschungslücken und die Risiken der Speicherung als problematisch wahrgenommen [29, S.36]. In Studien zur Untersuchung der gesellschaftlichen Akzeptanz von CCS stellte sich außerdem heraus, dass die meisten Befragten zwar von der Technologie gehört und eine Einstellung dazu hatten, sie jedoch nicht unbedingt über genauere Kenntnisse verfügten. Für viele Befragte war es schwierig ökologische Probleme (z.B. Smog, globale Erwärmung, saurer Regen) thematisch voneinander abzugrenzen [100, S.245].

Bis heute halten Bürgerproteste gegen die Technologie an¹⁰⁹, was die gesellschaftliche Akzeptanz von CCS erschwert und Konfliktpotential schafft. Klimaschutzmaßnahmen, die große Veränderungen in der Wirtschaft und im Alltag der Bevölkerung zur Folge haben, können jedoch nur gesamtgesellschaftlich mitgetragen werden. Dazu müssen Bedenken gehört, ernst genommen und ggf. entkräftet werden [101, S.16]. In diesem Zusammenhang wird von Seiten der Wissenschaft vorgeschlagen, in der öffentlichen Debatte wissenschaftlich fundiert zu informieren und über Risikoabwägungen zu sprechen. Die Folgen einer Nicht-Implementation von CCS sollten genauso thematisiert werden, wie mögliche Risiken der Technologie. Dazu muss der Klimawandel und seine Folgen als ernstzunehmendes Problem wahrgenommen werden.

Zur Erreichung der Klimaziele sollten verschiedene Szenarien mit nötigen Verhaltensänderungen verständlich vermittelt werden [101, S.17]. Dies könnte z.B. durch öffentliche Bildungsinstitutionen und Gesprächsforen mit partizipativen Austausch realisiert werden [52, S.8-9]. Somit könnten Teile der Bevölkerung zu politischen Entscheidungen gehört, informiert und deren Standpunkte demokratisch in Entscheidungsprozesse einbezogen werden.

2.5.5 Zusammenfassung

Betrachtet man die Diskussionen um die CCS-Prozesskette, bestehen aus wissenschaftlicher Perspektive keine Zweifel daran, dass dies keine alleinige oder einfache Lösung für die Klimakrise und die Reduktion von Emissionen und damit die Erreichung von Klimazielen ist. Nichtsdestotrotz bietet die Technologie eine von vielen Perspektiven, besonders für den Bereich der schwer vermeidbaren Emissionen. Forschende sind sogar der Meinung, dass ohne CCS keine Klimaneutralität erreicht werden kann [101, S.8]. Einige meinen sogar, dass die Emissionsreduktionskosten um 140% steigen würden, wenn CCS nicht mit einbezogen würde [10, S.798]. Wenn die Etablierung weiter voranschreitet, könnten nach Angaben des CCS Institutes bis 2050 zwölf Gigatonnen Kohlenstoffdioxid geologisch gespeichert werden. Wie in Abbildung 61 visualisiert, ist dies nur ein kleiner Teil der Mengen, die nötig wären, um die Klimaziele zu erreichen.

¹⁰⁹ Exemplarisch sei hier die „Bürgerinitiative gegen CO₂-Endlager e.V.“ aus Schleswig-Holstein genannt: <https://keinco2endlager.de/> (letzter Zugriff 03.07.24).

Figure 5.6–2: Comparison of total mass of CO₂ required to be stored by 2050 with the maximum theoretical potential of the current CCS project pipeline



Abbildung 61. Speicherbedarf und -potential durch geplante CCS-Projekte bis 2050¹¹⁰

Bei der Entscheidungsfindung zu einer Integration von CCS müssen mehrdimensionale Faktoren, sowie Vor- und Nachteile und offene Unklarheiten abgewogen werden. In Abbildung 62 sind einige Argumente gegenübergestellt. Festzuhalten bleibt: CCS ist keine Technologie, die hilft, Treibhausemissionen gänzlich zu vermeiden. Entstehende fossile Emissionen können unter Einsatz der Technologie (auch nicht allumfänglich) reduziert werden und damit die Folgen des Klimawandels begrenzt werden. Dies sollte aber eigentlich nicht das zentrale Ziel zur Erreichung der Treibhausgasneutralität sein. Emissionen sollten gänzlich vermieden werden.

Zurzeit besteht die Gefahr, dass CCS verwendet wird, um den verlängerten Einsatz von fossilen Energieträgern zu ermöglichen und zu sogenannten Lock-In-Effekten zu führen. Bestrebungen zur Minderung von Treibhausgasemissionen könnten verzögert oder abgeschwächt werden. Dabei ist jedoch wichtig festzuhalten, dass CCS kein Allheilmittel für eine Reduktion von Emissionen ist, sondern nur in Kombination mit anderen Technologien, Emissionsvermeidung und dem Erhalt der natürlichen Kohlenstoffdioxidsenken einher gehen kann [102, S. 6,8,19].

¹¹⁰ Abbildung Speicherbedarf- und potential durch geplante CCS-Projekte bis 2050 [42, S.74].

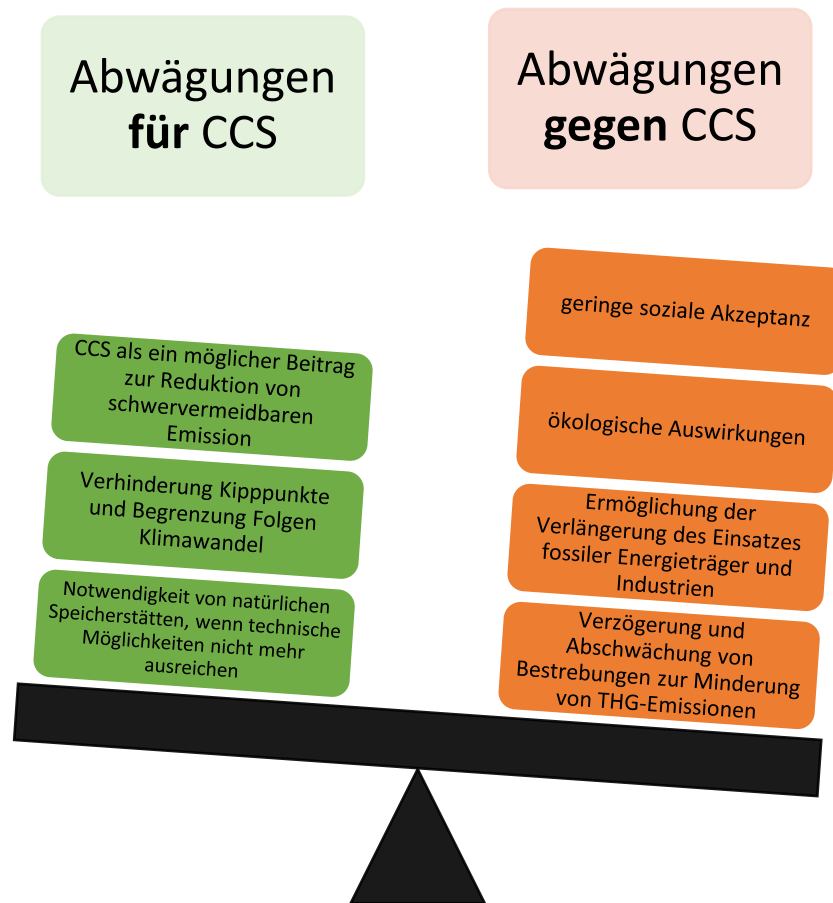


Abbildung 62. Einige Abwägungen für und gegen die Implementation von CCS¹¹¹

Derzeit gibt es viel zu viele unbekannte Variablen im Zusammenhang mit der CCS-Prozesskette, die durch weitere Forschungsanstrengungen eruiert werden müssen. Einige davon sind in Abbildung 63 dargestellt, die einen Überblick über die Mehrperspektivität der Thematik gibt. Ökologisch muss besonders die Effektivität der Anlagen, sowie deren Auswirkungen auf die Umwelt weiter untersucht werden. Dies muss mit strengen Monitoring- und Umweltauflagen für die geologische Speicherung einhergehen, um Menschen und Umwelt nicht zu gefährden. Die ökonomische Rentabilität hängt von vielen Faktoren wie z.B. den verwendeten Capture-Verfahren, der vorhandenen Infrastruktur, Planbarkeit, den gesetzlichen Rahmenbedingungen und den Verfügbarkeiten von Speicherstätten ab. Auf der sozialen Ebene sollten die Bedenken der Bevölkerung ernst genommen und in den demokratischen Prozess einbezogen werden. Darüber hinaus sollte über eine generationengerechte Nutzung von vorhanden geologischen Speicherstätten nachgedacht werden. Auf politischer Ebene sind sowohl in Europa als auch in Deutschland klare Klimaziele formuliert. Diese einzuhalten bedarf einer mutigen Klimaschutzpolitik, die auch mit Einschränkungen der bisherigen Lebensstile und drastischen Einsparungen und Vermeidung von fossilen Emissionen einhergehen muss. CCS kann dabei ein kleiner Baustein sein.

Lebenszyklus-Analysen der Technologie müssen soziale, ökologische und ökonomische Aspekte sowie nachhaltige Energieressourcen einkalkulieren, um die wirkliche Nachhaltigkeit und Zukunftsfähigkeit der Technologie umfassend zu evaluieren [52, S.8].

¹¹¹ Abbildung Abwägungen für und gegen CCS Implementation selbst erstellt in Anlehnung an [102, S.8].

Carbon Capture and Storage (CCS)				
Zusammenfassung Dimensionen				
Perspektive	ökologisch	ökonomisch	sozial	politisch
weltweit	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erhöhte Kosten und Energiebedarfe ▪ Auswirkungen auf Wasserressourcen ▪ Mögliche seismische und geomechanische Effekte ▪ Auswirkungen auf Luft- und Bodenqualität ▪ Auswirkung durch Chemikalienlagerung und -recycling 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohe Produktions- und Investitionskosten ▪ Lange Projektentwicklungszeiten ▪ unzureichende Infrastruktur- und Transportmöglichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Je nach Standort und Abhängigkeit/Etablierung der Technologie sehr unterschiedliche Akzeptanz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Je nach Standort und Abhängigkeit/Etablierung der Technologie sehr unterschiedliche Regularien, in den USA und China, ist CCS am stärksten verbreitet
Europa	<ul style="list-style-type: none"> → Weiterer Forschungsbedarf (Effektivität der Anlagen, ökologische Auswirkungen von einzelnen Teilen der Prozesskette, Lebenszyklusanalysen) 	<ul style="list-style-type: none"> → Nutzung von gemeinsamer Infrastruktur → Effektivität steigern und somit Kostenreduktion der Prozesse erreichen → Planbarkeit, klare gesetzliche Rahmenbedingungen → CO₂-Zertifikate? → Geeignete Speicherstätten erschließen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Je nach Standort und Abhängigkeit/Etablierung der Technologie sehr unterschiedliche Akzeptanz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gesetzesgrundlagen: European Green Deal, European Climate Law, Net Zero-Industry Act, 2009/31/EG ▪ Bis 2050 Abscheidung von ca. 250 Mt CO₂ geplant
Deutschland	<ul style="list-style-type: none"> → Umwelt- und Monitoringauflagen zur Sicherung der Bevölkerung Gewässer und Überwachung des Transports- und der Speicherstätten 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ stark politisiert ▪ verstärkte Bürgerproteste und Umweltbewegungen gegen geologische Speicherung an Land → Generationsgerechte Nutzung von Speicherkapazitäten → Klimabildung und Austauschforen etablieren 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Novellierung KSPG und London-Protokoll; Offshore CCS-Speicherung und internationaler Pipelinetransport wird ermöglicht → Gesetzlicher Rahmen für Etablierung von CCS bis 2030

Abbildung 63. Zusammenfassung Dimensionen von CCS

2.5.6 Ausblick „Carbon Management“

In Dekarbonisierungsbestrebungen wird CCS nicht als isolierte Technologieoption wahrgenommen, sondern meist als Teil eines umfassenderen Carbon Managements betrachtet. Neben CCS werden dabei auch Verfahren wie Carbon Capture and Utilisation (CCU) und Carbon Dioxide Removal (CDR) einbezogen (siehe Abbildung 64). Jede dieser Optionen hat dabei einen eigenen Geltungsbereich. Betrachtet man fossile Rohstoffquellen, wird CCS zur Reduktion von schwer vermeidbaren Emissionen und CCU zur Verzögerung bzw. Verlagerung von schwer vermeidbaren Emissionen eingesetzt, indem das aufgefangene Kohlenstoffdioxid zu Produkten umgesetzt wird, die dann wieder Emissionen freisetzen. Gewinnt man Kohlenstoffdioxid aus Biomasse oder der Umgebungsluft (wie im DAC-Verfahren, vgl. 2.2.1.5), spricht man von CDR-Verfahren. Beispiele dafür sind DACCS und BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage), die vorhandenen Emissionen nutzen, aus der Umgebungsluft entfernen und im Rahmen der CCS-Kette einspeichern, ohne auf fossile Energieträger oder Prozessquellen zurückzugreifen. Diese Verfahren könnten genutzt werden, um Restemissionen auszugleichen.

Jeder dieser Ansätze hat Vor- und Nachteile und nur die Verfolgung einer Vielzahl an verschiedenen Maßnahmen, wird zu einer Reduzierung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen führen [7, S.13]. Carbon Management kann dabei Anlass sein die internationale Zusammenarbeit in Bezug auf die Weiterentwicklung von Technologien und Umweltstandards, sowie von Klima- und Energiepolitik voranzubringen.

Durch die Implementation der Technologien besteht jedoch auch die Gefahr, dass die verstetigte Nutzung von fossilen Energieträgern forciert und die Emissionsvermeidung in den Hintergrund gedrängt wird.

Politisch müssen klare, gesellschaftlich akzeptierte Zielsetzungen für die Implementierung dieser Technologien mitgedacht und festgesetzt werden. Je mehr Emissionen entstehen, desto schwieriger sind die gesetzten Klimaziele zu halten. Das heißt auch, je mehr Emissionen entstehen, desto mehr Carbon Management-Maßnahmen werden benötigt [11, S.7-8].

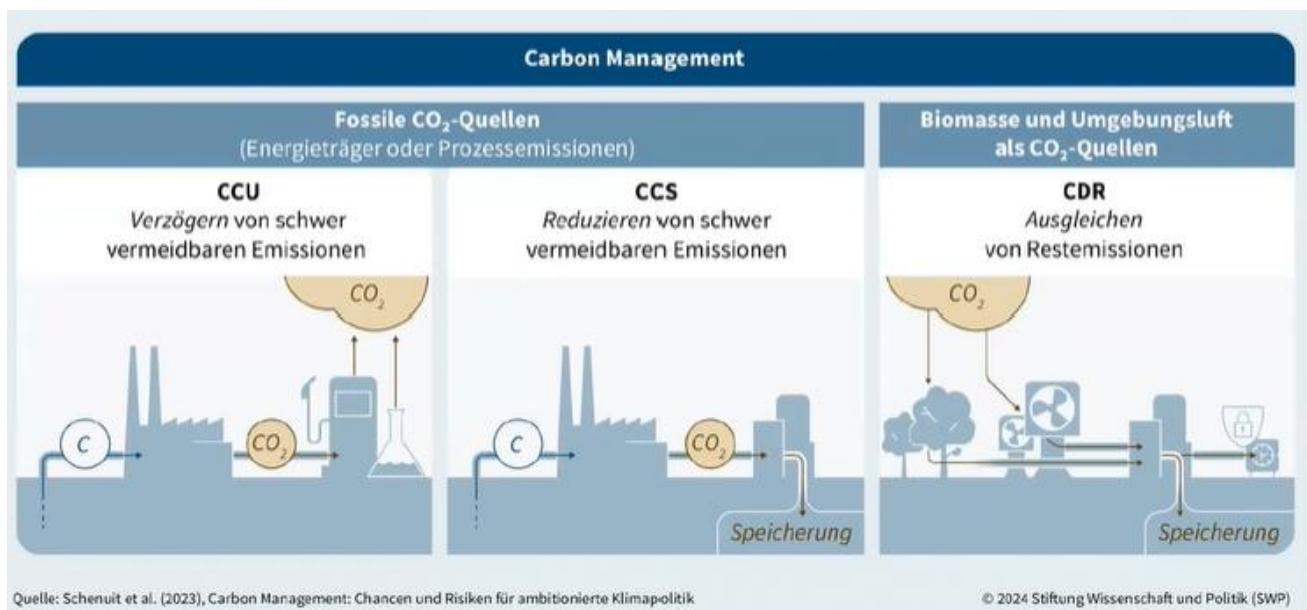


Abbildung 64. Übersicht Carbon Management Technologien¹¹²

Übergeordnetes Ziel muss es jedoch sein, Emissionen zu vermeiden und den Kohlenstoffdioxidgehalt in der Atmosphäre zu reduzieren. Dafür müssen mehr erneuerbare Energien und Kraftstoffe eingesetzt, Energieeffizienzen erhöht und technische und natürliche Senken für Kohlenstoffdioxid etabliert und ausgebaut werden [7, S.15]. Das kann nur im Zusammenhang mit einer weltweiten Energiewende erreicht werden, die große Veränderungen und Herausforderungen birgt. Dies bedarf weltweiter politischer, gesellschaftlicher, ökologischer und ökonomischer Anstrengungen. Denn falls diese Herausforderungen nicht zeitnah bewältigt werden, wird das Auswirkungen auf den gesamten Planeten und folglich auch auf alle Lebensbereiche der darauf lebenden Menschen haben [6, S.7378].

¹¹² Abbildung Carbon Management Technologien aus [11, S.9].

3. Grundlagen Bilingualer Unterricht

In diesem Kapitel werden nach einer kurzen Schilderung der historischen Entwicklung und Begriffsentwicklung des bilingualen Unterrichts seine Zielsetzungen beschrieben. Anschließend werden für diese Arbeit relevante CLIL-Lehrstrategien, sowie die Perspektiven und Herausforderungen von bilingualen Lernangeboten geschildert. Danach wird die Situation des bilingualen Chemieunterrichts behandelt (vgl. 3.6). Dabei wird schwerpunktmäßig auf die Zielsetzungen und didaktischen Grundprinzipien des Faches, als auch auf die Verfügbarkeit von Unterrichtsmaterialien und außerschulischen Lernorten eingegangen.

3.1 Entstehung und Begriffsentwicklung

In Deutschland entstand der bilinguale Unterricht als politische Maßnahme zur Stärkung der Völkerverständigung im Rahmen des deutsch-französischen Élysée-Vertrags von 1963 [103, S.11]. Zentrales Ziel war es dabei unter anderem, die deutsch-französische Zusammenarbeit zu stärken. Auf Grund dieser Maßnahmen eröffnete im Jahr 1969 in Deutschland das erste Gymnasium mit bilingualem Zweig [104, S.20]. Noch heute finden sich entlang des Rheines Schulen mit deutsch-französischer bilingualer Tradition, die auf diese Bestrebungen zurückgehen. 1964 wurde im Rahmen der Hamburger Beschlüsse Englisch als verbindliche Fremdsprache für allgemeinbildende Schulen eingeführt [103, S.11-12]. Durch die Etablierung der Maastrichter Verträge und der Gründung der Europäischen Union löste Englisch Französisch endgültig als meistverwendete Unterrichtssprache in bilingualen Lernsettings in Deutschland ab. Trotz dieser Rahmenbedingungen entwickelte sich die Etablierung des bilingualen Unterrichts bis in die 90er Jahre sehr zögerlich. Dies war unter anderem darin begründet, dass Bilingualer Sachfachunterricht als erweiterter Fremdsprachenunterricht wahrgenommen wurde, in dem die Vermittlung des Sachfachs einen geringeren Stellenwert einnehmen würde. Zu Beginn der Implementation fokussierte sich der bilinguale Unterricht auf eine Vermittlung der Inhalte des Sachfachs in der Fremdsprache. Dies führte zwar zu einem Wissenszuwachs im Sachfach, jedoch nicht zu Steigerungen der fremdsprachlichen Kompetenz der Lernenden. Später wurden Sachfachinhalte als gleichberechtigt zur Spracharbeit angesehen und ähnlich wie im modernen Fremdsprachenunterricht in den Unterricht eingewoben (vgl. Kapitel 3.2-3.4).

Eine genaue Definition für den bilingualen Unterricht zu formulieren, ist keine einfache Aufgabe. Es kursieren viele Begrifflichkeiten und Konzepte. Die Ausgestaltung und Umsetzung von bilingualem Lernen werden international und auch national innerhalb der verschiedenen Programme unterschiedlich betrachtet und praktiziert [105, S.9]. Dennoch lässt sich festhalten, dass mit bilingualem Lernen meist eine Unterrichtspraxis gemeint ist, die zwei oder mehr Sprachen verwendet, um Inhalte eines Sachfachs zu unterrichten [106, S.2, 57]. Ob dies auch meint, dass in einem bilingualen Lernsetting die Kompetenzen in zwei Sprachen gleichzeitig gelernt und entwickelt werden oder ob nur die Fremdsprache (L2) als Arbeitssprache verwendet werden soll [107, S.1, 172], darüber herrscht z.B. auch in Deutschland Uneinigkeit (vgl. Kapitel 3.5.2).

Auf Grund der Vielzahl an bilingualen Angeboten und Programmen, beschränkt sich diese Arbeit nur auf den bilingualen Unterricht, in dessen Fokus die Sprachen Englisch und Deutsch stehen.

Im europäischen Kontext haben sich in diesem Zusammenhang der Ansatz: *Content and Language Integrated Learning* (CLIL) [108, S.11] und in der DACH-Region¹¹³ die daran angelehnten deutschsprachigen Begriffe *bilingualer Sachfachunterricht* (BSFU) oder Bilingualer Unterricht (BU) etabliert [104, S.19]. Erst genannter geht zurück auf das Grundkonzept von Coyle, Hood und Marsh, die CLIL wie folgt definieren:

„*Content and Language Integrated Learning (CLIL) is a dual-focused educational approach in which an additional language is used for the learning and teaching of both content and language*“ [109, S.1].

CLIL wird auch oft als Überbegriff [*engl. umbrella term*] verwendet, um verschiedene Herangehensweisen an bilingualen Unterricht zu beschreiben [96, S.10]. Dabei ist CLIL eine Art Kontinuum, auf dem sich viele Unterrichtspraktiken wiederfinden und einordnen lassen. In Deutschland wird der Sammelbegriff CLIL für die Mehrheit der bilingualen Unterrichtspraktiken angewandt, wie sie an deutschen Schulen unterrichtet werden. Dabei ist CLIL klar von anderen Organisationsformen wie z.B. Einweg- und Zweiwegimmersion¹¹⁴ [111, S.20] abgegrenzt. Die CLIL-Unterrichtspraxis wird als fachlicher Kompetenzerwerb beschrieben, der zeitweise oder vollständig in einer anderen Sprache als der Erstsprache (L1) erfolgt [107, S.173]. Dabei beginnen CLIL-Programme meist in den weiterführenden Schulen, nachdem der Schriftspracherwerb in der L1 abgeschlossen ist. Die Fremdsprache (L2) wird dann in wenigen Sachfächern als Unterrichtssprache eingesetzt. Für die Begriffe Bilingualer Sachfachunterricht bzw. Bilingualer Unterricht, die oft in der deutschsprachigen Literatur erwähnt werden, gibt es hingegen keine einheitliche Definition [105, S.14].

3.2 Zielsetzungen von CLIL

Seit den Anfängen der Globalisierung hat sich Englisch dominierend als *lingua franca* in politischen, technologischen, wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Diskursen durchgesetzt [112, S.11] und gibt Bestrebungen zur Implementation von bilingualen Lernprogrammen zunehmende Relevanz, Notwendigkeit und Dringlichkeit. In Europa führten diese Bestrebungen zur ökonomischen Zusammenarbeit auch dazu, dass sich Englisch als eine der Leitsprachen durchsetzte [107, S.173]. Außerdem verfügte die Europäische Kommission 1978, dass mehr als eine Sprache im Schulunterricht als Unterrichtssprache eingesetzt werden könne. Im Jahr 2005 beschloss der Europäische Rat im Rahmen seines *Aktionsplans 2004-2006*, dass *Content and Language Integrated Learning* (CLIL) als Bildungsansatz in ganz Europa umgesetzt werden sollte [109, S.8]. Das theoretische Konzept wurde durch diese sprachpolitischen Entscheidungen zu einem etablierten pädagogischen Fundament, das europaweit implementiert, beforscht und erprobt wurde und es bis heute wird [111, S.18].

Mittlerweile sprechen Forschende auf europäischer Ebene sogar von einem regelrechten „CLIL boom“ [108, S.13] in der europäischen Bildungslandschaft.

¹¹³ **DACH:** Deutschland, Österreich und (deutschsprachige) Schweiz.

¹¹⁴ Immersionsprogramme werden in **Einweg-** [*engl. one-way immersion*] bzw. **Zweiwegimmersion** [*engl. two-way immersion*] unterschieden. Dabei verläuft die Alphabetisierung in beiden Sprachen parallel, meist schon in Grundschulalter. Je nach Form bildet bei der Einwegimmersion die L1 die Verkehrssprache des Landes und L2 die Fremdsprache bzw. bei der Zweiwegimmersion werden zwei verschiedene Herkunftssprachen unterrichtet [110, S.257-258].

Das CLIL-Konzept setzt auf europäischer Ebene den Rahmen für bilingualen Unterricht, um die Zielsetzung zu realisieren, Inhalt- und Sprachenlernen gleichberechtigt anzubahnen.

Die Umsetzung des CLIL-Konzeptes und die Verschränkung von Inhalts- und Sprachlernprozessen wird u.a. durch das von Coyle, Hood und Marsh etablierte *4Cs-Framework* beschrieben (siehe Abbildung 65).

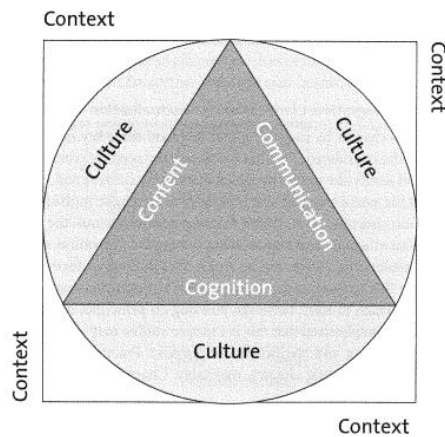


Abbildung 65. 4Cs Framework¹¹⁵

Es umfasst die vier Grunddimensionen *Content*, *Communication*, *Cognition* und *Culture*. Diese 4Cs stehen in Beziehung zueinander, ermöglichen eine Integration verschiedener Unterrichtsziele und bilden die Grundlage für bilinguale Lehr- und Lernprozesse. Es gilt als „Rahmenmodell“ [113, S.180] für die didaktische Ausgestaltung im BU. Im Modell werden die vier Dimensionen noch genauer ausdifferenziert. Die Inhalte des Sachfachs und anzustrebende Kompetenzen werden unter dem Begriff *Content* zusammengefasst. Diese werden meist durch Curricula bzw. Leitlinien des Sachfachs vorgegeben. Der Bereich Kommunikation [*engl. Communication*] beschäftigt sich mit der Nutzung der Sprache, dem Sprachenlernen und wie dies im BU erfolgreich implementiert werden kann. Eine Möglichkeit wäre z.B. mit komplexeren Lernaufgaben zu arbeiten. Die Entwicklung von Problemlösestrategien und die Aneignung von Wissen wird durch den Bereich *Cognition* repräsentiert. Hierbei können zur Ausbildung von Higher Order Thinking Skills (HOTS) z.B. Aufgabenstellungen mit Operatoren hilfreich sein (vgl. 3.4.1). Die letzte der 4-C-Dimensionen ist *Culture*. Bei dieser Dimension steht im Besonderen die Entwicklung von interkultureller Kompetenz und ein gezielter Perspektivwechsel im Vordergrund [109; S.40-41]. Im Unterricht könnte dies z.B. durch die Verwendung von authentischen Texten und die Kontrastierung kultureller Unterschiede und Gemeinsamkeiten erreicht werden.

Neben den 4-C-Dimensionen wird auch der Prozess des „Deep Learning“ [109, S.39], also vertiefter Lernprozesse, als zentrales Ziel von CLIL herausgestellt. Coyle und Marsh definieren dabei Deep Learning wie folgt:

„Deep Learning involves the critical analysis of new ideas, connecting them to already-known concepts, and leads to understanding and long-term retention of those concepts so that they can be used for problem solving in unfamiliar contexts.“ [109, S.39]

¹¹⁵ Abbildung 4Cs-Framework: [109, S.41].

Durch eine konsequente Anwendung des 4Cs-Framework, können Deep Learning-Prozesse angebahnt und unterstützt werden. Mit vertieften Lernprozessen sind Lernende in der Lage, bereits vorhandenes Wissen auf andere Kontexte zu übertragen und zu vernetzen [114, S.3].

Das 4Cs-Framework gilt als etablierte Grundlage für pädagogisches Überlegungen und CLIL-Unterrichtsplanung. Es wird von vielen Lehrkräften für ihre bilinguale Unterrichtsplanung ein- und umgesetzt (vgl. 4.3.1).

Daran anknüpfend haben Meyer und Doyle erstmals 2015 den Ansatz des Pluriliteralen Lernens [*engl. Pluriliteracies Approach*] vorgestellt, der als Weiterentwicklung des 4Cs-Modell gilt. Dabei wird versucht, die Unschärfen des 4C-Modells zu überwinden und Möglichkeiten aufzuzeigen, wie eine Konzeptualisierung der 4C-Dimensionen und deren Interdependenzen, sowie die Integration von Inhalts- und Sachfachlernen genauer ausgestaltet werden kann. CLIL als Konzept soll durch das Modell einen pluriliteralen Rahmen erhalten [115, S.51-52]. In ihrem Werk *Beyond CLIL* aus dem Jahr 2021 beschreiben die Autoren den Begriff Pluriliteracies als eine Summe der drei Faktoren: Aufbau einer Fachliteralität in mehreren Sprachen, Aufbau von vertieften Wissensstrukturen in allen Fächern und die Fähigkeit der Vermittlung und Kommunikation von erlangtem Wissen sowohl sprach- als auch kulturübergreifend [115, S.41-42]. Aus diesen Zielformulierungen erwächst der pädagogische Ansatz *Pluriliteracies Teaching for Deeper Learning (PTDL)*. Die dabei angestrebten vertieften Lernprozesse fokussieren sich nicht nur auf reines Inhaltslernen, sondern integrieren neben dem Faktenwissen [*engl. facts*], Konzepten des Faches [*engl. concepts*] auch Arbeitsmethoden [*engl. procedures*] und fachspezifische Strategien [*engl. strategies*]. Diese sind auf der y-Achse links im Pluriliteracy Model (vgl. Abbildung 66) aufgetragen.

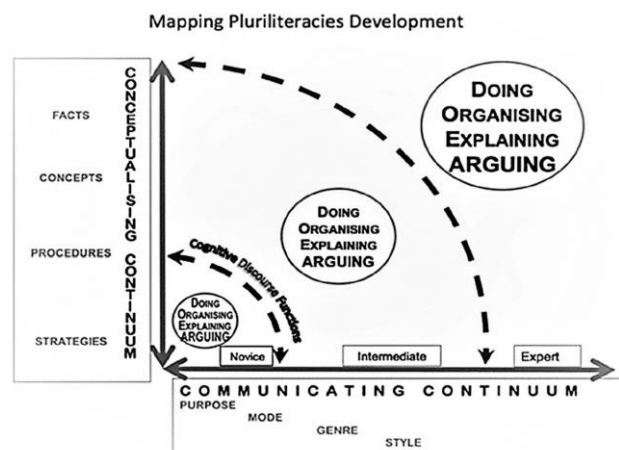


Abbildung 66. Pluriliteracies Modell¹¹⁶

Lehrkräfte können diese intendierten, vertieften Lernprozesse durch fünf Prinzipien initiieren [114, S.6-16]:

- Denken und Planen in Progressionen
- Lernerzentriertheit
- Versprachlichung als Schlüssel für vertieftes Verstehen
- Einbettung in Fachkultur
- ganzheitliches Scaffolding.

¹¹⁶ Abbildung Pluriliteracies Modell: [116, S.195].

Um Lernende erfolgreich auf ihrem Lernweg zu begleiten ist das Planen und Denken in Progressionen essentiell. Durch den Pluriliteracies Ansatz sollen sich so viele Lernende wie möglich beteiligen können. Dazu werden vier verschiedene Handlungsfelder vorgestellt, die dies realisieren sollen (in Modell mittig in Kreis dargestellt). Zu Beginn steht das fachliche Handeln [*engl. doing*], welches z.B. die Handlungsorientierung im Chemieunterricht (siehe 3.7.2) beschreibt. Ein weiteres Handlungsfeld ist die Organisation fachlicher Inhalte [*engl. organising*]. Es beinhaltet die Beschreibung und das Verständnis von Fachinhalten. Die Erläuterung von fachlichen Zusammenhängen wird dem Handlungsfeld Erklären [*engl. explaining*] zugeschrieben. Das letzte Handlungsfeld fokussiert die Bewertung und Beurteilung [*engl. arguing*] von Fachinhalten. Dazu zählt z.B. die Fähigkeit, über ein fachliches Thema zu diskutieren oder Argumente vorzubringen [117, S.46-47]. Dies ist vergleichbar mit der im Chemieunterricht angestrebten Bewertungskompetenz (siehe 3.6.1).

Der Ansatz ist lernerzentriert und auf eine entsprechende Progression der Lernenden ausgerichtet. In Abbildung 66 ist dies mittig durch die Begriffe Anfänger [*engl. novice*], Fortgeschrittener [*engl. intermediate*] und Experte [*engl. expert*] visualisiert. Die Fähigkeit zur Versprachlichung wird auf der x-Achse dargestellt. Diese wird durch den Einsatz von "Diskursfunktionen", die den in Deutschland etablierten Operatoren ähneln, erleichtert [114, S.10-11]. Das Prinzip der Einbettung in die Fachkultur, beschreibt die Fähigkeit von Lernenden, Informationen aus fachspezifischen Texten und Darstellungsformen zu entnehmen bzw. Wissen mit passenden Darstellungsformen darzustellen. Für den Chemieunterricht könnte dies z.B. das Verständnis von Versuchsanleitungen und die Strukturierung von Wissen mit Hilfe von Concept Maps sein (siehe 3.7.2). Darüber hinaus sollte ein Pluriliteracy-Lernsetting Konzepte des ganzheitlichen Scaffolding beinhalten, das an die kognitiven Voraussetzungen der Lernenden angepasst ist.

In Deutschland werden die Zielsetzungen von Bilinguaem Unterricht durch die Vorgaben der Kultusministerkonferenz (KMK) festgelegt, die sich am CLIL-Ansatz orientieren. In deren Bericht *Konzepte für den bilingualen Unterricht* dem Jahr 2013 wird explizit die Zielsetzung eines „[...] Aufbau[s] sachfachlicher Kompetenz, die eine fachliche Diskurskompetenz in zwei Sprachen beinhaltet [...]“ [118, S.7] formuliert. Angelehnt an diesen Bericht und das 4C-Modell, beschreiben Diehr und Rumlich die vier Zielkompetenzen von bilinguaem Unterricht in Deutschland [119, S.7]:

- Kulturelles Lernen
- Sprachenvielfalt
- Fachliches Lernen
- Sprachliches Lernen

Darüber hinaus beschreiben sie in ihrem Artikel das große Potential von BU, welcher einen Beitrag zu Prozessen wie der mehrsprachigen Erziehung und fächerübergreifenden Lernen im Sinne der Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) leisten kann [119, S.5]. Dabei sollten noch vier weitere Zielkompetenzen, die Förderung von Mehrperspektivität, die Integration von sprachlichem und fachlichem Lernen, die bewussten Entscheidungen für funktionale Sprachwechsel und die Angebote zur kognitiven Aktivierung und gründliche Verarbeitung von Inhalten verfolgt werden [119, S.6-7].

3.3 Didaktische Rahmenkonzepte und Modelle

Auf Grund der Vielzahl der Umsetzungsformen und theoretischen Konzepte zum Bilingualen Unterricht, von denen nur ein Bruchteil in 3.2 erwähnt wurde, gestaltet sich die Etablierung einer ganzheitlichen Didaktik für den BU als sehr herausfordernd. Einige Forschende argumentieren, dass es keine „universelle Bilingualdidaktik“ geben kann, weil die Sachfächer die Richtlinien für den bilingualen Unterricht vorgeben und dadurch eine „Vielfalt der Didaktiken des bilingualen Lehrens und Lernens“ existiert [119, S.6]. Bisher gibt es keine einheitlichen didaktischen Grundlagen, da sowohl Elemente aus der Sachfachdidaktik als auch aus der Fremdsprachendidaktik einfließen [118, S.7]. Dies entspricht auch den Grundideen von CLIL, worin keine allgemeingültige Einzeldidaktik propagiert wird, sondern ein Zusammenspiel mehrerer sprachunterstützender Ansätze [109, S.3,12,86].

Diese Ausgangssituation mit fehlenden klaren didaktischen Prinzipien oder Richtlinien [120, S.174] führt zu einer gewissen Unübersichtlichkeit bzw. einer Koexistenz von verschiedenen Modellen [121, S.211]. Exemplarisch werden deshalb in dieser Arbeit einige didaktische Konzepte herausgegriffen, die an die in Kapitel 3.2 beschriebenen Zielsetzungen anknüpfen und für das entwickelte Schülerlaborangebot relevant sind.

Aufbauend auf dem 4Cs-Modell, haben Mehisto, Marsh und Frigols sechs zentrale Merkmale der CLIL Methodik definiert [122, S.29]:

1. Vielfältige Schwerpunkte [*engl. Multiple focus*]
2. sichere und bereichernde Lernumgebung [*engl. Safe and enriching learning environments*]
3. Authentizität [*engl. Authenticity*]
4. Aktive Lernzeit [*engl. Active learning*]
5. Unterstützungsmaßnahmen [*engl. Scaffolding*]
6. Zusammenarbeit [*engl. Co-operation*]

Zum ersten Prinzip der vielfältigen Schwerpunkte zählen die Autoren, dass die Förderung von Sprachenlernen im Sachunterricht, die Förderung von Inhaltslernen im Sprachunterricht sowie die Integration verschiedener Fächer in erfolgreichem BU beinhaltet sein sollte. Lernen sollte idealerweise projektbasiert oder mit fächerübergreifenden Themen organisiert sein. Weiterhin sollte die Reflexion der Lernprozesse unterstützt werden. Dies entspricht auch den Vorgaben für Bildung für nachhaltige Entwicklung (vgl. 4.1.1). Ein weiteres Merkmal sind sichere und bereichernde Lernumgebungen. Die Rahmenbedingen dafür zu etablieren ist Aufgabe der Lehrkraft, indem z.B. der Klassenraum ansprechend gestaltet, Routinen etabliert und eine offene Feedback- und Fehlerkultur gelebt wird. Daran schließt sich das Merkmal der Authentizität an. Dieses kann z.B. durch den Zugang zu authentischen Lernmaterialien und -medien realisiert werden. Lerninhalte sollten an die Alltagswelt der Lernenden und deren Interessen anknüpfen. Darüber hinaus sollten Schülerinnen und Schüler die Möglichkeit haben, nach sprachlichen Hilfestellungen zu fragen, sofern sie diese benötigen. Zur Förderung der aktiven Lernzeit werden kooperative Arbeitsformen mit hohem eigenen Sprechanteil der Lernenden favorisiert. Die Lehrkraft agiert als Prozessbegleitung. Lehrkräfte können Lernende außerdem durch Scaffolding gezielt unterstützen.

Dies kann realisiert werden, indem sie verschiedene Lernertypen in den Blick nehmen, Informationen lernergerecht aufbereiten, kreatives und kritisches Denken fördern, an das Vorwissen anknüpfen und Schülerinnen und Schüler herausfordern.

Dieses Konzept wird z.B. auch im *Pluriliteracies Approach* als relevant angesehen (vgl. 3.2). Die Merkmale 1-5 bilden außerdem auch Überschneidungspunkte mit den didaktischen Grundprinzipien des bilingualen Chemieunterrichts (vgl. 3.6.2). Das letzte didaktische Merkmal der Zusammenarbeit richtet sich besonders an ein schulisches Umfeld. Hier soll die Kooperation mit CLIL- und nicht-CLIL Lehrkräften bei der Stundenplanung, sowie eine enge Zusammenarbeit mit Erziehungsberechtigten und externen Partnern ermöglicht werden.

Um eine Verbindung zwischen den sprachlichen und inhaltlichen Lernzielen herzustellen und die geschilderten didaktischen Prinzipien umzusetzen, wurde das Modell des *The Language Triptych* zur Planung von Lernumgebungen eingeführt. Es bezieht sich im Besonderen auf den im 4Cs-Modell erwähnten Bereich der Communication und wird als pädagogisches Werkzeug (vgl. 4.2.4) zur Planung von BU eingesetzt [109, S.36]. In einem Dreieck sind die drei Perspektiven dargestellt, die in gegenseitiger Wechselbeziehung zueinander stehen. Zu den Perspektiven zählen die Language of learning, Language for learning und Language through learning (siehe Abbildung 67). Lehrkräfte sollten bei der Planung von BU die sprachlichen Anforderungen für Lernende analysieren, um mögliche sprachlichen Hürden zu identifizieren. Die Analyse der benötigten sprachlichen Mittel zur Bewältigung des fachlichen Themas wird als Language of Learning bezeichnet. Dabei müssen die Lehrkräfte die sprachlichen Anforderungen wie z.B. Fachbegrifflichkeiten, die der Fachinhalt beinhaltet, antizipieren. Die Language for Learning bezieht sich auf sprachliche Voraussetzungen, die Lernende benötigen, um eine Aufgabe zu bewältigen oder einen Lernprozess erfolgreich abzuschließen. Dies könnte z.B. Vokabular zur Beschreibung eines Graphen oder eines Diagramms sein. Gezielt eingesetztes Scaffolding kann hilfreich sein, um sprachliche etwaige Herausforderungen zu reduzieren. Die Language through learning kann von den Lehrpersonen nur bedingt antizipiert werden. Diese dritte Kategorie des Language Triptych, bezeichnet die Sprache, die durch und während des Lernprozesses der einzelnen Lernenden benötigt wird. Dies können z.B. Redemittel zur Formulierung von Antworten oder im Gespräch aufkommenden Fragen der Lernenden nach unbekannten Ausdrücken sein. Findet eine genaue Evaluation dieser sprachlichen Anforderungen statt, können die kognitiven Herausforderungen für die Lernenden besser eingeschätzt und von der Lehrperson durch weitere passende Scaffolding-Maßnahmen reduziert werden.

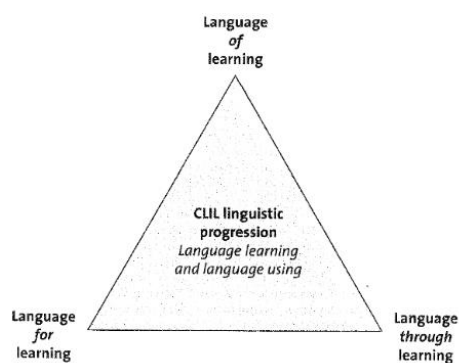


Abbildung 67. The Language Triptych¹¹⁷

¹¹⁷ Abbildung Language Triptych: [109, S.36].

Im deutschsprachigen Raum hat sich mit einem sachfachlichen naturwissenschaftlichen Blickwinkel das *Bilingual Triangle* von Hallet als didaktisches Grundgerüst etabliert [123, S.206]. In dem Model werden die Inhalte und Ziele des BU in drei Zieldimensionen dargestellt (vgl. Abbildung 68). Die erste Dimension fokussiert die Muttersprache (L1). Die Lernenden sollen in der Lage sein, über ihre eigene Lebensrealität zu sprechen. Die zweite Dimension nimmt die Perspektive der Fremdsprache (L2) ein. In diesem Zielfeld sollen Lernende über zielkulturelle und -sprachliche Aspekte kommunizieren. Die dritte Dimension verbindet L1 und L2, indem die Lernenden in der Lage sein sollen, sich über globale Phänomene wie z.B. den Klimawandel mehrperspektivisch und kulturübergreifend zu äußern. Wenn all diese Zieldimensionen in den Blick genommen werden, ermöglicht dies auch einen Perspektivwechsel, der im Rahmen der interkulturellen Kompetenz von CLIL gefordert wird (vgl. 3.2). Folglich können mit dem Bilingual Triangle grundlegende Planungsüberlegungen für Lernsettings, sowie die Evaluation und Erstellung von geeignetem Lernmaterial vorgenommen werden [124, S.25]. In neueren Publikationen wird das von Hallet angenommene statische und limitierende Konzept von Kultur als kritisch betrachtet [125, S.198]. Nichtsdestotrotz gilt es immer noch als Grundlage für die Planung von bilinguaem, naturwissenschaftlichen Sachfachunterricht (vgl. 3.6.2).

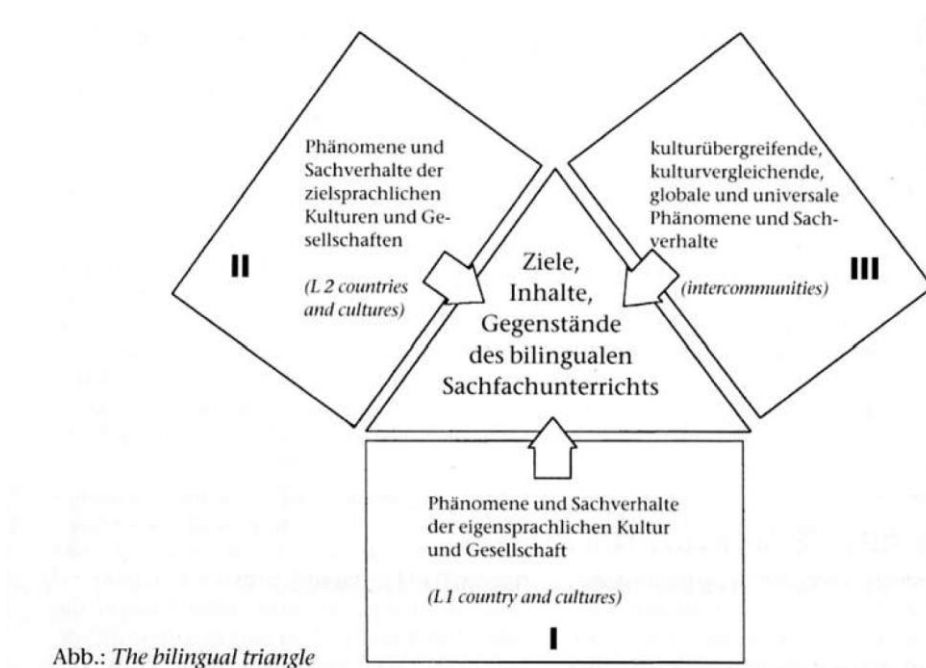


Abb.: The bilingual triangle

Abbildung 68. The Bilingual Triangle¹¹⁸

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich die bilinguale Didaktik bisher meist an den Leitlinien und methodischen Ansätzen des Sachfachs orientiert. Ein sachfachspezifischer Sprachfokus wird dann angewendet, wenn dieser benötigt wird. In den letzten Jahren hat außerdem der sprachensible Unterricht immer mehr an Bedeutung gewonnen und auch den bilingualen Unterricht geprägt. Die in diesem Zusammenhang von Leisen entwickelten Methodenwerkzeuge, können als Chance für die nicht-sprachlichen Fächer, als auch für den bilingualen Unterricht gesehen werden, um eine Weiterentwicklung in Richtung eines mehrsprachigen Unterrichts anzustoßen [104, S.24-32].

¹¹⁸ Abbildung The Bilingual Triangle [124, S.26].

3.4 CLIL-Lehrstrategien

Im BU werden eine Vielzahl von Zielen (vgl. 3.2) und auch verschiedene Lehr- und Lernstrategien verfolgt. In diesem Teilkapitel wird exemplarisch auf die Rolle von Inhalts- und Sprachenlernen (vgl. 3.4.1) und dessen methodische Realisierung, sowie auf die Frage nach dem Einsatz der Verkehrssprache (L1)¹¹⁹ (vgl. 3.4.2) im BU eingegangen. Schilderungen zur Unterrichtsplanung und Kriterien für die Material- und Aufgabengestaltung werden in Kapitel 4.3.1 und 4.5 angesprochen.

3.4.1 Sprachen- und Inhaltslernen

Eine der zentralen Herausforderungen im BU ist das parallele Anbahnen von Sprachen- und Inhaltslernen. Lehrende müssen als sprachliche Vermittler [*engl. language mediators*] [120, S.71] agieren, um den Lernenden beide Bereiche näher zu bringen. Da die Sprache als Mittel der Kommunikation dient, muss diese bei der Unterrichtsplanung berücksichtigt werden, um eventuell auftretende sprachliche Probleme zu erkennen bzw. vorzuentlasten. Dabei ist der BU kein erweiterter Fremdsprachenunterricht, aber verlangt nach sprachlichen Übungsgelegenheiten [16, S.187]. Ebenso wie auch im regulären Fachunterricht, muss die (Fach)sprache Berücksichtigung finden bzw. neu angebahnt werden.

Sprachenlernen

Im Gegensatz zum Fremdsprachenunterricht wird Sprache im bilingualen Unterricht hauptsächlich als Vehikel der Kommunikation genutzt und ist nicht zentraler Unterrichtsgegenstand. Dabei sollten Sprachverwendung und Sprachenlernen gleichberechtigt als Ziel verfolgt werden [109, S.33]. Dafür müssen die sprachlichen Voraussetzungen in L1 und L2 und in Alltags- und Bildungssprache vorhanden sein, damit bilinguale Lernsettings gelingen können und nicht zu Frustrationserleben bei den Lernenden führen. Grundlage für diese sprachlichen Kompetenzen sind *Basic Interpersonal Communicative Skills (BICS)*, informelle Alltagssprache und *Cognitive Academic Language Proficiency (CALP)*, die Bildungs- bzw. Fachsprache [16, S.187].

Im deutschsprachigen Bereich werden die verschiedenen "Sprachen" des Unterrichts noch genauer ausdifferenziert (exemplarisch vgl. Abbildung 69).

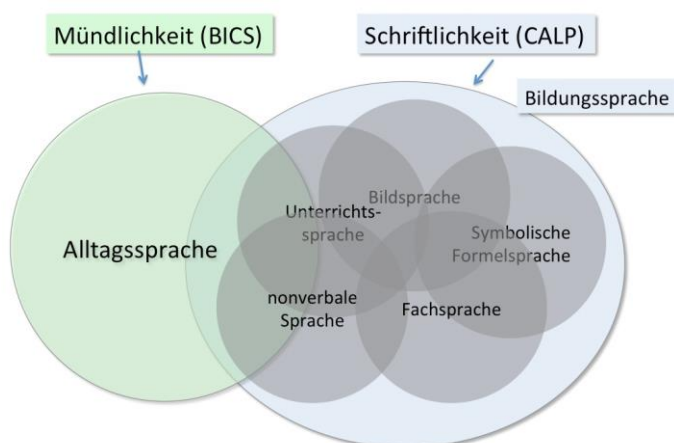


Abbildung 69. Alltags- und Bildungssprache¹²⁰

¹¹⁹ Im Folgetext wird die im Unterricht verwendete Sprache als L1 - Verkehrssprache bezeichnet. Ist mit L1 die Muttersprache der Sprechenden gemeint, wird dies explizit erwähnt.

¹²⁰ Abbildung Alltags- und Bildungssprache nach Josef Leisen: <http://www.sprachsensiblerfachunterricht.de/sprachbildung> (letzter Zugriff 11.11.24).

Je länger Lernende an BU teilnehmen, desto mehr können die Kompetenzen im Bereich Bildungs- und Fachsprache sowohl in der L1 als auch in der L2 zunehmen. Die informelle Alltagssprache nimmt einen immer geringeren Stellenwert ein [120, S.101]. Die Schülerinnen und Schüler erlangen die Fähigkeit in unterschiedlichen Registern zu kommunizieren und gezielt zwischen Alltags- und Fachsprache auszuwählen [127, S.166]. Dieser sprachliche Kompetenzerwerb ist dabei kein Automatismus und muss begleitet, angeleitet und unterstützt werden [128, S.45-46].

Die Verwendung der Bildungssprache kann fächerübergreifend gefördert werden. Ein gezielter Einsatz von Formulierungshilfen und Satzgeräten kann helfen, den Gebrauch angemessener Bildungssprache bei den Lernenden zu verstärken. Auch geschlossene Aufgabenformate wie der Einsatz von Lückentexten oder das Zuordnen [*engl. matching*] von Satzteilen, können Schülerinnen und Schüler mit dem Gebrauch von Bildungssprache vertraut machen [120, S.112]. Zur besonderen Förderung des Fachwortschatzes eignet sich die Hervorhebung von Begrifflichkeiten in Texten und deren Erläuterung in Merksätzen oder Definitionen. Grafische Werkzeuge wie Mind Maps und Concept Maps eignen sich als Merkhilfe für Fachbegriffe. Darüber hinaus können die Begrifflichkeiten z.B. durch gezieltes Zuordnen zu Definitionen, Bildern, Überschriften, Absätzen besser eingeprägt werden [120, S.76, 111-115]. Um die sprachlichen Bedarfe der Lernenden zu antizipieren kann das in 3.3 beschriebene Modell des Language Triptych verwendet werden.

Inhaltslernen

Eine kognitive Involvierung der Lernenden kann zu effektiven Lernprozessen führen. Faktenwissen, prozedurales Wissen, metakognitives und konzeptionelles Wissen sind Teile dieser kognitiven Prozesse. Darüber hinaus können kognitive Prozesse mit Hilfe von *lower-order thinking skills (LOTS)* und *higher order thinking skills (HOTS)* realisiert werden [109, S.31]. Zu LOTS zählen Aufgaben mit Operatoren wie z.B. verstehen, anwenden und erinnern. HOTS beziehen sich auf Aufgaben, die die Analyse, die Evaluation und die Erstellung von Lernprodukten fokussieren¹²¹.

Da im BU fachinhaltliche Zusammenhänge vermittelt werden, ist eine genaue Sequenzplanung essentiell, um das Gelingen von Inhaltslernen zu gewährleisten [120, S.32-33]. Die Verwendung von offenen Lernformen, sowie schülerorientierten Sozialformen, kann zusätzlich eine aktive Auseinandersetzung mit den Inhalten realisieren und eine kognitive Aktivierung bestärken [109, S.29]. Um die passenden Inhalte des Sachfachs für ein Lernarrangement zu auswählen, können Lehrkräfte Halletts Bilingual Triangle (vgl. 3.3) oder die Planungsmindmap des 4Cs-Modells [109, S.53-65,79] nutzen (siehe 4.3.1).

Duales Scaffolding

Um Sprachen- und Inhaltslernprozesse parallel anzubahnen, müssen Lernende auf diesem Weg gezielt unterstützt werden. In der Literatur hat sich dazu der Begriff des *Scaffoldings* bzw. *Dual Scaffoldings* etabliert [125, S.336-337]. Dabei wird es entweder als Unterrichtsmethode oder Strategie der Instruktion, in Form einer Hilfestellung verstanden.

¹²¹ In der deutschen Bildungslandschaft gibt es anstatt LOTS und HOTS fachspezifische Operatoren, die z.B. auch zur Konzeption des Zentralabiturs genutzt werden. Diese sind drei verschiedenen Anforderungsbereichen (AfB) zugeordnet. Aufsteigend von I-III nehmen die Anforderungen an die Lernenden zu. AfB I enthält meist rein reproduktive Aufgaben, AfB II Aufgaben zur Reorganisation und AfB III beinhaltet Transfer- und Problemlöseaufgaben [129, S.1-4].

Für CLIL kann es sprachliche und inhaltliche Kontraste überbrücken und helfen, beide Lernprozesse zu integrieren und zu unterstützen. Sprachliche Scaffolds sind z.B. die Bereitstellung von Vokabular und Phrasen oder der gezielte Einsatz der Verkehrssprache. Inhaltliche Scaffolds können z.B. die Verwendung von Visualisierungen oder der Bezug auf das Vorwissen der Lernenden sein [113, S.286-287, 289-290]. In Abbildung 70 ist Scaffolding in den CLIL-Lernkontext eingebettet. Es bietet den Lernenden eine Unterstützung, um den sprachlich authentischen Fachinhalt [*engl. input*] besser aufzunehmen und mit Hilfe von passenden Aufgabenstellungen [*engl. tasks*] zu verstehen und zu versprachlichen [*engl. output*].

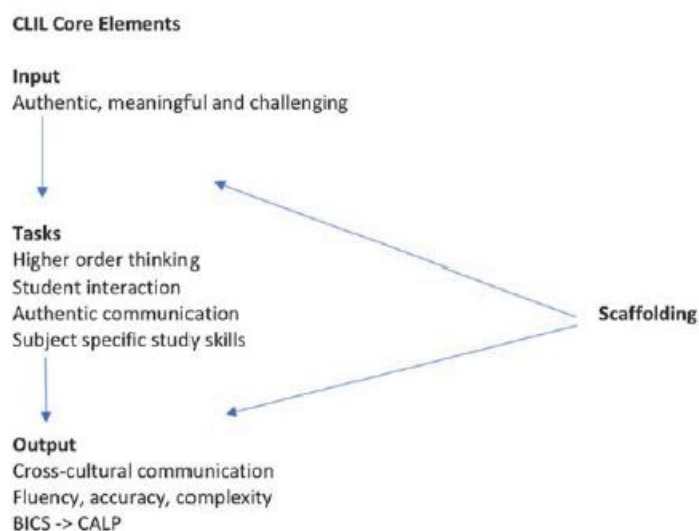


Abbildung 70. Scaffolding und CLIL¹²²

Scaffolding kann durch die Lehrkraft, andere Lernende, strukturierte Aufgabenstellungen oder in Arbeitsmaterialien umgesetzt werden. Es bietet temporäre Hilfestellungen, die die Lernenden in Anspruch nehmen können, um den eigenen Verstehensprozess zu gestalten. Dies kann sich im mündlichen Diskurs z.B. auch in Form von *prompting*¹²³ oder *code-switching*¹²⁴ manifestieren [122, S.139-141]. Durch die Schaffung von authentischen Sprachanlässen können so Lernsituationen geschaffen werden, die von den Lernenden zu bewältigen sind. Die Konzeption von passenden Lernmaterialien und Aufgabenstellungen, kann mit Hilfe des Wechsels von Darstellungsformen und des Einsatzes von Methodenwerkzeugen wie z.B. einem Flussdiagramm oder einem Wortgeländer realisiert werden [131, S.45-46]. Sind die Lernenden in der Lage, die konzipierten Aufgaben eigenständig zu bearbeiten, kann das Scaffold schrittweise reduziert oder gänzlich darauf verzichtet werden [132, S.144].

3.4.2 Die Rolle der Verkehrssprache (L1)

Besonders im deutschsprachigen Raum bleibt ein Streitpunkt, welche Rolle die Verkehrssprache (L1) im BU einnehmen und in welchem Verhältnis L1 und L2 in bilingualen Programmen eingesetzt werden sollen [113, S.12]. Die traditionelle Ansicht eines einsprachigen Unterrichts in der Fremdsprache wird von den meisten Forschenden als widerlegt wahrgenommen.

¹²² Abbildung Scaffolding und CLIL [113, S.296].

¹²³ **prompting:** kurze, meist verbale sprachliche Unterstützung durch die Lehrperson in Form von Wort- oder Phrasenhilfen. Sie ermöglichen es den Lernenden einen Redebeitrag zu formulieren oder eine Aufgabe weiterzubearbeiten.

¹²⁴ **code-switching:** meint meist die freie Verwendung von L1 und L2 und einen flexiblen Wechsel zwischen den Sprachen in Gesprächssituationen mit bilingual Sprechenden [130, S.121].

Es lässt sich folglich festhalten, dass im Angesicht von Globalisierungsentwicklungen und zunehmender sprachlicher Heterogenität der Lernenden, ein Fachunterricht, der ausschließlich in der Fremdsprache stattfindet, nicht mehr den lebensweltlichen Realitäten entspricht [133, S.27-28].

Nimmt man den Bericht „Konzepte für den bilingualen Unterricht – Erfahrungsbericht und Vorschläge zur Weiterentwicklung“ der Kultusministerkonferenz aus dem Jahr 2013 zum BU als Orientierungshilfe, wird dort explizit die Ausbildung einer Sachfachkompetenz in zwei Sprachen als Zielformulierung festgehalten. So heißt es dort: „Genuiner Bestandteil des bilingualen Unterrichts ist die Zweisprachigkeit und gilt als eigener Mehrwert [118, S.8]“. Darüber hinaus wird die integrative Nutzung von Kompetenzen in L1 und L2 als Teil des Lernprozesses definiert. Wie genau dies jedoch im Regelunterricht oder außerschulischen Lernorten umgesetzt werden soll, bleibt weitestgehend offen [118, S.6].

Doppelte Sachfachliteralität

Der BU soll die Lernenden zu einer „doppelte Sachfachliteralität“ [133, S.28] in der L1 und L2 befähigen. Dies ist jedoch mit einigen Herausforderungen verbunden. Die bisherige Annahme, dass die Fachsprache in der Verkehrssprache beiläufig bei einer Erteilung des Unterrichts in der L2 mitgelernt werde, indem z.B. Übersetzungen durchgeführt werden, gilt in der Forschung als empirisch nicht belegt [119, S.8-9]. Es hat sich in Studien gezeigt, dass Lernende, die nur in der L2 unterrichtet wurden, große Probleme hatten, sich bildungs- und fachsprachlich in der L1 auszudrücken. Fachsprache und Konzepte konnten nicht mühelos von der einen in die andere Sprache übertragen werden [134]. Konzepte müssen in beiden Sprachen im bilingualen mentalen Lexikon der Lernenden aufgebaut werden. Dazu gibt es verschiedene theoretische Modelle.

Im Folgetext wird im Besonderen auf das im deutschsprachigen Raum entwickelte Integrated Dynamic Model (IDM) von Diehr eingegangen (vgl. Abbildung 71). Es beschreibt den Kompetenzerwerb bei bilingualen Lernprozessen. Grundlegend wird zwischen L1 und L2-Sprachspeichern unterschieden. Die gestrichelten Linien symbolisieren, dass sich die Größe der Speicher im Verlauf des Lernprozesses verändern kann. Die beiden Sprachspeicher enthalten Elemente der Alltags- und Fachsprache (vergleichbar mit den in 3.4.1 erwähnten BICS und CALP). Im bilingualen Unterricht wird dominierend das Fachvokabular in der L2 ausgebildet. Dieses fehlt in der L1 (durch einen helleren Pfeil von rechts nach links in der Abbildung dargestellt), sofern es nicht explizit im Unterricht thematisiert wird. Neben den Sprachspeichern werden im IDM-Modell auch L1- und L2-Konzepte als Speicher dargestellt. In diesen Speichern sind vier verschiedene Äquivalenzen repräsentiert. In beiden Sprachen existieren Begrifflichkeiten, die entweder vollständig oder partiell äquivalent sind, unabhängig davon, in welcher Sprache sie im BU eingeführt werden. Missverständnisse entstehen bei Lernenden besonders bei Nicht-Äquivalenzen [engl. *false friends*¹²⁵] und fehlenden Äquivalenzen, bei denen ein Konzept in der anderen Sprache vollständig fehlt [135, S.70-73].

¹²⁵ **False friends:** Worte, die in der englischen und deutschen Sprache gleich geschrieben bzw. gleich ausgesprochen werden, aber unterschiedliche Bedeutungen haben, z.B. deutsch: sensibel, englisch false friend: sensible (vernünftig, sinnvoll), englisch richtig: sensitive.

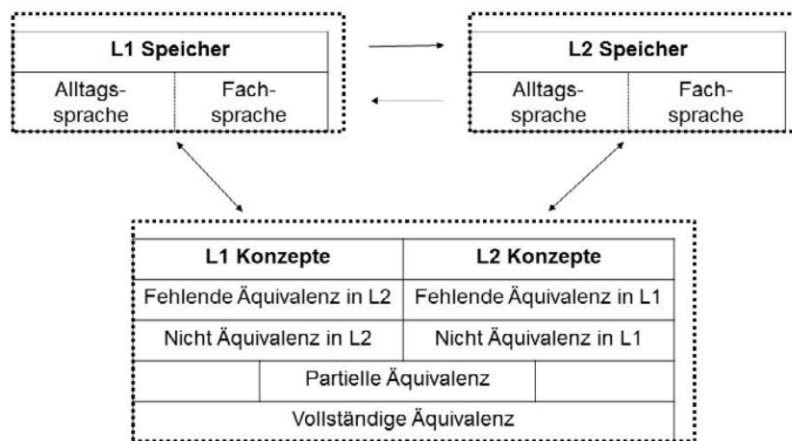


Abbildung 71. Integrated Dynamic Model (IDM) des mentalen Lexikons bilingualer Lernender¹²⁶

Welche Auswirkungen dieses theoretische Modell auf die Sprachverwendung im BU hat und welche Schlussfolgerungen daraus gezogen werden können, ist noch nicht umfassend empirisch belegt [135, S.73]. In einigen Studien zeigt sich, dass bestimmte Sprachwechsel mehr Lernzeit in Anspruch nehmen und mit Sprachwechselkosten [engl. *language switching costs*] wie z.B. einer höheren Fehlerquote einhergehen. Vollmer et. al. hat dies in seiner Studie aus dem Jahr 2018 festgestellt, wobei der Sprachwechsel von L1 nach L2 für Lernende mit besonderen Herausforderungen verbunden war [136]. Auch Rinsfeld et.al. fanden heraus, dass die Aktivierung von Inhalten in der Fremdsprache, länger benötigt, wenn diese zuvor in der L1 erlernt wurden [137]. Eine Begründung dafür könnte sein, dass besonders Sprachwechsel von L1 auf L2 im FU und BU wenig eingeübt werden und für die Lernenden ungewohnt ist. Ganz im Gegensatz zu bekannten Aufgabenformaten wie z.B. Mediationsaufgaben, die meistens einen Sprachwechsel von L2 auf L1 vorsehen. Diese Hürden müssen bei geplanten Sprachwechseln beachtet und von Lehrkräften durch die Bereitstellung von geeigneten Scaffolding-Materialien abgeschwächt werden.

Die von der KMK geforderte Zweisprachigkeit scheint folglich nur erreichbar zu sein, wenn diese in Unterrichtsarrangements berücksichtigt wird. Diehr schlägt deshalb zur Systematisierung von bilingualen Unterricht eine Typologisierung von A-C vor. Typ A beschränkt sich allein auf eine Erschließung von Inhalten durch die Fremdsprache. Bei Typ B wird die L1 als Unterstützungsmaßnahme einbezogen und punktuell eingesetzt, die Fremdsprache bleibt jedoch dominant. In Typ C Lernsettings werden beide Sprachen verwendet und kontrastiv betrachtet [133, S.23-27]. Die Lernenden nehmen L1 und L2 als gleichberechtigte Unterrichtssprachen wahr und sind in der Lage, sich in beiden Sprachen fachsprachlich auszudrücken und an Diskursen zu beteiligen. Neben kontrastiven Betrachtungen der beiden Sprachen, sollten didaktisch geplante Sprachwechsel eingesetzt werden, die so eine Anbahnung der doppelten Sachfachliteralität ermöglichen.

Diehr betont jedoch, dass die vorgeschlagene Systematisierung noch weiterentwickelt und durch andere Formen ausdifferenziert werden kann. Sie dient als Orientierungs- und Entscheidungshilfe für die Umsetzung von verschiedenen Formen von BU [119, S.8].

Eine Anbahnung der Zweisprachigkeit wird in der deutschen Schulpraxis laut Umfragen bisher noch nicht realisiert. So scheinen viele Lehrkräfte im BU den Unterrichtstyp B zu präferieren [105, S.21].

¹²⁶ Abbildung IDM-Modell nach Diehr [135, S.71].

In Gesprächen begründen viele Lehrkräfte dies mit den zentralisierten Abiturprüfungen, die Lernende mit Aufgabenstellungen und Materialien in der L2 konfrontieren und ausschließlich englischsprachige Lernprodukte einfordern. Je länger die Lernenden bilingual unterrichtet werden, desto mehr steht der monolinguale, englischsprachige Unterricht im Vordergrund [138, S.74-75]. Die deutsche Sprache spielt kaum eine bis gar keine Rolle. Darüber hinaus findet sich die gleichberechtigte Verwendung von beiden Sprachen, sowie deren kontrastive Betrachtung bisher auch nicht in den etablierten Lehrwerken und Unterrichtsmaterialien wieder [139, S. 285–286].

Sprachwechsel im BU

Sprachwechsel sind Teil des natürlichen Sprachgebrauchs von bilingualen Sprechenden. In diesem Zusammenhang werden international oft die Begriffe *code-switching* (vgl. 3.4.1) und *translanguaging*¹²⁷ für Sprachwechsel verwendet. Für den deutschsprachigen BU haben sich *funktionale Sprachwechsel* als Begrifflichkeit etabliert. Sie werden dabei klar von Sprachwechseln im Fremdsprachenunterricht und im natürlichen Bilingualismus abgegrenzt. Im BU gibt es geplante und ungeplante Sprachwechsel, die unsystematisch oder systematisch, reflektiert oder unreflektiert sein können. Dabei werden unterschiedliche Zielsetzungen verfolgt z.B. als Unterstützung oder Herausforderung für die Lernenden [140, S.91-92]. Tabelle 13 fasst die verschiedenen Funktionen der Sprachwechsel im BU zusammen.

Tabelle 13. Funktionen von Sprachwechseln im BU¹²⁸

Kognitive Funktion	Kommunikative Funktion	Zeitökonomische Funktion	Affektive Funktion	Pädagogische Funktion
Erwerb von Fachkonzepten (partielle und fehlende Konzeptäquivalenz)	Erwerb von Fachbegriffen und Fachsprache in zwei Sprachen	Unterrichtsorganisation (z.B. Erläuterung von Hausaufgaben)	Ermöglichung eines emotionalen Zugangs zu einem Thema	Einsatz erzieherischer Maßnahmen
Aufbau von kulturbewusster Mehrperspektivität	Überwindung fremdsprachlicher Herausforderungen (z.B. Bereitstellung L1- Äquivalent)	Überwindung zeitlicher Engpässe	Lernende trösten, ermuntern, bestärken	
Überwindung inhaltlicher Herausforderungen	Zur Verständnis-sicherung			

Sollen Sprachwechsel die Etablierung der doppelten Sachfachliteralität fördern, folgen sie einer Systematik und sind pädagogisch durchdacht und geplant. Dabei finden keine bloßen Wiederholungen in der L1 statt, sondern es müssen spezielle, motivationsfördernde Aufgabenformate entwickelt werden, die eine Auseinandersetzung und kontrastive Betrachtung der beiden Sprachen ermöglicht [140, S.93-94].

¹²⁷ **translanguaging:** Unterrichtskonzept, bei dem zwischen den verwendeten Sprachen gewechselt wird. Der Wechsel kann nach Williams sehr stringent nach Out- und Inputphasen getrennt, oder wie nach Garcia dynamisch auch mehrmals innerhalb eines Satzes erfolgen [140, S.90-91].

¹²⁸ Tabelle Funktionen von Sprachwechseln gekürzt nach [140, S.93].

Methodische Gestaltung von Sprachwechseln

Um einen wirklichen Bilingualismus anzustreben, der L1 und L2 gleichermaßen beinhaltet, müssen methodische Lernsettings gestaltet werden, die einen funktionalen Wechsel zwischen den beiden Sprachen ermöglichen. Die Umsetzung dieser Sprachwechsel wird in vielen Publikationen beschrieben. Im Folgenden wird auf einige dieser Realisationsmöglichkeiten eingegangen.

Zu Beginn eines jeden Unterrichtsvorhabens sollten mögliche fachsprachliche und konzeptionelle Unterschiede in L1 und L2 von der Lehrkraft analysiert werden. Anschließend können notwendige Sprachwechsel didaktisch geplant werden. Hierbei kann mit klassischen W-Fragen (Wer?, Wann?, Wie lang? Wie?), die methodische Ausgestaltung, Dauer und Zeitpunkt der Sprachwechsel ausgearbeitet werden [140, S.96]. Dabei ist die Gestaltung der geeigneten Arbeitsmaterialien mit Annotationen und die Auswahl verschiedener Aufgabentypen ebenso entscheidend wie eine gut überlegte Gestaltung des Unterrichtsgesprächs. In der Durchführung kann die Verlangsamung der Interaktion, die Verwendung von mündlichen Stichworten oder die gezielte Vorformulierung von Impulsen in beiden Sprachen lernförderlich sein [141, S.231-233].

In vielen Quellen wird die Nutzung der Muttersprache als Hilfestellung propagiert. Dies kann in Form von kurzen Hilfestellungen im Unterrichtsgeschehen (*Pendelstrategie* [142, S.95]) oder als geplante Phasierung mit deutschen Anteilen (*Sprachinseln* [138, S.82]) umgesetzt werden. Bekannte Aufgabenformate aus dem Fremdsprachenunterricht wie die Sprachmittlung können eingesetzt werden, um neben dem Sprachwechsel auch die interkulturelle Kompetenz der Lernenden zu schulen [113, S.197-199].

Darüber hinaus finden sich in der Literatur zahlreiche Vorschläge für passende Methoden von Sprachwechseln (vgl. Abbildung 72). Diese sind meist aus dem Fremdsprachenunterricht und sprachsensiblen Unterricht entlehnt, und werden um die Nutzung der Muttersprache erweitert. So wird beispielsweise die spielerische Schulung von Fachkonzepten und Fachbegriffen angebahnt, indem zweisprachige Begriffe für ein Memory- bzw. Taboo-Spiel verwendet werden. Darüber hinaus können kooperative Lernformen wie z.B. eine Stationsarbeit oder ein Kugellager mit deutsch- und englischsprachigen Anteilen eingesetzt werden. Heimes hat außerdem eigens für den BU Methoden wie z.B. die *Bilingual Question Time*¹²⁹ oder die *Bilingual Poster Production*¹³⁰ entwickelt [143].

¹²⁹ **Bilingual Question Time:** Abwandlung einer Fishbowl-Diskussion bzw. Diskussion mit Gruppenschutz, bei der deutschsprachige Expertinnen und Experten, Fragen eines englischsprachigen Publikums mit Hilfe von Dolmetschenden beantworten.

¹³⁰ **Bilingual Poster Production:** ein Poster wird als Lernprodukt in einer Sprache erarbeitet und in einer anderen Sprache präsentiert.



Abbildung 72. Beispiele methodischer Gestaltung von Sprachwechseln nach Unterrichtsphase¹³¹

CLIL und Mehrsprachigkeit

Obwohl sich bilinguale Lernangebote zunehmender Beliebtheit erfreuen (vgl. 3.5.2), wird immer wieder Kritik laut, die die Bildungsprogramme als elitär und nicht für alle Schülerinnen und Schüler gleichermaßen als zugänglich bezeichnen, man spricht auch von einem „elitist bias“ [145, S.13-14]. Die Teilnahme an solchen Angeboten wird teilweise als Privileg und Zeichen der sozialen Abgrenzung empfunden [145, S.13]. Dies hängt sicher auch mit den Selektionsprozessen zusammen, die bilingualen Programmen zu Grunde liegen (vgl. 3.5.4), wobei sich meist leistungsstarke Lernende für diese entscheiden oder für diese ausgewählt werden. Auch die KMK in Deutschland spricht von Bilinguaem Unterricht als „Beitrag zur Begabtenförderung im sprachlichen Bereich“ [118, S.5]. Hierbei sollen „fremdsprachliche Kompetenzen auf hohem Niveau weiter entwickelt [...] werden“ [118, S.6].

Dem stellen sich einige Forschende entgegen und fordern einen „Paradigmenwechsel“ [146, S.65], um verschiedenste bilinguale Angebote möglichst vielen Lernenden zugänglich zu machen. Sie plädieren dafür, dass sich der BU von der Begabtenförderung weg und weiter zu einem Bildungsziel für die allgemeine Schülerschaft entwickeln sollte. Diese Weiterentwicklung von „inklusiveen Ansätzen“ [147, S.38] soll sich z.B. auch an Schülerinnen und Schülern richten, deren L1 nicht der Unterrichtssprache entspricht [118, S.8].

¹³¹ Abbildung Beispiele methodischer Gestaltung von Sprachwechseln strukturiert nach Unterrichtsphase mit Methodenvorschlägen aus [138, S.88,144, S.81-83,143, S.8-10]. Die zugeordneten Unterrichtsphasen sind Vorschläge und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Viele der Methoden können selbstverständlich in mehreren Phasen eingesetzt werden.

Im internationalen Diskurs wird CLIL von einigen Forschenden als zusätzliche Form von Bilingualismus bezeichnet, weil die Fremdsprache in diesen Settings meist nur in ein bis zwei Sachfächern verwendet wird. Im Vergleich zu Immersionsprogrammen wird sie deshalb als schwächere, weniger ambitionierte Form des BU angesehen. Aus dieser Sichtweise ist diese Form des BU kein ganzheitliches Modell, sondern eine innovativere Form des Fremdsprachenunterrichts [145, S.3, 9].

Der bilinguale Unterricht in Deutschland wurde ursprünglich als ein Angebot für Lernende mit der Herkunftssprache Deutsch entwickelt, andere Herkunftssprachen wurden nicht in den Blick genommen [103, S.11]. Im Rahmen der Mehrsprachigkeitsdidaktik wurden diese Defizite aufgezeigt und die „wechselseitige Beziehung“ [147, S.36, 39] von Mehrsprachigkeit und bilinguaalem Unterricht findet zunehmend Berücksichtigung. Forschungsströmungen aus BU und Mehrsprachigkeitsdidaktik sollten zusammengeführt werden, um von einer ganzheitlichen Betrachtung eines sprachsensiblen Fachunterrichts zu profitieren [128, S.50]. Forschende sprechen sich außerdem für eine Öffnung von CLIL als Angebot für verschiedene Lernende aus. Dazu müssten Mehrsprachigkeit, linguistische Unterschiede und die Diversität von Lernendentypen mitgedacht werden [148, S.19]. Dabei sollten die Herausforderungen, die sich aus Mehrsprachigkeit ergeben, in ihrer Komplexität anerkannt und das vorhandene Sprachvermögen der Lernenden als Ressource genutzt und in Forschungsvorhaben gezielter erfasst werden [145, S.14]. Die genaue Ausgestaltung eines solchen Ansatzes ist noch Teil von verschiedenen Untersuchungsgegenständen und Forschungsbestrebungen.

3.5 Perspektiven und Herausforderungen von bilinguaalem Unterricht

In diesem Kapitel werden die zukünftigen Perspektiven und Herausforderungen von BU beschrieben. Dabei wird der Schwerpunkt auf die Verbreitung und Organisation, das Potential und die Beliebtheit von bilingualen Angeboten, die Situation der Lehrkräfte und den Forschungsstand gelegt.

3.5.1 Verbreitung und Organisation von bilinguaalem Unterricht in Deutschland

Diese Arbeit fokussiert sich schwerpunktmäßig auf Organisationsformen und Modelle von CLIL an Gymnasien in Deutschland. Es gibt aber natürlich auch bilinguale Lehr- und Lernangebote für den Grundschulbereich und für andere weiterführende Schulen. Diese werden hier jedoch nicht vordergründig behandelt.

Der größte Anteil bilingualen Unterrichts wird immer noch an Gymnasien gelehrt. Andere Schulformen steigern jedoch auch ihr Angebot. So sind bilinguale Angebote in ca. 30% der Realschulen und Gesamtschulen und berufsbildenden Schulen vertreten [107, S.173]. Eine detaillierte Übersicht findet sich in Tabelle 14.

Tabelle 14. Verbreitung von bilingualen Unterrichtsangeboten¹³²

Land	GS	HS	RS	Schularten mit mehr- eren Bil- dungsgän- gen	GY / S I	GY / S II	BbS
BW	X	X	X		X	X	X
BY	X		X		X	X	X
BE	X			X	X	X	X
BB	X		X	X	X	X	X
HB	X			X	X	X	X
HH	X			X	X	X	X
HE	X		X	X	X	X	X
MV	X			X	X	X	
NI	X			X	X	X	X
NW	X		X	X	X	X	X
RP	X		X	X	X	X	X
SL	X		X	X	X	X	X
SN	X			X	X	X	X
ST					X	X	X
SH	X			X	X	X	X
TH	X				X	X	X

Bilinguales Lehren und Lernen findet an Gymnasien meist im Rahmen von Schulzweigen oder modularen Angeboten statt. Bilinguale Schulzweige werden als spezielle Profilbildung angeboten, die sich primär an Jugendliche im deutschsprachigen Schulsystem richtet, die eine Fremdsprache mit erhöhter Stundenzahl und in ein bis zwei Sachfächern erlernen möchten [149, S.74]. Die Lerngruppen werden meist auf Grund einer aktiven Wahlentscheidung der Lernenden für das bilinguale Angebot zusammengestellt. Die Schulzweige beginnen in Klasse 5 und 6, mit der Besonderheit, dass in diesen Klassen mehr Fremdsprachenunterricht erteilt wird. In Klasse 7 bis 10 wird meist in zwei Sachfächern in der Fremdsprache unterrichtet. Anschließend kann dann in der Qualifikationsphase ein bilinguales Abitur in den entsprechenden Sachfächern abgelegt werden.¹³³ Am Ende ihrer Schullaufbahn sollen die Schülerinnen und Schüler dadurch zu einer Zweisprachigkeit befähigt werden. Diese Form des Lernens kann, wegen seiner kontinuierlichen und intensiven Förderung zu einer „fremdsprachigen Gesamtkompetenz“ [146, S.68] führen.

Neben den bilingualen Schulzweigen gibt es auch Angebote für zeitlich begrenzten bilingualen Unterricht, der z.B. für ein Schuljahr oder im Rahmen von bilingualen Modulen als kurze Unterrichtssequenzen angeboten wird [120, S.109]. Sie können flexibel eingesetzt werden, passen sich an die benötigten Lernprozesse der Lernenden an und eignen sich besonders zur fachsprachlichen Kompetenzerweiterung in der Fachsprache, als auch zur Vermittlung von interkulturellen Thematiken. Die Fremdsprache hat die Funktion einer Arbeitssprache und kann je nach Format als dominierendes oder gleichberechtigtes Pendant zur Muttersprache oder nur in einzelnen Elementen thematisiert werden [149, S.78]. Durch die Flexibilität der Angebote ist es möglich, dass auch Lernende außerhalb von Schulen mit bilingualem Profil Erfahrungen mit bilingualem Unterricht machen können.

¹³² Tabelle bilinguale Lernangebote in Deutschland: [118, S.11]. Die Abkürzung BbS steht für Berufsbildende Schulen, GS für Grundschule, HS für Hauptschule, GY für Gymnasium und RS für Realschule (Die aktuellste Quelle der KMK ist aus dem Jahr 2013.).

¹³³ Sonderformen sind zum Beispiel binationale Schulen, bei denen Abschlüsse in zwei Sprachen wie z.B. CertiLingua und das International Baccalaureate (IB) abgelegt werden können [118, S.9, 12].

Eine langfristige Etablierung dieser Module und ein damit verbundener nachhaltiger Kompetenzerwerb für die Schülerinnen und Schüler ist jedoch in der Praxis nur möglich, wenn die Schulen diese fest in Ihren Lehrplänen bzw. Schulprogrammen verankern [146, S.69].

Die Bundesländer legen die Regularien, Stundenzahl, Art der Organisationsform- und Umsetzung fest. Je nach Bundesland wird das sehr unterschiedlich geregelt. In Nordrhein-Westfalen bieten mehr als 250 Schulen bilinguale Lernumgebungen an [150]. In der Informationsbroschüre zum bilingualen Unterricht in NRW beschreibt die damalige Ministerin für Schule und Weiterbildung Sylvia Löhrmann diesen als eine 40 Jahre andauernde „Erfolgsgeschichte“, die sie vor allem auf die „hervorragenden Prüfungsergebnisse“ und ein „großes Interesse“ [151, S.3] zurückführt. Dabei wird die Steigerung der Sprachkompetenz und die Förderung der interkulturellen Kompetenz als zentrale Vorteile von bilinguaem Unterricht hervorgehoben. Weiterhin wird die Durchlässigkeit von bilingualen Angeboten betont, die allen Schulen und allen Schülerinnen und Schülern offensteht [151, S.4]. In NRW ist die Belegung von bis zu drei bilingualen Sachfächern im Rahmen eines bilingualen Schulzweiges bis zur Klassenstufe 10 umsetzbar. Eine Fortführung eines bilingualen Bildungsgangs ist auch in der Oberstufe möglich, sofern dies von der Schule angeboten wird. In der Oberstufe kann neben dem Leistungskurs Englisch auch ein bilinguales Sachfach als drittes oder viertes Abiturfach belegt werden. Wird der Bildungsgang erfolgreich abgeschlossen, erhalten Lernende eine zusätzliche Bescheinigung zu Ihrem Abiturzeugnis, die Teilnahme an bilingualen Modulen wird als Bemerkung auf den Zeugnissen vermerkt [151, S.8-9].

Durch die weitere Verbreitung von verschiedenen Formen des CLIL hat sich auch die Zahl der verfügbaren bilingualen Sachfächer stark erweitert und mittlerweile sind bundesweit 13 bilingual erteilte Sachfächer vertreten. In fast allen Bundesländern werden die Gesellschaftswissenschaften Geschichte, Geografie, Politik sowie im naturwissenschaftlichen Bereich Biologie angeboten. Chemie wird in acht Bundesländern, darunter Nordrhein-Westfalen, bilingual unterrichtet [118, S.14]. Deutschlandweit werden CLIL-Bildungsmöglichkeiten in den Sprachen Französisch und Englisch angeboten [118, S.13].

3.5.2 Potential und Beliebtheit von Bilingualen Angeboten

Die Beliebtheit von bilingualen Lernangeboten in Deutschland ist ungebrochen und die Zahl der Angebote wächst stetig weiter. Die Kultusministerkonferenz führt dies auf deren Bewährtheit und „hohe Zufriedenheit der Beteiligten“ [118, S.20] zurück.

Besonders die KMK ist von der Qualität und Effektivität des bilingualen Unterrichts überzeugt und stützt diese Aussage auf zahlreiche Studien der letzten Jahre [118, S.6], von denen im Detail die Ergebnisse der Schülerleistungen in den Fächern Deutsch und Englisch der International (DESI)-Studie aus dem Jahr 2001 beschrieben werden [118, S.18]. Eine Stichprobe von 38 Klassen mit 958 Lernenden wurden in der Studie im Rahmen von bilingualen Lernsettings untersucht [152, S.454]. Lernende aus bilingualen Bildungsgängen erreichten in allen fremdsprachlichen Kompetenzbereichen höhere Kompetenzniveaus als Lernende der Vergleichsgruppe. In Klasse 9 konnte sogar ein sprachlicher Vorsprung von etwa zwei Schuljahren bei den bilingual Lernenden festgestellt werden [152, S.455-456]. So bilanziert die KMK in ihrem Bericht aus dem Jahr 2013 bilinguale Angebote als „Erfolgsmodell für die Förderung sprachlicher Kompetenzen“ [118, S.19].

Dass bilingual Lernende eine höhere Sprachkompetenz erreichen [20, S.217], kann auf verschiedenste Ursachen zurückgeführt werden. Bisher gibt es nur Vermutungen, die noch nicht empirisch belegt sind, wie z.B., dass die verstärkte, sprachliche Vorbereitung und die häufigere Auseinandersetzung mit der L2 zu besseren Ergebnissen führen könnten. Außerdem muss bedacht werden, dass es sich in bilingualen Schulzweigen in Deutschland meist um ausgewählte, leistungsstarke Lernende handelt, die aus sprachlichem Interesse und hoher Lernmotivation diese Lernangebote auswählen. Letzt genannte Aspekte konnten in empirischen Studien schon nachgewiesen werden [110,153]. Folglich wird durch die Auswahl der Kohorte automatisch ausgeschlossen, dass der unbestritten kognitiv fordernde und anspruchsvolle [154, S.10] bilinguale Unterricht, bei schwächeren Lernenden zu starken negativen Gefühlen, Frustration und intellektueller Hilfslosigkeit oder vermehrtem *cognitive load* führt [155, S.485]. Diese Effekte können nachweislich den Lernprozess behindern und den sprachlichen und inhaltlichen Lernerfolg beeinflussen. Da schwächere Lernende meist keine BU-Angebote belegen, treten diese Effekte nicht vermehrt auf.

Durch weitere empirische Studien konnte außerdem gezeigt werden, dass die Inhalte des Sachfachs von CLIL-Lernenden ebenso gelernt wurden und ihnen aus dem BU keine Nachteile entstanden [153, S.80]. Die meisten Schülerinnen und Schüler verbesserten im BU ihre fremdsprachlichen Kompetenzen und hatten im Bereich fachlicher Kompetenzerwerb vergleichbare Ergebnisse zu denen gleichaltriger Lernender [20,153].

Um die bildungspolitischen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts zu meistern, werden bilinguale Lernangebote mit hohen Anforderungen und mit großen Erwartungen bezüglich des Lernerfolgs und zukünftiger beruflicher Perspektiven versehen. Leider gibt es bisher nur wenig evidenzbasierte Forschung, die diese Erwartungen bestätigen oder eindeutig zeigen, dass der BU diesen Anforderungen gerecht werden kann [108, S.19]. Dieses Phänomen wird im Folgekapitel genauer geschildert werden.

3.5.3 Situation der Lehrkräfte

Auf europäischer Ebene bietet das *EU Rahmenprogramm zur Ausbildung von CLIL Lehrkräften* einen konzeptionellen Rahmen für die Implementation von CLIL-Lernangeboten und Leitlinien zur Ausbildung und Professionalisierung von Lehrkräften [156]. Die einzelnen Mitgliedsstaaten setzen dies anhand dieser Rahmenvorgabe um. In Deutschland obliegt diese Aufgabe der Kultusministerkonferenz (KMK) und die weitere Ausschärfung den Bundesländern, die BU praktizieren. Auf Grund der hohen Beliebtheit von bilingualen Angeboten, gibt es einen hohen Bedarf an Lehrkräften. Meist ist der Bedarf jedoch höher als die Verfügbarkeit von qualifizierten Lehrpersonen [146, S.72]. Je nach Bundesland ist die Ausbildung sehr unterschiedlich organisiert. Meist findet sie über eine Zusatzqualifikation in der ersten oder zweiten Phase der Lehrkräfteausbildung statt. Einige Bundesländer ermöglichen auch Weiterbildungsmaßnahmen oder Zertifikate in der dritten Phase der Ausbildung. Um die Unterrichtsversorgung an Schulen mit bilingualen Angeboten sicherzustellen, müssen mindestens zwei Lehrkräfte mit der entsprechenden Qualifikation und Fächerkombination das Fach unterrichten, um es als reguläres Unterrichtsfach an Schulen zu etablieren [118, S.16-17].

Handelt es sich um eine seltene Fächerkombination wie z.B. Chemie und Englisch, ist dies auch automatisch mit potenziell weniger Lehrkräften verbunden und schränkt so gleichsam ein mögliches Fächerangebot an Schulen ein. Laut einer Bedarfsanalyse aus dem Jahr 2017, die Rainer Brunnert im Rahmen seines Dissertationsprojekts durchgeführt hat, bieten deutschlandweit 30 Schulen bilingualen Chemieunterricht als Fach an, sieben davon in NRW [157, S.79]. Ein Grund dafür könnte sein, dass in NRW zukünftige Lehrkräfte schon im Studium bilinguale Zusatzqualifikationen erwerben oder bilinguale Masterstudiengänge belegen können [118, S.124]. Ausgebildete Lehrkräfte mit Fremdsprache und Sachfach können dann nach vollendeter Ausbildung bilingualen Unterricht erteilen. Alternativ können sich auch Sachfachlehrkräfte durch den Erwerb eines C1-Sprachzertifikats nachqualifizieren oder Muttersprachler der vermittelten L2 für den BU eingesetzt werden.

3.5.4 Forschungsstand und -lücken

Schon bei der Schilderung des Potentials von BU (vgl. 3.5.2) wurde deutlich, dass in einigen Bereichen „Forschungslücken“ [158, S.204] bestehen. Diese hängen sicherlich auch mit der Komplexität des Feldes [108, S.19] und mit der Verschiedenheit und Vielzahl an Lernsettings [159, S.112] zusammen, die sich schwer vergleichen und übertragen lassen. Daraus ergibt sich automatisch eine Begrenztheit der Reichweite der Ergebnisse. Diese sind vielfaktorisches und beeinflussen die Untersuchungsergebnisse [20, S.220]. So schlussfolgert Rumlich in seiner Rezension *Empirische Zugänge zum bilingualen Sachfachunterricht* (2018):

„Diese Verschiedenartigkeit der Kontexte und Realisierungsformen bilingualen Unterrichts sorgen für eine eingeschränkte Übertragbarkeit gewonnener Forschungsergebnisse und stellen damit eine der zentralen Herausforderungen bei der evidenzbasierten Beurteilung seiner Leistungsfähigkeit dar.“ [158, S.199]

So entsteht ein zunehmendes Paradox. CLIL findet immer stärkere Verbreitung und Zuspruch, jedoch ist die Effektivität des Programms noch nicht durch fundierte empirische Forschung belegt [107,110,159].

Deshalb mahnen einige Forschende auch ein großes „Forschungsdefizit“ [110, S.9] an, weil viele Studien ohne Kontrollgruppe und Berücksichtigung der „Vorbereitungseffekte“¹³⁴ [110, S.5] der Lernenden wahrscheinlich die Effekte des bilingualen Lernprozesses überschätzen.

Ohlberger und Wegner problematisieren in Ihrem 2018 erschienenen Artikel zum *Forschungsstand des bilingualen Unterrichts in Deutschland und Europa* hierbei besonders die Forschung an „vorselektierten Stichproben“ [153, S.81], die schwer mit regulär beschulten Kontrollgruppen vergleichbar sind. Die Autoren empfehlen daher in zukünftigen Forschungsprojekten heterogenere Lerngruppen zu untersuchen. Dies könnte z.B. durch die Forschung an bilingualen Modulen ermöglicht werden (siehe Kapitel 4 S. 112).

Aktuellere publizierte Studien aus dem deutschsprachigen Raum nehmen die Frage nach dem Mehrwert von Bilinguaem Unterricht für die Entwicklung der Sprachkompetenz in den Blick.

¹³⁴ Der Begriff **Vorbereitungseffekte** bezieht sich dabei auf die fremdsprachliche Mehrbeschulung von Lernenden, bevor sie an bilingualen Lernangeboten teilnehmen.

Dabei werden die bilingualen Lernenden mit Kontrollgruppen verglichen, die regulären Englischunterricht besuchen. Exemplarisch werden im Folgenden zwei Studien aufgegriffen.

Rumlich testete im Rahmen der DENOCS-Studie von 2011-2013, 1000 SuS aus bilingualen und nicht-bilingualen Zweigen. Die Lernenden aus NRW beantworteten dazu am Ende der 6. und 8. Klassenstufe standardisierte C-Tests und Selbstauskunft-Fragebögen zu ihren Englischnoten. Am Ende der 6. Klasse konnte bei der bilingualen Gruppe ein Vorsprung von 1-1,5 Schuljahren in der Leistung im Fach Englisch festgestellt werden. Da bis dahin noch kein bilingualer Unterricht erfolgt war, können diese Ergebnisse einzig und allein auf Klassenkombinations-, Vorbereitungs- und Selektionseffekte zurückzuführen sein [160, S.44]. Diese Effekte blieben bis zum Ende der Klassenstufe 8 gleich, was zeigt, dass BU keinen „zusätzlichen Beitrag zur Entwicklung globaler Englischkompetenzen leistet“ [160, S.44], sondern die Ergebnisse wahrscheinlich vor allem mit den besonderen Bedingungen der Kohorte zusammenhängen.

In der LAU-Studie analysierten Feddermann, Baumert und Möller Daten von Hamburger Lernenden von der fünften bis 11. Klasse aus den Jahren 1996-2003. Grundlage für die Analyse der Englischkenntnisse waren standardisierte C-Tests der Klassen 7, 9 und 11 [161, S.177]. Auch hier fielen Vorbereitung- und Selektionseffekte [161, S.178-179] auf. Die CLIL-Lernenden hatten eine bessere Ausgangssituationen für den Fremdspracherwerb im Vergleich zur Kontrollgruppe. Da sie meist mehr Vorbereitung und Instruktion in der L2 erfuhren, wirkte sich dies auch auf den Ausbau der Sprachfähigkeiten aus, weshalb bilinguale Lernende in den C-Tests besser abschnitten. Wurden Vorbereitungs- und Selektionseffekte in den Daten berücksichtigt, schnitten die Lernende mit und ohne CLIL in den C-Tests vergleichbar ab [161, S.182-183]. Andere Kompetenzen, in denen CLIL-Lernende Vorteile haben könnten, wie z.B. Hör-Sehverstehen und mündliche Sprechkompetenz, konnten in den Daten nicht abgebildet werden. Die Autoren plädieren für die Implementation von mehr Englischunterricht in früheren Jahrgangsstufen, um die beobachteten positiven Vorbereitungseffekte für alle Schülerinnen und Schüler zugänglich zu machen [161, S.184].

Goris (et al.) evaluierte in seinem Übersichtsartikel aus dem Jahr 2019 142 CLIL-Studien aus ganz Europa. Die Autoren kommen zu ähnlichen Ergebnissen wie die deutschen Studien. Die Mehrheit zeigt, dass sich die Sprachkompetenz gemessen auf die aufgewendete Zeit bei CLIL- und Kontrollgruppe ähnlich entwickelt [162, S.692]. Es scheint Indikatoren zu geben, dass die Lernenden umso mehr profitieren, je länger sie in CLIL-Umgebungen beschult werden. Auf Grund von besseren Lernbedingungen und Selektionseffekten sind die bilingualen Lernenden in vielen europäischen Ländern motivierter, sprachlicher talentierter und akademisch involvierter. Die Effektivität und der Einfluss von CLIL-Interventionen auf diese Lernbiografien ist bisher jedoch noch nicht ausreichend über Langzeitstudien erforscht [162, S.676]. Im Bereich Kommunikations- und mündlicher Sprachkompetenz schneiden die bilingualen Lernenden jedoch deutlich besser ab als ihre Mitschülerinnen und Mitschüler im Regelunterricht. Dies könnte ein Indiz für den Mehrwert und Einfluss des CLIL-Lernsettings sein [162, S.693]. Weitere Studien werden nötig sein, um diese Tendenzen zu identifizieren und die Effektivität von CLIL zu belegen.

3.6 Bilingualer Chemieunterricht

Die Auswahl des passenden Sachfachs ist für die Umsetzung von CLIL-Lernsettings von entscheidender Bedeutung. Dabei sind die Fächer der Naturwissenschaften im Gegensatz zu gesellschaftswissenschaftlichen Fächern meist weniger zahlreich vertreten. Besonders das Sachfach Chemie gilt im deutschsprachigen Raum als "wachsende Orchidee" [163]. Diese Bezeichnung hat sich durch die fehlende, allumfassende Verbreitung des Faches etabliert (vgl. Abbildung 73). Bilingualer Chemieunterricht gilt als seltenes Fach.



Abbildung 73. Übersicht der Verbreitung von Bilinguaalem Chemieunterricht in Deutschland (grüne Einfärbung)¹³⁵

Dieser Entwicklungsstand kann auf eine Vielzahl von Gründen zurückgeführt werden. Besonders hervorzuheben ist hierbei, dass mit dem Sachfach Chemie ein hoher Schwierigkeitsgrad assoziiert wird. Allgemein hält sich die Meinung, dass die Schwierigkeit des Sachfachs durch den Einsatz einer Fremdsprache noch erhöht werden könnte [127, S.165].

Darüber hinaus wird argumentiert, dass Chemie einen hohen Anteil speziellen Fachvokabulars habe, was das sprachliche Lernen erschwere und dass die in CLIL geforderte interkulturelle Dimensionen nur schwer umsetzbar sei [164; S.115]. Dies könnten einige Gründe sein, weshalb bilingualer Chemieunterricht von Lernenden wenig nachgefragt wird [165, S.17]. Außerdem gibt es eine geringe Zahl an Lehrkräften, die über die passenden Fakultas verfügen, um bilingualen Chemieunterricht abzuhalten (vgl. 3.6.3). Nur etwa 8,3% der Lehramtsstudierenden haben neben Chemie die Fremdsprache Englisch als Zweit- oder Drittfach [165, S.13]. In NRW versucht man diesem Phänomen z.B. in der ersten und dritten Phase der Lehrkräftebildung zu begegnen. Das Bundesland bietet deutschlandweit die meisten bilingualen, universitären Veranstaltungen und Studiengänge sowie berufsbegleitende Zusatzqualifikationen an [165, S.14]. Trotz der Bemühungen steht die Didaktik für bilingualen Chemieunterricht noch am Anfang [166, S.722].

Der empirische Forschungsstand zur Untersuchung der Effektivität von bilingualen naturwissenschaftlichen Angeboten weist, ähnlich wie der Forschungsstand zu BU allgemein (vgl. 3.5.4), einige Lücken auf [127, S.172].

¹³⁵ Abbildung Verbreitung BU Chemie in Deutschland: Grundlagenkarte <https://www.landkartenindex.de/kostenlos/?p=8>. (letzter Zugriff 25.08.23), ergänzt mit Informationen aus [118, S.14].

Forschende kommen zu dem Schluss, dass noch viele Untersuchungen ausstehen, um eindeutige Aussagen zu den Auswirkungen auf die Sachfachkompetenz zu treffen. Die Forschungslandschaft gilt als umfangreich, jedoch noch „wenig ausdifferenziert“ [15, S.87]. Nichtsdestotrotz können aus den bisher erprobten Unterrichtssettings und Studien allgemeine Befunde bzw. Hypothesen für das Fach Chemie abgeleitet werden, die im Folgenden geschildert werden.

Bilinguale Lernende haben meist eine erhöhte Sprachkompetenz. Dies lässt sich z.B. durch erhöhte Motivation und Interesse, als auch durch Selektionseffekte (vgl. 3.5.4) erklären [128, S.43-44]. Sprachlich begabte Lernende können so für ein unbeliebtes Sachfach wie Chemie motiviert werden und die Einstellungen gegenüber dem Fach durch eine passende Form der Unterrichtsgestaltung mit laborpraktischen Phasen und Kontextualisierung der Lerninhalte verändern [163, S.208]. Bilingualer Chemieunterricht liefert somit einen neuen Zugang bzw. eine neue Perspektive zu fachlichen Inhalten. Der Lernerfolg tritt jedoch nicht automatisch ein. Neben einer ansprechenden Unterrichtsgestaltung, müssen die sprachlichen Anforderungen lerngruppengerecht sein. Dies kann zu einer anfänglichen Verlangsamung der Unterrichtskommunikation führen, weil Fachbegriffe umgewälzt werden müssen und man sich vertiefter mit ihnen auseinandersetzt. Folglich kann der Kompetenzerwerb in den ersten 2-3 bilingualen Lernjahren verlangsamt sein [128, S.41, 44-45]. Umso wichtiger ist es, eine gezielte Unterstützung der Lernenden durch umfassendes Scaffolding sicherzustellen. Bewusste Spracharbeit sollte integriert werden, um die Kommunikation besonders im Anfangsunterricht aufrechtzuerhalten z.B. durch den Einsatz von Sprachwechseln (vgl. 3.4.2).

In einer neu veröffentlichten, quasiexperimentellen Vergleichsstudie hat Hülnden die Wirksamkeit des sachfachlichen und fremdsprachlichen Lernens sowie die Motivation der Lernenden im (bilingualen) Fachunterricht Chemie untersucht. Die Studie wurde in den Jahren 2017-2021 mit 148 Schülerinnen und Schülern der 8. Klasse ohne bilinguale Vorerfahrung an einem nordrheinwestfälischen Gymnasium durchgeführt. Die Kontrollgruppen wurden in einem zehnstündigen Modul auf Deutsch, die Untersuchungsgruppen themengleich bilingual zum Inhaltsfeld Atombau und Periodensystem unterrichtet [167, S.78]. Damit unterscheidet sich Hüldens Studie von anderen Untersuchungen, deren Kohorten sich meist aus Lernenden mit bilingualen Vorerfahrungen zusammensetzen (vgl. 3.5.4).

Die Ergebnisse wurden durch ein Prä-Post-Follow-up-Design erhoben, bei dem die Lernenden einen Fragebogen ausfüllten, sowie einen Sprach- und Wissenstest absolvierten. Hülnden fand z.B. heraus, dass auch Lernende ohne bilinguale Unterrichtserfahrung erfolgreich bilinguale Module absolvieren können und es keine signifikanten Leistungsunterschiede im Fach Chemie zwischen CLIL- und Kontrollgruppe gab. Leistungsstärkere Schülerinnen und Schüler im Fach Chemie konnten in CLIL signifikant bessere Ergebnisse erreichen [167, S.232-233]. Nach Hüldens Untersuchungen haben die Leistungen im Fach Englisch keinen Einfluss auf die Leistungen im Sachfach. Entscheidender ist ein positives Selbstkonzept in Bezug auf das Fach Englisch. Dieses führt z.B. auch dazu, dass die Lernenden weniger Hemmungen und Ängste bezüglich einem bilingual-englischen Chemieunterricht haben und interessierter sind. Der Autor spricht sich auf Grundlage der Ergebnisse seiner Studie für eine Durchführung von bilingualem Chemieunterricht im Rahmen von Modulen aus [167, S.244-245].

Da die Mehrheit der Lernenden auf Grund der geringen Verbreitung des Faches keine bilingualen Vorerfahrungen hat, bieten flexibel eingesetzte Module somit eine gute Möglichkeit, BU im Fach Chemie trotzdem gewinnbringend im schulischen oder außerschulischen Kontext (vgl. 3.6.4) zu realisieren.

3.6.1 Zielsetzungen des Faches

Trotz der organisatorischen Hürden und Vorbehalte gegenüber dem Sachfach, kann bilingualer Chemieunterricht den Lernenden und Lehrenden viele neue Perspektiven eröffnen. Dabei werden verschiedene Zielsetzungen verfolgt.

Da die Sprache Englisch in den Naturwissenschaften weltweit als *lingua franca* gilt, ermöglicht der BU ein Eintauchen in die englische Wissenschaftssprache und somit eine einfachere sprachliche Zugänglichkeit für den Austausch in der globalisierten Welt. Die deutsche und englische Sprache sind im Wesentlichen lateinischen Ursprungs. Dadurch treten zwar viele Fachbegriffe auf, diese ähneln sich jedoch in beiden Sprachen. Begriffe wie chemische Reaktion [*engl. chemical reaction*] oder Oxidation [*engl. oxidation*] sind leicht übertragbar [16, S.183]. Außerdem kann das Fach zur Vorbereitung auf ein englischsprachiges Studium, einen Auslandsaufenthalt oder den späteren Beruf in Forschung und Industrie dienen [166, S.720].

Darüber hinaus gibt es viele Überschneidungspunkte zwischen den Zielsetzungen von CLIL und der im Chemieunterricht angestrebten *scientific literacy*. Unter dem Begriff *scientific literacy* wird ein kompetenzorientiertes Bildungskonzept einer naturwissenschaftlichen Grundbildung verstanden [168, S.96]. Der Terminus entstand aus den OECD-PISA-Bildungsprogrammen. Für Deutschland formuliert die KMK diesen in den Bildungsstandards für das Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife als „naturwissenschaftliche Kompetenz“ [169, S.9] und diese wird wie folgt beschrieben:

„Naturwissenschaftliche Kompetenz schließt das systematische Erfassen, Beschreiben und Erklären von Phänomenen in Natur und Technik ein. Für das Verständnis der Naturwissenschaften ist es zudem notwendig, deren Fachsprachen zu beherrschen und deren Historie zu kennen. Insofern ist naturwissenschaftliche Kompetenz auch mit sprachlicher und kultureller Bildung verbunden.“ [169, S.9].

Neben der Erschließung von fachlichen Inhalten steht folglich auch die Vermittlung von sprachlichen und kulturellen Aspekten im Fokus. Dies sind zwei Anliegen, welche mit den Bildungszielen des bilingualen Chemieunterricht vereinbar sind [168, S.101], wenn unter sprachlicher Bildung auch fremdsprachliche Bildung verstanden wird. In den Bildungsstandards wird dies jedoch nicht explizit erwähnt und somit verbleibt der BU in einer Sonderstellung im Bereich der naturwissenschaftlichen Grundbildung. Dementsprechend ist man an deutschen Schulen von einem möglichen Ziel einer „mehrsprachigen Allgemeinbildung“ [168, S.108], durch das Konzept einer *fremdsprachigen scientific literacy* noch etwas weiter entfernt.

In der naturwissenschaftlichen Kompetenz aus den Bildungsstandards sind die vier Kompetenzbereiche Erkenntnisgewinnungskompetenz, Sachkompetenz, Bewertungskompetenz, Kommunikationskompetenz [169, S.10] verwoben, die sich auch in den Kernlehrplänen der Bundesländer wiederfinden und als inhaltliche Orientierung für den bilingualen Chemieunterricht fungieren können, der selbst über keine eigenen curricularen Vorgaben verfügt.

Bohrmann-Linde plädiert zur Erreichung des Bildungsziels für eine Umsetzung des Vierdimensionen-Modells der naturwissenschaftlichen Kompetenz [16, S.194]. Die vier Dimensionen der chemischen Kompetenz wurden von Bonnet [163, S.204] modelliert und von Bohrmann-Linde erweitert (siehe Abbildung 74). In der formalen Dimension werden Kompetenzen und Wissen zu Formalien, Symbolsprache und Fachinhalten zusammengefasst. Die Fähigkeit zur Erläuterung von chemischen Sachverhalten mit Modellen und fachlichen Begrifflichkeiten wird in der konzeptuellen Dimension angebahnt. In der praktischen Dimension wird der Umgang mit chemischen Gerätschaften und naturwissenschaftliche Arbeitstechniken fokussiert. Abschließend sollen in der reflexiven Dimension die Folgen der Anwendung von chemischen Technologien und alltäglichen Gegenständen z.B. ökologisch und sozial eingeordnet und bewertet werden [163, S.204]. Naturwissenschaftliche Kompetenz kann sich nach diesem Modell nur bei den Lernenden ausbilden, wenn mehrere dieser Dimensionen angesprochen und entwickelt werden [16, S.194].

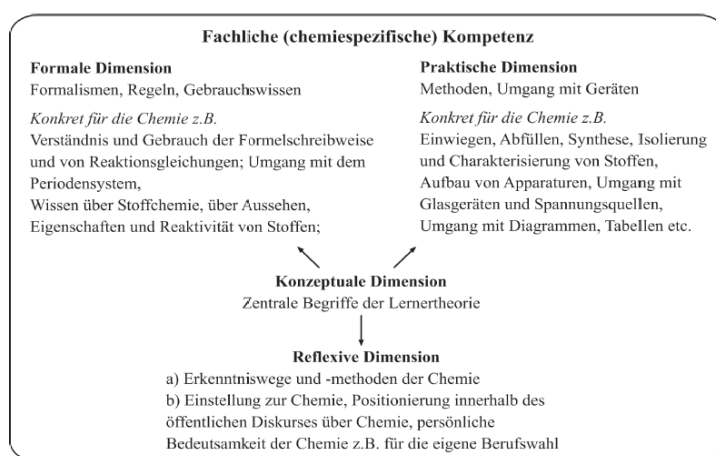


Abbildung 74. Modell chemischer Kompetenz¹³⁶

Bezugnehmend auf die in den kompetenzorientierten Bildungsstandards etablierten Basiskonzepte und Anforderungsbereiche für das Fach Chemie, lassen sich diese auf die in CLIL geforderte Ausbildung der *higher order thinking skills* übertragen, die eine Fokussierung der Bewertungskompetenz als Zielformulierung herausstellen [127, S.170].

Diese Schulung der Bewertungskompetenz ist auch eine zentrale Aufgabe der Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) (vgl. 4.1.1).

Eine weitere Zielsetzung des bilingualen Chemieunterrichts ist, dass sachfachlicher und sprachlicher Kompetenzerwerb integrativ miteinander verbunden sind [16, S.192]. Ein Chemieunterricht ohne Sprachunterricht ist nicht möglich. Mit dieser Spracharbeit geht auch die in CLIL intendierte Schulung der interkulturellen Kompetenz einher. Diese kann mit verschiedenen Ansätzen im Chemieunterricht umgesetzt werden. Dabei lässt sich die Fachwissenschaft als „fremde Kultur“ [16, S.184] wahrnehmen. Die Beschäftigung mit dieser anderen Kultur, ermöglicht dann eine Form des interkulturellen Lernens. Darüber hinaus kann die interkulturelle Dimension auch durch die Beschäftigung mit aktuellen, gesellschaftlichen Themen angebahnt werden, die kulturvergleichend vermittelt werden. Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz von Sprachvergleichen zur Anbahnung eines Perspektivwechsels [127, S.171].

¹³⁶ Abbildung Modell chemischer Kompetenz: [16, S.195].

Es gibt zahlreiche Überschneidungspunkte in den Zielsetzungen von CLIL und bilinguaalem Chemieunterricht, was die Eignung des Faches für den BU bestätigt. Im Folgekapitel werden einige didaktische Prinzipien erläutert, die diese Zielsetzungen in unterrichtliche Handlungssituationen transferieren.

3.6.2 Didaktische Grundprinzipien

Im Gegensatz zu anderen bilingualen Fächern, existiert eine Didaktik des bilingualen Chemieunterrichts nur in Ansätzen [170, S.380]. Im Folgenden werden die in der Literatur erwähnten Grundprinzipien erläutert. Dabei sollen Handlungsorientierung, Lebensweltbezug, Scaffolding, Sprachsensibilität und Sprachwechsel als didaktische Prinzipien skizziert werden, die für unterrichtliche und außerschulische Lernsettings relevant sind [163, S.213].

Eine der großen Stärken des Faches Chemie ist seine Handlungsorientierung durch praktisches Arbeiten mit Experimenten. Die Umsetzungen von praktischen Handlungen bieten Möglichkeiten zur Interaktion und sind Teil eines authentischen Austauschs über die Durchführung, Beobachtung und Auswertung von Versuchen [16, S.197]. Diese Art der Lernumgebung ermöglicht authentische Kommunikationssituationen und Sprachanlässe, da automatisch über die Beobachtungen und Organisation der Experimente gesprochen wird. Die Orientierung an lebensweltlichen Kontexten und alltäglichen Phänomenen kann den Austausch und die Motivation zusätzlich fördern [171, S.113-114]. Um das gemeinsame Aushandeln und Arbeiten anzubahnen, eignen sich besonders kooperative Lernsettings. Diese sind auch sinnvoll, wenn Inhalte z.B. im Sinne einer BNE reflektiert und bewertet werden sollen [127, S.172].

Inhalts- und Spracharbeit sind im (bilingualen) Chemieunterricht untrennbar miteinander verbunden. Um dies im bilingualen Chemieunterricht umzusetzen, müssen mehrere Perspektiven eingenommen werden. Bohrmann-Linde hat dazu Halletts *Bilingual Triangle* (vgl. 3.3) um relevante Aspekte und Inhalte des Unterrichts ergänzt (siehe Abbildung 75). Es kann als Planungsgrundlage für Lernarrangements und didaktisches Modell dienen [16, S.193].

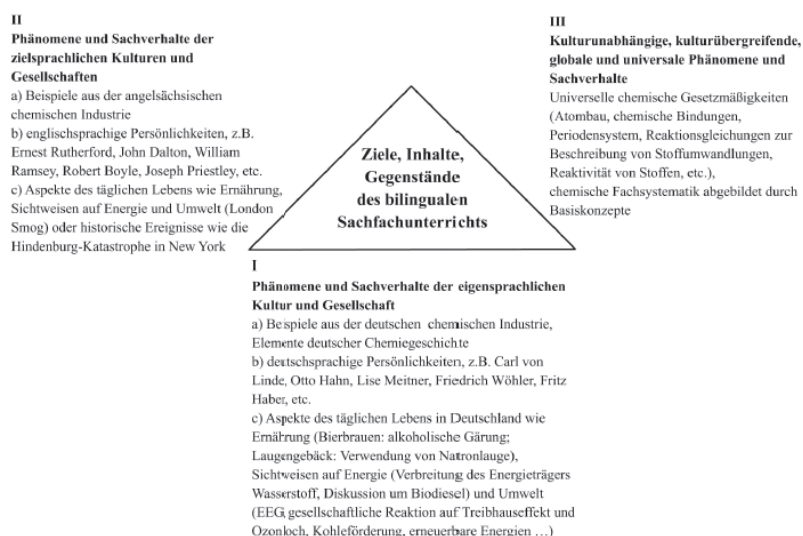


Abbildung 75. Bilingual Triangle erweitert durch Bohrmann-Linde¹³⁷

¹³⁷ Abbildung Bilingual Triangle: [16, S.194].

Durch den Einsatz und die Kombination von Methoden aus der Fachdidaktik Chemie und der Fremdsprachendidaktik, kann sowohl Inhalts- als auch Spracharbeit geleistet werden und eine gegenseitige Bereicherung der Lernumgebung stattfinden [16, S.196]. Im Idealfall entsteht ein „integratives Konzept“ [163, S.209, 214], welches sachfachliches, sprachliches und methodisches Lernen einschließt. Um diese kognitiv anspruchsvollen Lernprozesse anzubahnen, müssen die Schritte der Lernenden durch inhaltliches und sprachliches Scaffolding unterstützt werden.

Eine wirkliche doppelte Sachfachliteralität kann jedoch nur durch den gleichberechtigten Einsatz der L1 und L2 und gezielte Sprachwechsel angebahnt (vgl. 3.4) werden. Dies ist auch sinnvoll, weil die Mehrheit der Lernenden keine bilinguale Vorerfahrung im Fach Chemie hat. Somit kann es hilfreich sein, auf die muttersprachlichen Vorkenntnisse aufzubauen und die L1 geplant und didaktisch überlegt einzusetzen [172, S.165]. Dies können deutschsprachige Abschnitte in der Unterrichtssequenz sein, um Inhalte noch einmal in der Muttersprache zu erläutern oder auf spontane Äußerungen in Plenums- und Gruppenarbeitsphasen einzugehen. Darüber hinaus bieten sich geplante kontrastive Betrachtungen beider Sprachen an, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede herauszuarbeiten und Alltags- von Fachsprache zu separieren [16, S.185-186]. Damit die Unterrichtskommunikation besonders zu Beginn etwas reibungsloser verläuft, kann besonders im Gespräch unter Lernenden auf gezieltes *code-switching* zurückgegriffen werden. Dies kann die kognitive Belastung minimieren und trägt zur Einübung des Fachvokabulars in beiden Sprachen bei [173, S.13]. Weiterhin kann man als Lehrkraft zu Beginn den Grundsatz *message before accuracy* für die Verwendung der Fremdsprache einführen [174, S.35]. Dabei erhalten die Lernenden weniger korrekatives Feedback zu ihrer sprachlichen Leistung, um initiale Hemmungen abzubauen. Es geht primär um den Austausch über Inhalte und weniger um die sprachliche Richtigkeit. Werden dann Sprachwechsel eingesetzt, ist es sinnvoll, diese z.B. mit dem Wechsel der Darstellungsform zu verbinden. So findet keine Wiederholung von Inhalten, sondern eine sprachliche Umwälzung statt [172, S.166].

Um den sprachlichen Anforderungen zu begegnen und die Sprachwechsel umzusetzen, können verschiedene Methoden verwendet werden (vgl. 3.4.2).

Zu Beginn der Etablierung von bilinguaem Chemieunterricht eignen sich Sprachwechselmethoden und Werkzeuge, die die Lernenden schon aus dem Fremdsprachenunterricht kennen z.B. Mediationsaufgaben und Vokabellisten [175, S.141]. Es können aber auch Methoden aus dem sprachsensiblen Fachunterricht wie Leisens *Methodenwerkzeuge* eingesetzt werden [176]. Besonders interessant für das Fach Chemie ist darüber hinaus der Wechsel der Darstellungsformen. Dabei sind drei Darstellungsebenen des chemischen Dreiecks nach Johnstone besonders wichtig, um sich mit der Fachwissenschaft Chemie auseinanderzusetzen (vgl. Abbildung 76). Unterschieden wird in diesem Dreieck die Stoffebene (makroskopische Ebene), die Teilchenebene (submikroskopische Ebene) und die Symbolebene (Repräsentationsebene). Alle drei Ebenen werden im Chemieunterricht besprochen. Die Herausforderung besteht meist in der Bewusstmachung der Wechsel der Ebenen und deren fachsprachliche Trennung. Beobachtungen müssen z.B. verbalsprachlich formuliert und dann schriftsprachlich ausgewertet und in Symbolsprache umgesetzt werden. Ein weiterer Wechsel der Darstellungsform erfolgt zum Beispiel dann, wenn die besprochenen Fachinhalte von der Schriftsprache in die Teilchenebene übertragen werden müssen [172, S.174-175].

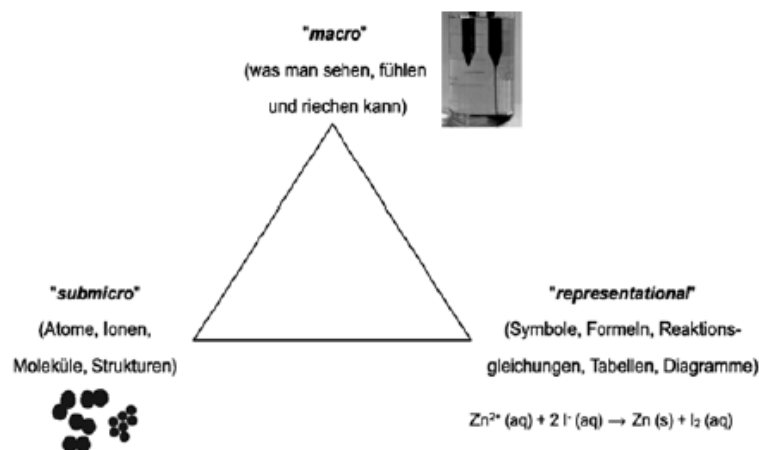


Abbildung 76. Johnstone-Dreieck mit Anpassungen von Bohrmann-Linde.¹³⁸

Diese Idee der Wechsel der Darstellungsformen wird beispielsweise auch von Dale und Tanner für den CLIL-Bereich vorgeschlagen. Sie empfehlen unter anderem den Einsatz von Methoden zur Visualisierung von Textinhalten wie z.B. Graphen, Tabellen, Maps [175, S.120-123] oder für Schreibaufgaben die Methode „Lost in conversion“¹³⁹. Die Verknüpfung der verschiedenen Ebenen des Johnstone Dreiecks wird auch als wichtiger Teil von *deeper learning episodes* des *Pluriliteracies Approach* (vgl. 3.3) wahrgenommen. Arbeitsmaterialien mit Formulierungshilfen, Satzbausteinen, Visualisierungen und Concept Cartoon können nach diesem Ansatz im Fach Chemie vertiefte Lernprozesse initiieren [177, S.35, 178, S.36]

Die eingesetzten Materialien und Methoden sollten es den Lernenden ermöglichen, alle nötigen sprachlichen Handlungen des Chemieunterrichts zu bewältigen.

Diese sind kalkulierbare Herausforderungen, die sprachlich knapp über dem individuellen Sprachniveau der Lernenden liegen sollten. Die Lernenden können so durch ausgewählte Methodenwerkzeuge, Scaffoldingmaßnahmen und durch die Lehrkraft in Ihrem Fach- und Sprachlernprozess unterstützt werden [131, S.45-46].

3.6.3 Unterrichtsmaterialien

Die Situation der vorhandenen Unterrichtsmaterialien ist auf Grund des geringen Unterrichtsangebots im Fach Chemie überschaubar. Dies ist auch auf Unklarheiten in Bezug auf ein gemeinsames Konzept bzw. eine CLIL-Didaktik zurückzuführen. Da der Begriff CLIL viele Ansätze, in verschiedenen Ländern verbindet (siehe 3.2), kann er auf verschiedene Lehrkonzepte angewendet werden. Dies führt jedoch auch zu verschiedenen Interpretationen des Konzepts, je nach Land und Schulform, in der CLIL unterrichtet wird [155, S.459]. Im europäischen Raum fehlt es an konkreten Vorgaben zur Implementation der Angebote und deren didaktischer Ausgestaltung [145, S.14]. Wie bereits in Kapitel 3.3 geschildert, gibt es eine Vielzahl von didaktischen Rahmenkonzepten und Modellen, die den Lehrkräften die Gestaltung von BU erleichtern sollen.

¹³⁸ Abbildung Johnstone Dreieck aus: [172, S.175].

¹³⁹ **Lost-In-Conversion-Methode:** Drei Lernende beschreiben einen Fachinhalt, in dem ein Lernender (A) dazu einen Text und ein Lernender (B) eine grafische Darstellungsform verfasst. Lerner (C) beschreibt den Sachverhalt mit Hilfe der grafischen Darstellungsform. Lernende (A+B) vergleichen diese mit dem verfassten Text [175, S.220].

Die konkrete Umsetzung und methodische Ausgestaltung obliegen meist den einzelnen Lehrpersonen, die die bilinguale Lernumgebung gestalten. Durch fehlende Vorgaben und damit einhergehende Flexibilität, müssen Lehrkräfte viel Zeit in die Planung von BU und die Materialerstellung investieren [154, S.11]. Dies kann zu einer Überforderung der Lehrenden führen.

Lehrkräfte, die Chemie bilingual unterrichten möchten, können auf keine Lehrwerke aus dem deutschsprachigen Raum zurückgreifen. Eine Möglichkeit besteht in der Nutzung von englischsprachigen Quellen. Aristov hat in ihrem Artikel aus dem Jahr 2013 eine Liste von sprachlich authentischen Internetadressen und Literaturquellen zusammengestellt [174, S.32-24]. Darüber hinaus besteht natürlich die Möglichkeit schulische Lehrwerke aus dem englischsprachigen Ausland zu verwenden. Diese werden dem Anspruch einer sprachlichen Authentizität gerecht, sind aber meist anders aufbereitet und nicht mit den deutschen Curricula kompatibel. Sie können als Informationsquelle für die Lehrkräfte dienen, sind aber meist nicht direkt im Unterricht einsetzbar [166, S.721-722].

Die Fachdidaktiken der Chemie veröffentlichen isolierte Sequenzen mit didaktisierten Materialien, die sich für den Einsatz in bilingualen Modulen eignen und direkt von Lehrkräften eingesetzt werden können. Exemplarisch seien hier die Stationsarbeit *Bioenergy* für die Klassen 8-10 [179] und die digitale Lernumgebung zum Klimawandel für Lernende der Oberstufe [180] genannt. Außerdem stellen einige Fachdidaktiken Materialien auf Ihren Homepages zur Verfügung. Die Fachdidaktik Chemie der Uni Göttingen hat dort z.B. eine Unterrichtssequenz mit Unterrichtsmaterialien zu alternativen Treibstoffen veröffentlicht¹⁴⁰. Auf der Homepage der Didaktik der Chemie der Bergischen Universität Wuppertal finden Lehrkräfte englischsprachige Versuchsvideos, Animationen, E-Books und Arbeitsblätter. Weiterhin wurde eine Handreichung von bilingualen Unterrichtsmaterialien in Form von Versuchsanleitungen, Informationstexten und Arbeitsblättern, sowie didaktischen Hinweisen für Lehrkräfte für das erste Lernjahr Chemie mit dem Titel *Bilingual Chemistry* [181] veröffentlicht.

Neben den curricularen Vorgaben des Sachfachs bietet z.B. das Bundesland NRW auch Handreichungen für Lehrkräfte bilingualer Fächer zur „Orientierung und Hilfestellung bei der Umsetzung eines kompetenzorientierten bilingualen Unterrichts“ [182] an. Für das Fach Chemie existiert keine solche Handreichung, was die Implementation des Fachs erneut erschwert. Das Land NRW hat 2012 für den deutsch-englischen Biologieunterricht der Sekundarstufe I eine Handreichung veröffentlicht, welche als eine mögliche Orientierung für die Planung von bilingualem Chemieunterricht bzw. Modulangeboten zu Grunde gelegt werden kann (siehe Kapitel 4).

Einzelne Kultusministerien der Bundesländer stellen außerdem über ihre Online-Portale Informationen und Materialien als Hilfestellungen für Lehrpersonen zur Verfügung. Exemplarisch seien hier Bayern¹⁴¹ und Thüringen¹⁴² genannt, die bilingualen Chemieunterricht nicht als reguläres Fach, sondern nur als Bestandteil von Modulen anbieten. In einzelnen Landesmediatheken gibt es auch eine kleine Auswahl an englischsprachigen Lehrfilmen.

¹⁴⁰ <http://www.unterrichtsmaterialien-chemie.uni-goettingen.de/bilingual.php> (letzter Zugriff 07.08.24).

¹⁴¹ <https://www.bilingual.bayern.de/gymnasium/chemie/> (letzter Zugriff 07.08.24).

¹⁴² https://www.schulportal-thueringen.de/bilinguales_lernen/bilinguale_module (letzter Zugriff 07.08.24).

Darüber hinaus findet man auf Materialplattformen für Lehrkräfte wie z.B. *lehrer-online* und *eduki* vereinzelte Unterrichtssequenzen und Arbeitsblätter.

Weiterhin sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass im Rahmen der bilingualen Studiengänge und in bilingualen Zusatzqualifikation des Referendariats stetig Materialien und Unterrichtsentwürfe entstehen, die im zuletzt genannten Fall auch schulisch erprobt werden.

Hier wäre es wünschenswert, wenn diese Materialien einem breiteren Publikum zur Verfügung gestellt würden. Denn die Hauptverantwortung für die Materialfindung und -erstellung liegt immer noch zum größten Teil bei den unterrichtenden Lehrkräften. Sie können nur auf begrenzte Ressourcen zurückgreifen und müssen sich auf eine intensive Recherche begeben, um diese Materialien zu finden und für ihre Lerngruppen und ihr Lernsetting anzupassen. Dies bedarf eines enormen Zeitaufwands und könnte ein weiteres Hindernis und weiterer Grund für die geringe Verbreitung von bilingualem Chemieunterricht sein. Um dies abzumildern bedarf es kollegialer Zusammenarbeit bei der Unterrichtsplanung, gegenseitige Hospitation und begleitende Lehrkräftefortbildungen [119, S.82]. Daraus ergibt sich außerdem die Notwendigkeit der chemiedidaktischen Unterstützung der bilingual unterrichtenden Lehrkräfte. Der AK Bohrman-Linde gilt dabei als „richtungsweisend“ [165, S.13] für die Konzeption von bilingualem, chemischen Sachfachunterricht.

3.6.4 Außerschulischer Lernort bilinguales Schülerlabor

Neben dem Regelunterricht an Schulen, werden bilinguale Lerninhalte auch an außerschulischen Lernorten wie z.B. Schülerlaboren vermittelt. Unter einem Schülerlabor versteht man einen Lernort, der Lernenden außerhalb einer schulischen Struktur Lernerfahrungen ermöglicht. Dabei steht für naturwissenschaftliche Schülerlabore besonders die Förderung der *scientific literacy* durch selbstständiges Experimentieren im Vordergrund [183, S.13]. Außerdem können Schulen durch diese Angebote unterstützt werden und ihr Lernangebot im MINT-Bereich erweitern. Schülerlabore haben in diesem Zusammenhang das Potential, das Interesse und die Motivation gegenüber den Naturwissenschaften zu steigern und einen Beitrag zur Nachwuchsförderung und Berufsorientierung zu leisten [184, S.22]. Außerdem kann in diesem nicht-formalen Lernsetting eine umfassende Förderung von BNE Lernprozessen abseits des regulären Schulunterrichts stattfinden [185, S.8]. Dies wird auch in formalen Vorgaben wie der Leitlinie BNE NRW forciert [186, S.35]. Somit fällt Schülerlaborangeboten auch die Rolle zu, einen Beitrag zur Förderung von BNE zu leisten [187, S.9].

Außerschulische Lernorte ermöglichen eine flexiblere thematische Ausgestaltung als im Schulunterricht, da für diese Lernumgebungen keine explizit verpflichtende Bindung an den Lehrplan vorgeschrieben ist [187, S.10]. Es besteht leichter die Möglichkeit interdisziplinäre und fächerübergreifende Inhalte z.B. zum Klimawandel zu thematisieren [109, S.28]. Ein Schülerlabor ermöglicht auch mehr effektive Lern- und Experimentierzeit für die Lernenden als im Regelunterricht. Dabei werden die Schülerinnen und Schüler meist über den Zeitraum von mehreren Stunden beim selbstständigen, forschenden Experimentieren angeleitet [185, S. 8]. Darüber hinaus kann sich ein außerschulischer Lernort motivierend auf die Lernenden auswirken.

Bilinguale Schülerlabore gelten als eine Form des bilingualen Unterrichts in Modulen, sind dadurch sehr flexibel einsetzbar und bieten zahlreiche Vorteile [188, S.23-24]. Die Lernenden wenden z.B. L1 und L2 in einer authentischen Situation an. Die Vielfalt der Ebenen der Authentizität von bilingual-chemischen außerschulischen Modulen, kann durch ein von Schwarzer und Holweck erweitertes Modell nach Pinner dargestellt werden (siehe Abbildung 77). Neben dem authentischen Sprachgebrauch, sind die Arbeitsweisen und Arbeitsmaterialien sowie der Lernort an sich als authentisches Lernsetting dargestellt. In naturwissenschaftlichen Lernumgebungen wird Sprach- und Inhaltslernen kontextualisiert und handlungsorientiert vermittelt [188, S.11-12].

Durch deren meist authentische, relevante Themenauswahl wirken sie motivierend auf Lernende und eröffnen die Möglichkeit bilinguale Lernangebote für eine größere Zahl an Schülerinnen und Schülern jenseits der Schule zugänglich zu machen [189, S.16].

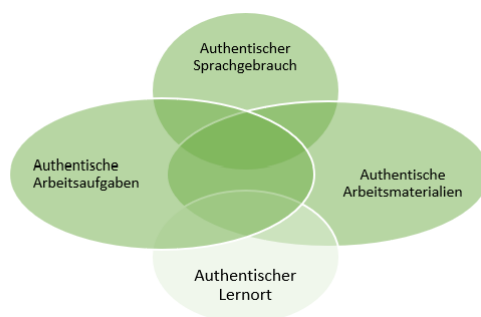


Abbildung 77. Modell der vier Dimensionen der Authentizität¹⁴³

Die Beforschung solcher Lernsettings gestaltet sich aus mehreren Gründen herausfordernd. Durch die meist einmaligen und kurzen Interventionszeiträume, wie sie im Schülerlaborsetting vorkommen, gestalten sich empirische Nachweise von Effekten sehr schwierig [191, S.190]. Durch die unterschiedlichen Lernorte, Lernarrangements und Forschungsdesigns sind die Ergebnisse der Forschung kaum generalisierbar und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist nur schwer herzustellen [192, S.146]. Darüber hinaus sind die benötigten Messinstrumente meist nicht vorhanden und müssen selbstständig konstruiert werden, was wiederum Auswirkungen auf die Objektivität und Reliabilität hat [10, S.190]. Unabhängig von bilingualen Lernsettings, gilt das Fach Chemie für außerschulische Lernorte als „weitgehendes Forschungsdesiderat“ [192, S.154]. Aktuelle Forschungsprojekte behelfen sich meist mit Mischformen aus qualitativen und quantitativen Methoden, um den besonderen Rahmenbedingungen gerecht zu werden.

Obwohl es keine Forschungsgrundlage für allgemein gesicherte Effekte von Schülerlaboren gibt, können Tendenzen beobachtet werden. Grundlage für das Gelingen von Angeboten scheint die Qualität der Betreuung, die Verständlichkeit der Aufgaben, die Lernatmosphäre und die Authentizität der Lernumgebung zu sein [192, S.157]. Dabei scheint es förderlich, wenn die Angebote thematisch an den Regelunterricht angebunden sind. Dies kann sich positiv auf die Lernendenmotivation, deren Einstellung gegenüber naturwissenschaftlichen Fächern sowie die Motivation und den Wissenserwerb auswirken [192, S.158]. Werden Schülerlabore nur einmal besucht, scheinen sich meist nur kurzzeitige Motivationssteigerungen und Lernzuwächse einzustellen [184, S.22].

¹⁴³ Modell selbst gezeichnet nach Vorlage [190, S.338].

Um nachhaltige Effekte und eine nachhaltige Interessensteigerung zu erreichen, sollten Schülerlabore unterrichtlich vor- und nachbereitet werden [193, S.147]. Dabei wirkt es sich besonders positiv aus, wenn unterstützend Arbeitsmaterialien für die Lehrkräfte z.B. über ein Online-Angebot zur Verfügung gestellt werden [194, S.133].

Die Verbreitung von bilingualen Schülerlaboren im Fach Chemie ist noch rarer, als die Verbreitung des bilingual unterrichteten Fachs (vgl. 3.6). Bezogen auf veröffentlichte Publikationen gab es in Deutschland zwei Angebote: eines an der Ruhr-Universität Bochum [17] und eines an der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) in München [190]. Nach Recherchen auf den Websites der Schülerlabore, existieren beide Angebote in dieser Form nicht mehr. Die LMU hat das Angebot gänzlich gestrichen und an der Ruhr-Universität gibt es ein neues Angebot zum Klima in Zusammenarbeit mit dem Fach Geografie. Hier besteht ein erhöhter Bedarf an bilingual-chemischen Schülerlaboren. Das vorliegende Dissertationsprojekt soll helfen, diese bestehenden Lücken zu schließen.

Abschnitt B – fachdidaktische Vorüberlegungen und Konzeptentwicklung

4. Bilinguales Modul “What to do with CO₂? A bilingual lab sequence”

Im konzeptionellen Teil dieser Arbeit wird in Anlehnung an die schulexperimentell-konzeptionelle Entwicklungsforschung [21, S.57] die innovative Thematik CCS gemäß der Grundsätze der curricularen Innovationsforschung (vgl. 4.3.2) schrittweise didaktisch für ein bilingual-englisches Schülerlaborangebot aufbereitet.

Nach einer Analyse der bildungspolitischen Rahmenbedingungen (vgl. 4.1), werden die vorausgesetzten Vorkenntnisse und Lernschwierigkeiten der Lernenden evaluiert (vgl. 4.2). Daran anschließend werden der Aufbau der Schülerlaborsequenz (vgl. 4.3), die Auswahl von geeigneten Experimenten (vgl. 4.4) und die Materialentwicklung (vgl. 4.5) beschrieben. Außerdem werden in jedem Teilkapitel theoretisch-konzeptionelle Fragenstellungen formuliert und beantwortet.

4.1 Bildungspolitische Rahmenbedingungen

In den folgenden Unterkapiteln 4.1.1-4.1.4 sollen die bildungspolitischen Rahmenbedingungen dargestellt werden. Es wird angestrebt, CCS als Thematik bildungspolitisch zu verorten, den Stellenwert der Technologie in schulischen Lehrwerken zu analysieren und eine mögliche Umsetzung im Bildungskonzept BNE zu evaluieren. Die gewonnen Erkenntnisse sollen zur Beantwortung der folgenden konzeptionellen Fragestellungen (F) beitragen:

(F1) Wie kann die Thematik CCS für den (bilingualen) Chemieunterricht laut Bildungsstandards und Kernlehrplan verortet werden?

(F1.1) In welchen thematischen Zusammenhängen wird CCS angeführt?

(F2) Wie groß ist der Stellenwert der Thematik CCS in den untersuchten Schullehrwerken?

(F2.1) In welchen thematischen Zusammenhängen wird CCS angeführt?

(F3) Welche Möglichkeiten bietet das Bildungskonzept Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) zur Thematisierung von CCS?

4.1.1 Vorgaben für das Fach Chemie

Bundesländerübergreifend gelten in Deutschland die Bildungsstandards der einzelnen Fächer. Da das intendierte Schülerlabormodul für die Oberstufe konzipiert werden soll, bezieht sich diese Arbeit nur auf die Inhalte der Bildungsstandards Chemie für die allgemeine Hochschulreife [169].

Im Fach Chemie soll die naturwissenschaftliche Kompetenz (vgl. 3.6.1) mit Hilfe der vier Kompetenzdimensionen Sachkompetenz, Erkenntnisgewinnungskompetenz, Kommunikationskompetenz und Bewertungskompetenz realisiert werden. Als Bildungsbeitrag des Faches wird außerdem das Experiment als zentrales Element genannt und die Bedeutung des Faches für den Beitrag zur sozialen, ökologischen und ökonomischen Bildung im Sinne einer BNE hervorgehoben [169, S.10-12]. Dabei nimmt die Bewertungskompetenz eine zentrale Rolle ein.

Lernende sollen befähigt werden Handlungsoptionen fachlich zu beurteilen, aber auch gesellschaftliche, persönliche und ethische Perspektiven mit einzubeziehen [169, S.17-18]. Inhaltlich lässt sich die Thematik CCS im Inhaltsbereich Lebenswelt und Gesellschaft verorten, wo u.a. aktuelle Technologien und ökonomische und ökologische Aspekte der Chemie thematisiert werden [169, S.22-23].

Um die curriculare Verankerung der Thematik CCS und deren damit verbundene Anschlussfähigkeit an den Regelunterricht zu untersuchen, wurde eine Analyse aller gymnasialer Lehrpläne in Deutschland durchgeführt. Eine detaillierte tabellarische Lehrplananalyse kann dem Anhang 1 entnommen werden.

In der Sekundarstufe I wird Kohlenstoffdioxid als Verbindung meist über die Zusammensetzung der Luft, bei der Einführung von Verbrennungsreaktionen oder im Zusammenhang mit der Vermittlung von Kohlenstoffverbindungen und natürlichen Stoffkreisläufen thematisiert. Die Lernenden beschäftigen sich mit der Nachweisreaktion von Kohlenstoffdioxid und können Aussagen über dessen Eigenschaften als Molekülverbindung treffen. In der Sekundarstufe II tritt Kohlenstoffdioxid als Verbindung besonders in Zusammenhang mit der Beschäftigung mit chemischen Gleichgewichten und dem Treibhauseffekt oder bei der Thematisierung der Verbrennung fossiler Energieträger auf.

Die Thematik Carbon Capture and Storage (CCS) wird nur im Lehrplan des Bundeslandes Schleswig-Holstein explizit erwähnt. Für die Qualifikationsphase wird dort im Sachgebiet Chemie und Umwelt Thema *Luft- und Atmosphärenchemie* behandelt. Die CCS- und CCU-Prozessketten werden im Bereich der Bewertungskompetenz als mögliche zu bewertende Handlungsoptionen der Unterrichtsreihe angegeben [195, S.50].

Umschrieben wird die Technologie außerdem im Lehrplan der SI in Rheinland-Pfalz. Im Themenbereich 11 *Stoffe im Fokus von Umwelt und Klima* wird der Kohlenstoffkreislauf behandelt. Als Vorschlag für eine Kontextorientierung werden industrielle und technologische „Senken für CO₂“ angebracht. Damit ließe sich CCS direkt verorten und anschließen [196, S.86-87]. In allen anderen 14 Lehrplänen und Rahmenvorgaben für das Gymnasium finden sich weder für die Sekundarstufe I, noch für die Sekundarstufe II explizite Nennungen oder Umschreibungen der CCS-Prozesskette.

Nichtsdestotrotz lässt sich die Thematik in allen Bundesländern curricular verorten. In den meisten Bundesländern ist dies z.B. bei der Behandlung des chemischen Gleichgewichts oder des Treibhauseffekts in der Sekundarstufe II möglich. Inhaltlich wird dabei meist auf den natürlichen Kohlenstoffkreislauf und die Versauerung der Ozeane eingegangen. Einige Bundesländer wie z.B. Berlin-Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt und Hamburg benennen Nachhaltigkeit, BNE oder Green Chemistry als weiterführende Perspektiven für die Behandlung von Fachinhalten. Als Bestandteil dieser Betrachtungen wäre eine Thematisierung und Anbindung von CCS an diese Lehrpläne möglich.

4.1.2 Vorgaben für den bilingualen Chemieunterricht

Die Situation und Zielsetzungen des bilingualen Fachunterrichts Chemie wurden bereits in Kapitel 3.6 beschrieben. Neben den zentralen, bundesweiten Richtlinien der KMK [118], existieren für den bilingualen Unterricht in NRW im Fach Chemie keine konkreten Vorgaben.

Der Unterricht kann von den Gymnasien sowohl als reguläres Fach als auch in Modulform angeboten werden [118, S.75-76]. Für alle bilingualen Lernsettings in NRW wird die Fähigkeit zum Sprachwechsel und die Etablierung einer doppelten Sachfachliteralität angestrebt [151, S.9-10].

Die zu vermittelnden Fachinhalte orientieren sich an den Vorgaben des deutschsprachigen Sachfachs. In Nordrhein-Westfalen lässt sich die Thematik CCS in das Inhaltsfeld „Reaktionsgeschwindigkeit und chemisches Gleichgewicht“ der Einführungsphase (Klassenstufe 11) verorten. Die Lernenden sollen in diesem Themenbereich u.a. lernen, anthropogene Einflüsse auf Naturkreisläufe und das Klima einzuschätzen als auch den ökonomischen und ökologischen Mehrwert von technischen Verfahren zu beurteilen [197, S.19, 31].

Als Planungsgrundlage für eine Lernumgebung bietet das Land NRW eine Handreichung für das Fach Biologie [198] an, eine Handreichung für das Fach Chemie existiert nicht. Auf Grund dieser Rahmenbedingungen werden die ersten didaktischen Planungsgrundlagen auf Basis des international, anerkannten 4C-Frameworks erstellt (vgl. 3.2, 4.3.1). Die Detailplanung wird dann orientiert an den bundeslandspezifischen Vorgaben des Landes NRW mit Hilfe der Handreichung des Faches Biologie vorgenommen. Darüber hinaus wird sich aus dem Kontext der didaktischen Publikationen zu bilingualem (Chemie-)Unterricht (vgl. 3.4 und 3.6.2) orientiert.

4.1.3 Untersuchung ausgewählter Schulbücher

Um die schulische Relevanz und Verbreitung der Thematik CCS einordnen zu können, wurde zu Beginn des Projektes eine Untersuchung ausgewählter Lehrwerke und später auch eine Untersuchung bereits bestehender Lernmaterialien (vgl. 4.5.1) durchgeführt. Diese Analysen sollten eine erste Orientierung und einen Ausgangspunkt für die didaktische Konzeption bieten.

Da ein konkretes Lehrwerk für den bilingualen Chemieunterricht bisher in Deutschland nicht existiert (vgl. 3.6.3), wurden deutsche und englischsprachige Chemielehrwerke untersucht. Dabei wurde quantitativ vorgegangen und das Vorkommen der Thematik *Carbon Capture and Storage* untersucht.

Deutschsprachige Lehrwerke

Orientiert an den Vorgaben des Landes Nordrhein-Westfalens, wurden insgesamt 26 zugelassene Schulbücher der Sekundarstufen I und II für die Schulform Gymnasium und Gesamtschule gesichtet. Auf Grund der Umstellung von achtjährigen (G8) auf neunjährige (G9) Bildungsgänge wurden in den letzten Jahren eine Vielfalt an verschiedenen Schulbüchern veröffentlicht.

In der Analyse wurden sowohl Lehrwerke aus G8, als auch aus den aktuellen G9-Jahrgängen untersucht (vgl. Tabelle 15). Die Bücher erschienen zwischen den Jahren 2008 und 2023.

Tabelle 15. Übersicht der ausgewählten deutschen Schulbücher

Sekundarstufe I	Sekundarstufe II
Chemie heute <ul style="list-style-type: none"> • Gesamtausgabe, Kl.7-9(10), Schroedel Verlag, 2013. • Chemie heute 1, G9 NRW Kl.7-8, Westermann Verlag, 2020. • Chemie heute Gesamtband, G9 NRW, Westermann Verlag, 2023. 	Elemente Chemie Oberstufe <ul style="list-style-type: none"> • Einführungsphase, G8 NRW, Klett Verlag, 2014. • Elemente Chemie Oberstufe, G8 NRW, Klett Verlag, 2015. • Elemente Chemie Oberstufe, G9 NRW, Klett Verlag, 2023.
Fokus Chemie Gymnasium <ul style="list-style-type: none"> • Gesamtband Sekundarstufe I, G8 NRW, Cornelsen Verlag, 2008. • Gesamtband Sekundarstufe I, G9 NRW, Cornelsen Verlag, 2022. 	Chemie 2000+ <ul style="list-style-type: none"> • Einführungsphase, G8 NRW, Buchner Verlag, 2012. • Qualifikationsphase, G8 NRW, Buchner Verlag, 2015.
Elemente Chemie <ul style="list-style-type: none"> • G8 NRW Kl.7-9, Klett Verlag, 2009. • G9 NRW Kl.7-10, Klett Verlag, 2020. 	Chemie heute <ul style="list-style-type: none"> • Einführungsphase, G8 NRW, Schroedel Verlag, 2014. • Qualifikationsphase, G8 NRW, Schroedel Verlag, 2014. • Sekundarstufe II, Gesamtband, Schroedel Verlag, 2018. • Chemie heute, G9 NRW Gesamtband SII, Westermann Verlag, 2020.
Chemie 2000+ Sekundarstufe I, Kl.7-9(10), Buchner Verlag, 2010.	Chemie <ul style="list-style-type: none"> • Einführungsphase. G9 NRW, Buchner Verlag, 2022. • Qualifikationsphase. G9 NRW, Buchner Verlag, 2023.
Neo Chemie Gesamtband SI G8 NRW Kl.7-9, Schroedel Verlag, 2015.	Chemie Oberstufe Gesamtband G8 NRW, Cornelsen, 2010.
Chemie G9 NRW Gesamtband, Sekundarstufe I, Buchner Verlag, 2019.	Fokus Chemie <ul style="list-style-type: none"> • Einführungsphase, NRW SII, Cornelsen Verlag, 2023. • Qualifikationsphase, NRW SII, Cornelsen Verlag, 2023.
Blickpunkt Chemie Gesamtband 7-10. Westermann Verlag, 2023.	
Erlebnis Naturwissenschaften 1 G9 NRW, Westermann Verlag, 2021.	

In den untersuchten Lehrwerken der Sekundarstufe I finden sich bis auf eine Ausnahme (vgl. Abbildung 78) keine inhaltlichen Bezüge zu CCS. In den Themenbereichen chemische Reaktion, Verbrennungen, Luft und Wasser, Säuren und Basen sowie Treibstoffe wird Kohlenstoffdioxid stattdessen als Verbindung thematisiert. Es werden eine Vielzahl von möglichen Versuchen erwähnt, im Besonderen aber Experimente zur sauren Reaktion von Kohlenstoffdioxid, zur Kalkwasserprobe, zur Zersetzung von Kalk und zum Treibhauseffekt.

Erneuerbare Energierohstoffe

Erneuerbare Energierohstoffe wie Holz, Biodiesel oder Alkohol haben den Vorteil, dass die Natur sie immer wieder nachliefert. Außerdem sind sie biologisch abbaubar. Das CO_2 , das bei der Verbrennung anfällt, haben sie beim Wachsen aus der Luft entnommen. Dennoch stellen sie keine echte Lösung des Problems dar. Nachteile sind:

- Ökologisch ungünstige Monokulturen
- Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion
- riesiger Flächenbedarf, Gefahr der Abholzung tropischer Regenwälder
- hoher Bedarf an Dünger und Pflanzenschutzmitteln
- hoher Energiebedarf für Anbau und Transport.

Energie aus Abfällen

Sehr sinnvoll ist die energetische Nutzung von Abfällen aus der Landwirtschaft und der Lebensmittelindustrie. Aus ihnen lässt sich ebenso wie bei Klärschlamm aus Kläranlagen mit biologischen Methoden Methan gewinnen. Damit kann man allerdings nur einen kleinen Teil des Energiebedarfs decken.

CO_2 speichern oder binden?

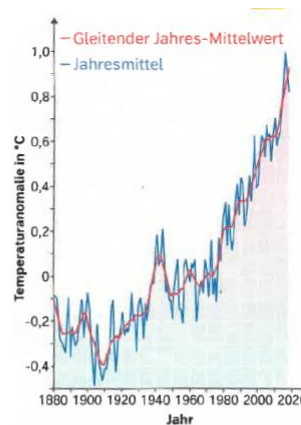
Einige Klimawissenschaftler halten es für sinnvoll, CO_2 aus der Industrie unterirdisch zu speichern, damit es nicht in die Atmosphäre gelangt. Vor allem die Stahl-, Zement und Chemie-Industrie ist daran interessiert. Dort könnte man das CO_2 direkt an der Quelle auffangen und in ehemaligen Erdgas-Lagerstätten speichern. Viele Umweltschützer bewerten diese Methode kritisch. Sie befürchten,

dass das gespeicherte Gas dennoch unbemerkt austreten kann und dann doch in die Atmosphäre gelangt. Auf Island erprobt man in einer Anlage, CO_2 aus der Luft chemisch an ein Gestein zu binden. Das CO_2 wird zunächst aus der Luft herausgefiltert, in Wasser gelöst und dann unterirdisch in poröses Basaltgestein gepresst. Im Laufe der Zeit soll das CO_2 dort mit Calcium-, Magnesium- und Eisen-Ionen zu festen Carbonaten reagieren – und so chemisch fest gebunden werden.

Die starke Nutzung von fossilen Energieträgern hat zu einem starken Anstieg von Treibhausgasen in der Luft geführt.

A Beschreibe die Ursachen des weiter steigenden Energiebedarfs weltweit.

B Erkläre, wie man CO_2 speichern oder binden könnte.



4 Temperaturveränderung (weltweit, Mittelwerte)

Material mit Aufgaben

M1 CO_2 -Ausstoß weltweit

1. Welche Informationen kannst du dieser Abbildung entnehmen?
2. Beurteile, welche Länder viel CO_2 einsparen sollten.

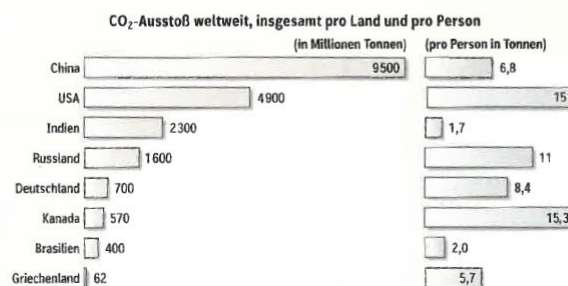
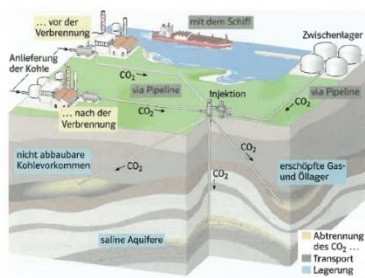


Abbildung 78. Lehrwerkseite zu CCS aus Blickpunkt Chemie Gesamtband Sekundarstufe I ¹⁴⁴

In der Sekundarstufe II lässt sich eine klare Verortung der Thematik im Bereich chemisches Gleichgewicht und Stoffkreisläufe feststellen. Als Themenschwerpunkte werden dabei unter anderem der Kohlenstoffkreislauf, der Treibhauseffekt, der Einfluss von Kohlenstoffdioxid auf das Klima, der Kalkkreislauf, die Versauerung der Meere und die erneuerbaren Energien angesprochen. Innerhalb der Oberstufe liegt der Schwerpunkt auf der Einführungsphase (G8: Klasse 10, G9: Klasse 11). In fünf der 25 untersuchten Lehrwerke findet sich die CCS-Technologie mit einer konkreten Informationsseite wieder. Die in Abbildung 79 ausgewählten Beispiele sind als Exkurse der behandelten Themengebiete gekennzeichnet, die die theoretischen Hintergründe der Prozesskette erläutern.

¹⁴⁴ Abbildung Lehrwerkseite SI: [199, S.343].

3.11 Speicherung – eine Lösung des CO₂-Problems?



B1 CO₂-Abtrennung und -Lagerung. Bei der Abtrennung vor der Verbrennung (IGCC-Technologie) erzeugt man zuerst Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid aus Kohle, Sauerstoff und Wasser und verbrennt anschließend Wasserstoff in einer Gasturbine.

IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle. In etwa Kombi-Prozess mit integrierter Vergasung.

CCS: Die Speicherung von Kohlenstoffdioxid wird auch als CCS (carbon capture and storage) bezeichnet.

Mehr als 60% der globalen CO₂-Emission stammt aus Kraftwerken zur Strom- und Wärmeerzeugung, Zementwerken und der Eisen- und Stahlproduktion [B2]. Für diesen Anteil des anfallenden Kohlenstoffdioxids bietet sich die Speicherung im Boden als mögliche Alternative an.

Forschung. Bereits im Jahr 2004 begann man mit der Erforschung der Kohlenstoffdioxid-Speicherung im Boden. Man erkannte, dass trotz der Steigerung der Effektivität der Stromerzeugung sowie des Einsatzes erneuerbarer Energiequellen der Ausstoß von Kohlenstoffdioxid noch wesentlich zu hoch ist.

Um das aus dem Abgas abgetrennte Kohlenstoffdioxid im Boden speichern zu können, sind bestimmte geologische Gegebenheiten erforderlich. Als Speicher können z.B. ehemalige Erdöl- und Erdgasspeichergesteine oder saline Aquifere dienen [B1]. Hierbei handelt es sich um unterirdische Sandsteinschichten, deren Poren wie ein Schwamm wirken können. In den Poren der salinen Aquifere fließt salzhaltiges Wasser, sie sind umschlossen von auch für Gase undurchlässigen Tonsschichten.

Sektor	Emission in %
Strom und Wärme	42
Verkehr	24
Industrie	19
Haushalte	6
Andere	9
Gesamte globale Emission:	34,4 Gigatonnen CO ₂

B2 Globale CO₂-Emission nach Sektoren (2017)

Speicherung. Zur Erdgas- und Erdölförderung wird Kohlenstoffdioxid schon seit langem verwendet, um das Fördergut mit höherem Druck aus dem Speichergestein zu holen. Die Speicherung des eingebrachten Kohlenstoffdioxids war hier nur ein Nebeneffekt. Die heutige Forschung hat das Ziel, große Mengen Kohlenstoffdioxid dauerhaft in der Erde zu speichern. Zu Forschungszwecken sind bereits mehrere Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid in einem Erdgasfeld in Norwegen und in Brandenburg in die Erde gepresst worden. In Brandenburg befinden sich große salzwasserführende Gesteinsschichten. Der größte Teil des hierin eingebrachten Kohlenstoffdioxids löst sich, wie man es vom Mineralwasser kennt, zunächst im Salzwasser. Gegenstand der Forschung ist, ob im Laufe mehrerer Jahre das gelöste Kohlenstoffdioxid mit dem umliegenden Gestein reagiert, d.h., ob es mineralisiert wird.

Warum Kohlenstoffdioxid-Speicherung?

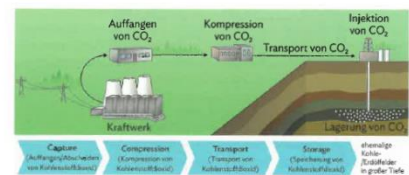
Nach Schätzungen der Internationalen Energieagentur (IEA) wird die Nachfrage nach Energie in den kommenden Jahrzehnten steigen. Auch weiterhin werden trotz des verstärkten Einsatzes regenerativer Energieerzeugung die fossilen Rohstoffe Kohle, Erdgas und Erdöl eine wesentliche Rolle spielen. Da die Belastung der Atmosphäre mit einer erhöhten Kohlenstoffdioxid-Konzentration dringend verringert werden muss, ist es notwendig, das beim Verbrennen fossiler Energieträger erzeugte Kohlenstoffdioxid zu „beseitigen“. Bis 2050 können nach Schätzungen des Weltklimarates zwischen 220 Milliarden und 2200 Milliarden Tonnen Kohlenstoffdioxid unter der Erde oder im Meer gelagert werden. Mithilfe von CCS wäre es möglich, einen großen Teil der weltweiten CO₂-Emission nicht in die Atmosphäre gelangen zu lassen.

Kohlenstoffdioxid aus Verbrennungsreaktionen kann in unterirdischen Speichern gelagert werden.

FAI Recherchieren Sie im Internet zum Stand der Forschung zur CCS und beziehen Sie begründete Stellung.

4.1.5 Carbon Capture, Storage and Utilisation

So groß das Problem der Kohlenstoffdioxidemissionen in der Atmosphäre ist, so groß sind die Bemühungen und Visionen, Kohlenstoffdioxid zu fixieren oder als Rohstoff nutzbar zu machen. Wie funktioniert das?



B1 Vereinfachte Prozesskette des CCS-Konzepts

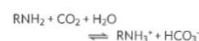
Unter **Carbon Capture and Storage (CCS)** versteht man allgemein das Abscheiden von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre und dessen vollständige und dauerhafte Speicherung im Untergrund, an Land oder am Meeresgrund (B1). Im Unterschied dazu hat **Carbon Capture and Utilisation (CCU)** zum Ziel, das abgeschiedene Kohlenstoffdioxid durch eine chemische Umwandlung in andere Verbindungen zu überführen und diese als Energieträger nutzbar zu machen.

Die Zielsetzung der Technik ist die Entlastung der Atmosphäre und die Verringerung der weiteren Beschleunigung der Erderwärmung. Optimistisch wird davon ausgegangen, dass durch CCS 60–85% der Kohlenstoffdioxidemissionen aus fossilen Energieversorgungsanlagen, Industrieanlagen oder aus dem Einsatz von Biomasse zum Zweck der Energieversorgung dauerhaft zurückgehalten werden könnten. In wie weit diese Werte technisch erreichbar und umsetzbar sind, wird im Moment in verschiedenen Pilotprojekten und Testanlagen erforscht. Viele davon werden dabei von Konzernen der fossilen Brennstoffförderung unterstützt oder finanziert.

Abscheidemethoden

Meist ist die Abscheidung des Kohlenstoffdioxids aus den Abgasen von Verbrennungsanlagen verschiedener Art der eigentlichen Verbrennung nachgeschaltet und ist damit ein Teil

der Aufreinigung. Das Verfahren wird deshalb auch als **Post-Combustion-Capture** bezeichnet. Es befinden sich unterschiedliche Verfahren in verschiedenen Anlagen in Erprobung. Großtechnisch bereits betrieben wird die sogenannte **Aminwäsche**, bei der die entstehenden Abgase zuerst bei leicht erhöhtem Druck (8 bar) und niedrigen Temperaturen (40 °C) im Absorber über Träger mit feinen Tröpfchen wässriger, leicht basischer Aminlösung (meist Monoethanolamin MEA) geleitet werden. Kohlenstoffdioxid wird chemisch absorbiert, wobei **Carbamate RNHCOO⁻** und bzw. oder Hydrogencarbonat und jeweils ein protoniertes MEA-Kation **RNH₃⁺** entstehen:



Diese Reaktionen sind exotherm. Das gereinigte Verbrennungsgasgemisch verlässt den Absorber und das beladene Waschmittel wird weiter in den Desorber geleitet. Hier wird die Lage des chemischen Gleichgewichts durch eine Erhöhung der Temperatur und eine gleichzeitige Erniedrigung des Drucks auf die Seite der Edukte verschoben und die Reaktion somit

umgekehrt. Nach einer sich anschließenden Aufreinigung und Aufkonzentration des noch feuchten Gases kann es zur Weiterverwendung oder Endspeicherung weitergeleitet werden. Alle Waschverfahren haben einen hohen Energiebedarf. Dieser senkt den Wirkungsgrad des Kraftwerks (bei Kohlekraftwerken um etwa 6–12%) und erhöht den damit verbundenen Brennstoffbedarf. Besonders in Kohlekraftwerken kann eine Kohlenstoffdioxidabscheidung nach dem **Integrated Gasification Combined Cycle** (dt. Kombiprozess mit integrierter Vergasung, **IGCC-Prinzip**) kombiniert erfolgen (B2). In solchen Kraftwerken verbrennt man Kohle nicht direkt zu Kohlenstoffdioxid, sondern wählt eine mehrstufige Prozessführung. Die Kohle reagiert in einem ersten Schritt (**Vergasung**) mit Wasser zu Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid. Nach einer Aufreinigung wird letzteres mithilfe von Katalysatoren mit Wasserdampf in der „**Shift-Reaktion**“ zu Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff umgesetzt. Das dann sehr reine Gasgemisch wird anschließend getrennt. Kohlenstoffdioxid wird abgeschieden und verflüssigt. Der fast reine Wasserstoff kann zur Energiebereitstellung, z. B. für den Antrieb einer Gasturbine, verbrannt

Abbildung 79. Lehrwerkseiten Sekundarstufe II zu CCS: (links) Elemente Chemie, (rechts) Chemie Qualifikationsphase¹⁴⁵

Englischsprachige Lehrwerke

Die Auswahl der englischsprachigen Lehrwerke für die Untersuchung hing sehr stark von deren Verfügbarkeit ab. Die Mehrzahl der Veröffentlichungen stammt aus dem Vereinigten Königreich und die meisten Lehrwerke sind für die Mittel- und Oberstufe konzipiert. Die fünfzehn analysierten Lehrwerke sind zwischen den Jahren 2005 und 2018 erschienen (vgl. Tabelle 16).

¹⁴⁵ Abbildung Lehrwerke SII: (links) [200, S.144], (rechts) [201, S.234].

Tabelle 16. Übersicht der ausgewählten englischen Schulbücher

Vereinigtes Königreich	Vereinigte Staaten von Amerika
New Edition: Chemistry key stage 4, Cambridge University Press, UK 2005.	Pearson Chemistry (Teacher's Edition) Pearson, USA, 2017.
Chemistry for Edexcel International GCSE International GCSE 9-1, Hodder Education, UK, 2017.	Chemistry in the community (6th edition) American chemical society, USA, 2012.
A-Level Chemistry Exam Board: AQA Student Book Coordination Group Publications, UK, 2018.	Australien
A-Level Chemistry Edexcel A Level 1 Hodder Education, UK 2015.	Nelson Chemistry Units 1&2 for the Australian Curriculum Nelson Cengage Learning, AUS, 2015.
Complete chemistry for Cambridge Secondary 1, Oxford University Press, UK, 2013.	Nelson Chemistry Units 3&4 for the Australian Curriculum Nelson Cengage Learning, AUS, 2015.
Chemistry (MYP 4&5), Hodder Education, UK, 2018.	
Sciences (MYP 3) Hodder Education, UK, 2017.	
Chemistry for you Oxford University Press, UK, 2016.	
Advanced Chemistry for you Oxford University Press, UK, 2015.	
Science for EAL/ESL/E2L students Oxford University Press, UK, 2018.	
Combined Science Trilogy AQA GCSE (9-1) Hodder Education, UK, 2016.	

Die englischen Lehrwerke unterscheiden sich in Layout, Struktur und thematischer Schwerpunktsetzung stark von den deutschen Lehrwerken. In der Mehrzahl der Veröffentlichungen werden die Inhalte sehr theoretisiert vermittelt. Trotz der teilweise farbenfrohen Gestaltung, enthalten die meisten Lehrwerke sehr wenige Versuchsbeschreibungen, meist zu Standardversuchen (z.B. Herstellung von Kohlenstoffdioxid aus Brausetabletten) und Nachweisreaktionen (z.B. Glimmspan- und Kalkwasserprobe). Kohlenstoffdioxid wird in Themenbereichen wie Luft, Klima, Kohlenstoffkreislauf und Verbrennungen thematisiert. Carbon Capture and Storage wird hauptsächlich beiläufig bei der Behandlung von Umweltthematiken oder dem Kohlenstoffkreislauf angeführt. In drei der fünfzehn analysierten Lehrwerke wird der Technologieoption eine separate Informationsseite gewidmet (vgl. Abbildung 80).

Die Seiten beinhalten einen kurzen Informationstext zur Erklärung von CCS und eine Abbildung zum Ablauf des Verfahrens. Experimente für Lernende werden in keinem der Lehrwerke vorgeschlagen.

Thinking of solutions

To tackle the problem of global climate change, levels of greenhouse gases must be controlled. We should all be thinking of ways to reduce our **carbon footprint**, i.e. reduce the amount of CO₂ and other greenhouse gases our lifestyle contributes to.

Most electricity is generated by burning fossil fuels, which releases carbon dioxide into the atmosphere. One idea is to pump the carbon dioxide produced underground to be absorbed into porous rocks. This could be done in depleted oil fields, unworkable coal seams or saline aquifers (porous rock soaked in salty water). The technique is called **carbon capture and storage (CCS)**. It would inevitably increase the cost of electricity for consumers.

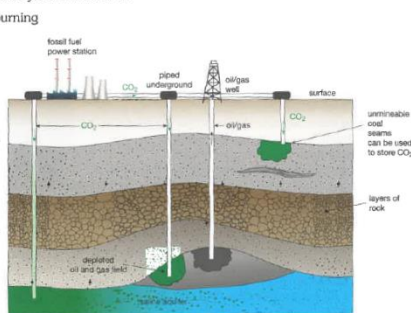
World leaders meet regularly to negotiate limits on greenhouse emissions. Many governments are taking action, for example, by taxing fossil fuels and uneconomical cars and by funding research into alternative sources of energy.

Governments can also encourage the use of **biofuels**. Biofuels made from plant material absorb carbon dioxide during photosynthesis. So when they are burned, they are just returning that CO₂ to the atmosphere.

However, setting targets for the reduction of greenhouse gas emissions has not been easy. Reductions could hinder the developing industries in poorer countries.

How can we help?

On a personal level, we can use less electricity. This will reduce fossil fuel consumption in power stations and less CO₂ will be released into the atmosphere. People could also use their cars less. Walking and cycling will not only make you healthier, but will reduce emissions. If you need to drive, it is more efficient to share lifts, or to use public transport. You can also try to recycle more of your waste. On page 162 you can read about the energy savings in recycling aluminium and iron.



Carbon capture and storage – a possible technique for storing CO₂ gas in underground rocks (the CO₂ is coloured green in this diagram to show its location)

The absorber is a liquid such as an amine that captures the carbon dioxide. Once the carbon dioxide is removed from the gases, the absorber is cleaned by removal of the carbon dioxide so the amine liquid can be re-used. The carbon dioxide is then converted to a liquid through cooling and compression and is geologically stored. The process can be seen in Figure 2.23.

Geological storage of carbon dioxide occurs in Australia in a number of electricity plants in New South Wales, Victoria and Queensland. The companies, in collaboration with government and scientific organisations, are conducting pilot studies to measure efficiency and improve the methods used. Liquid carbon dioxide from post-combustion capture is pumped underground into sandstone rock. This rock is porous, meaning it has spaces in the rock where the liquid can be stored. The porous sandstone is surrounded by a non-porous rock, which seals the liquid in the sandstone so it cannot escape.

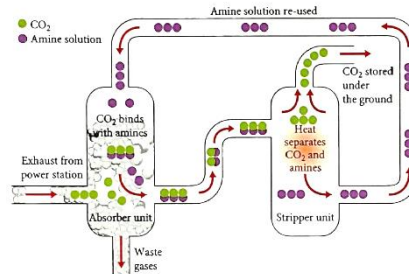


Figure 2.23 Process of post-combustion carbon capture

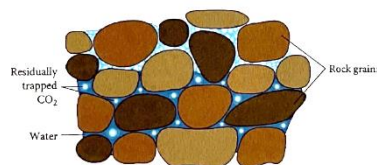


Figure 2.24 Carbon dioxide liquid stored in rock

Acid rain

Many metals are refined from sulfide minerals, such as zinc sulfide and copper sulfide. During the refining process, sulfur is removed from the mineral, often by roasting with oxygen. The



Abbildung 80. Englische Lehrwerkseiten zu CCS: (links) Chemistry for you, (rechts) Nelson Chemistry ¹⁴⁶

4.1.4 Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE)

Unter dem Begriff *Education for Sustainable Development* (ESD) bzw. Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) versteht man ein ganzheitliches, fächerübergreifendes Bildungskonzept, das Bildung als Voraussetzung der Nachhaltigkeitsförderung versteht. Die kritische Auseinandersetzung mit nachhaltiger Entwicklung ist ebenso eine Zielsetzung wie die Fähigkeit, Verständnis für die Auswirkungen des eigenen Handelns zu entwickeln. Lernende sollen befähigt werden, bei sich selbst und anderen Menschen, Handlungen und Denkprozesse anzustoßen. Darüber hinaus sollen sie in der Lage sein, zukunftsfähige und reflektierte Entscheidungen im Themenbereich Nachhaltigkeit zu treffen [204, S.27]. Dazu gehört auch die Fähigkeit, Handlungsoptionen und Empfehlungen zu sehr komplexen Themen zu formulieren, zu denen teilweise nur unvollständige bzw. unzureichende Informationen vorliegen [205, S.142]. Um dies zu erreichen, müssen Lernende besonders im Bereich System-, Gestaltungs- und Bewertungskompetenz geschult werden [206, S.86].

In diesem Teilkapitel wird kurz auf die zentralen bildungspolitischen Programme auf internationaler und nationaler Ebene eingegangen, die die Rahmenbedingungen für BNE im Bildungsbereich vorgeben. Daran schließen sich ausgewählte didaktische Ansätze für den Chemieunterricht an. Abschließend folgen Schilderungen zu Herausforderungen bei der Umsetzung von BNE.

¹⁴⁶ Abbildung englische Lehrwerke: (links) [202, S.34], (rechts) [203, S.47].

Internationale Rahmenprogramme

Im internationalen Diskurs wurde BNE das erste Mal im Jahr 2002 im Rahmen der Weltdekade BNE in Johannesburg als Bildungskonzept debattiert und implementiert [207]. In den Jahren 2005-2014 wurde die UN-Dekade Bildung für nachhaltige Entwicklung ausgerufen, die die Ausweitung des Bildungskonzeptes auf Aktivitäten in Schulen und anderen Bildungsbereichen vorsah. Im September 2015 wurden von der UN-Vollversammlung 17 globale Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Development Goals, SDGs) als Teil der Agenda 2030 verabschiedet (vgl. Abbildung 81) [207]. Die SDGs bilden den weltweit gültigen Referenzrahmen zur Umsetzung und Weiterentwicklung nachhaltiger Entwicklung [208, S.3]. Jedes der 17 Ziele hat noch weitere ausdifferenzierte Unterziele, die den UN-Mitgliedsstaaten den nötigen Handlungsbedarf in Bereichen wie Bildungsgerechtigkeit, Umweltschutz und dem Kampf gegen den Welthunger aufzeigen. Bis zum Jahr 2030 sollen möglichst viele der global bestehenden Herausforderungen bewältigt werden.



Abbildung 81. Sustainable Development Goals (SDGs)¹⁴⁷

Ein zentrales Ziel ist dabei SDG 4 - hochwertige Bildung [engl. *quality education*]. Der Bildungsbereich wird als wesentlicher Faktor einer nachhaltigen Entwicklung verstanden. Im Unterziel 4.7 steht dazu:

„By 2030, ensure that all learners acquire the knowledge and skills needed to promote sustainable development, including, among others, through education for sustainable development and sustainable lifestyles, human rights, gender equality, promotion of a culture of peace and non-violence, global citizenship and appreciation of cultural diversity and of culture’s contribution to sustainable development.“ [209]

Neben dem Bildungsziel der Vermittlung von nachhaltiger Entwicklung mit Hilfe von BNE, ist die Umsetzung von nachhaltiger Entwicklung in den Lebensrealitäten der Lernenden als zukünftige WeltbürgerInnen von zentraler Bedeutung.

¹⁴⁷ Abbildung SDGs: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/news/communications-material/> (letzter Zugriff 09.02.25).

Nationale Rahmenprogramme

Die Verankerung von BNE im deutschen Bildungssystem wurde durch den Nationalen Aktionsplan BNE 2017¹⁴⁸ ermöglicht. Die Kultusministerkonferenz stellte als Beitrag den Orientierungsrahmen Globale Entwicklung vor. In dessen zweiter Auflage aus dem Jahr 2015 wird explizit die strukturelle Verankerung von BNE als Aufgabe der Bildungsinstitutionen formuliert [210, S.86]. Der Orientierungsrahmen soll zur Konzeption von Lehrplänen, Fortbildungen und Schullehrwerken verwendet werden. Darin findet sich auch das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung, an dem sich Bildungsziele mehrdimensional ausrichten sollen (vgl. Abbildung 82). Die Orientierung an diesem Leitbild ist eine von fünf Leitideen des Orientierungsrahmens. Darüber hinaus werden die Fähigkeit zum Perspektivwechsel, die Lebenswelt- und Kontextorientierung, der Umgang mit Vielfalt und die Analyse von Entwicklungsprozessen als zentrale Ideen angeführt [210, S.87].

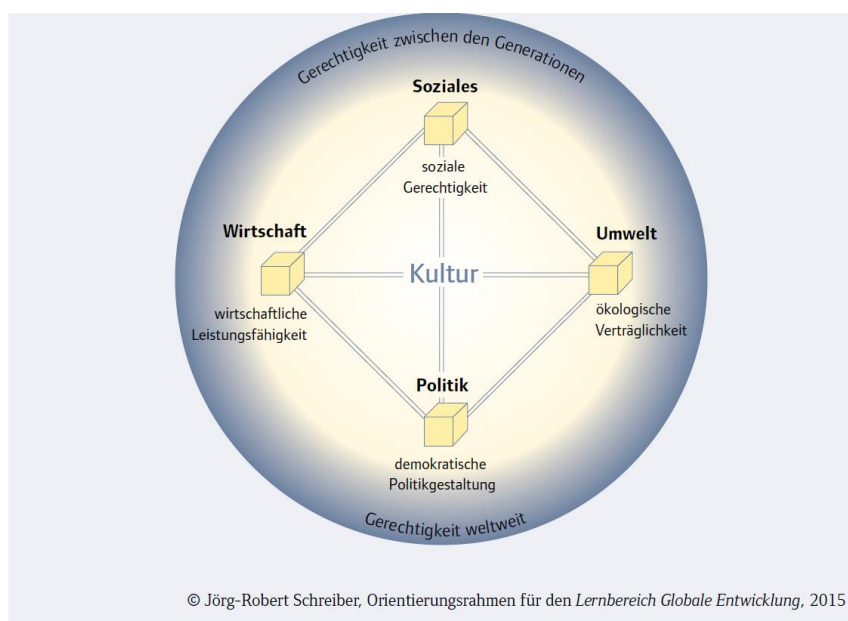


Abbildung 82. Leitbild der nachhaltigen Entwicklung¹⁴⁹

Neben den fünf Leitideen werden zusätzlich drei allgemeine Kompetenzbereiche vorgegeben. Die Lernenden sollen *erkennen*, *bewerten* und *handeln* können [210, S.90-95]. Um die Anschlussfähigkeit an alle Lehrpläne zu gewährleisten, werden Beispielthemen vorgeschlagen, die eine Umsetzung in allen Bundesländern ermöglichen [210, S.341]. Für den naturwissenschaftlichen Unterricht werden 21 Themenbereiche mit Beispielthemen vorgeschlagen. Beispielfhaft seien Thema 10 *Chancen und Gefahren des technologischen Fortschritts* (Wasserstoff, Fracking, Kernenergie) und Thema 11 *Globale Umweltveränderungen* (Klimawandel, Erhalt biologischer Vielfalt) erwähnt [210, S.343].

Im Jahr 2024 wurden von der KMK weiterführende Empfehlungen zu BNE in der Schule veröffentlicht. In dem Papier, werden Kriterien für die Unterrichtsentwicklung von BNE aufgestellt (vgl. Abbildung 83).

¹⁴⁸ https://www.bne-portal.de/bne/de/nationaler-aktionsplan/nationaler-aktionsplan_node.html (letzter Zugriff 10.12.24).

¹⁴⁹ Abbildung Leitbild der nachhaltigen Entwicklung: [210, S.87].

Neben der Förderung von kooperativen Lernformen und systemischem Denken, sollen mehrperspektivische und mehrdimensionale Betrachtungsweisen gefördert und berücksichtigt werden. Die gewählten Unterrichtsinhalte sollten Bezüge zu den SDGs aufweisen und gesellschaftliche Herausforderungen thematisieren [211, S.9].

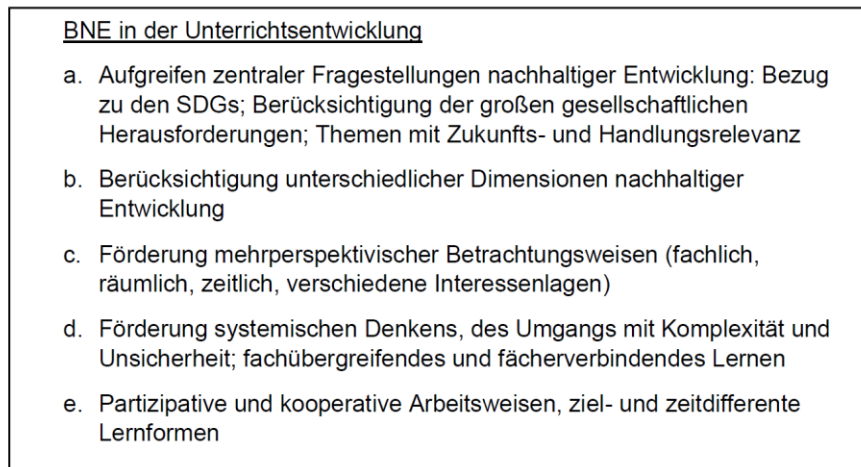


Abbildung 83. BNE in der Unterrichtsentwicklung¹⁵⁰

Auf der Ebene der Bundesländer gibt es zahlreiche Bestrebungen, BNE in den Unterricht zu integrieren. Nordrhein-Westfalen hat beispielsweise im Jahr 2019 eine Leitlinie BNE NRW veröffentlicht [186]. Die Förderung von mehrdimensionalen Betrachtungsweisen wird durch das Dimensionen-Modell nachhaltiger Entwicklung visualisiert (vgl. Abbildung 84). Angelehnt an das Leitbild der globalen Entwicklung aus dem Orientierungsrahmen, werden die fünf Dimensionen (Politik, Ökologie, Ökonomie, Soziales, Kultur) mit möglichen Inhalten angereichert. Darüber hinaus wird die Komplexität der Themenbereiche dadurch verdeutlicht, dass viele Dimensionen Schnittmengen aufweisen und (fächer)übergreifende Betrachtungen notwendig machen.

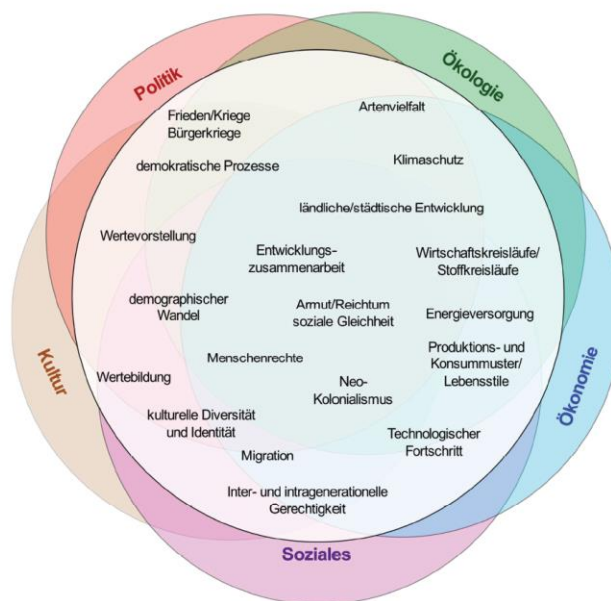


Abbildung 84. Dimensionen-Modell nachhaltiger Entwicklung¹⁵¹

¹⁵⁰ Abbildung BNE in der Unterrichtsentwicklung: [208, S.9].

¹⁵¹ Abbildung Dimensionen-Modell nachhaltiger Entwicklung [186, S.18].

In der Leitlinie werden MINT-Fächer, Geschichte, Politik und Philosophie für mögliche Lerngelegenheiten vorgeschlagen. Sprachliche Fächer sind in der Leitlinie nicht mitgedacht. Dieser Trend ist in allen Bundesländern zu beobachten. Im Mentoring Bericht zu BNE aus dem Jahr 2022 sprechen die Herausgebenden von einer starken Fokussierung aller Länder auf „klassische BNE-Trägerfächer“ [212, S.22]. Diese fächerspezifische Implementierung widerspricht einer umfassenden Verankerung von BNE in allen Fächern und erschwert eine fächerübergreifende Umsetzung, zum Beispiel auch von bilingualen Unterrichtsvorhaben.

Dem Fach Chemie werden vielfältige Thematiken und Fragestellungen mit BNE-Bezug zugeordnet. Neben dem Klimawandel und der Gewässerverschmutzung werden auch Recycling und mobile Energiequellen als geeignete Inhalte angebracht. Darüber hinaus erwähnt die Leitlinie NRW explizit die Einbeziehung außerschulischer Lernorte wie beispielsweise eines Schülerlabors. Lernende könnten dort unter authentischen Bedingungen experimentieren und an wissenschaftliche Arbeitsweisen herangeführt werden [186, S.35-36].

BNE-Unterrichtsansätze mit Bezug zum Fach Chemie

Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) ist mittlerweile als ein zentraler Bildungsauftrag akzeptiert und Inhalt chemiedidaktischer Diskurse. Allein im Jahr 2023 beschäftigten sich laut Trendbericht Chemiedidaktik 27% der veröffentlichten Artikel mit Thematiken in und um Nachhaltigkeit. Der Themenbereich war damit am häufigsten in deutschen Publikationen vertreten [13, S.8]. Im Trendbericht des Jahres 2024 wird Nachhaltigkeit erneut als inhaltlicher Schwerpunkt mit zunehmender Bedeutung in der experimentell-konzeptionellen Forschung benannt [213 S.12].

Chemieunterricht kann einen wichtigen Beitrag zu BNE leisten und eröffnet weitere Perspektiven einen Lebenswelt- und Alltagsbezug für Lernende herstellen. Dies könnte auch zur Steigerung des „Relevanzempfinden[s]“ [1, S.9] gegenüber dem Fach beitragen.

Zur Umsetzung von BNE-Lerngelegenheiten, gibt es in der fachdidaktischen Forschung zahlreiche Vorschläge. In dieser Arbeit werden die vier Ansätze aus dem Beitrag von Strippel und Graulich herausgestellt, weil sie Möglichkeiten zur Einbindung von BNE in den Chemieunterricht aufzeigen [214, S.4-5]. Zu den Umsetzungsformen gehören der grüne Experimentalunterricht, Unterricht mit Nachhaltigkeitsinhalten, Unterricht mit *Socio Scientific Issues* und Unterricht mit dem Ziel der Veränderung des Schulumfelds (vgl. Abbildung 85).

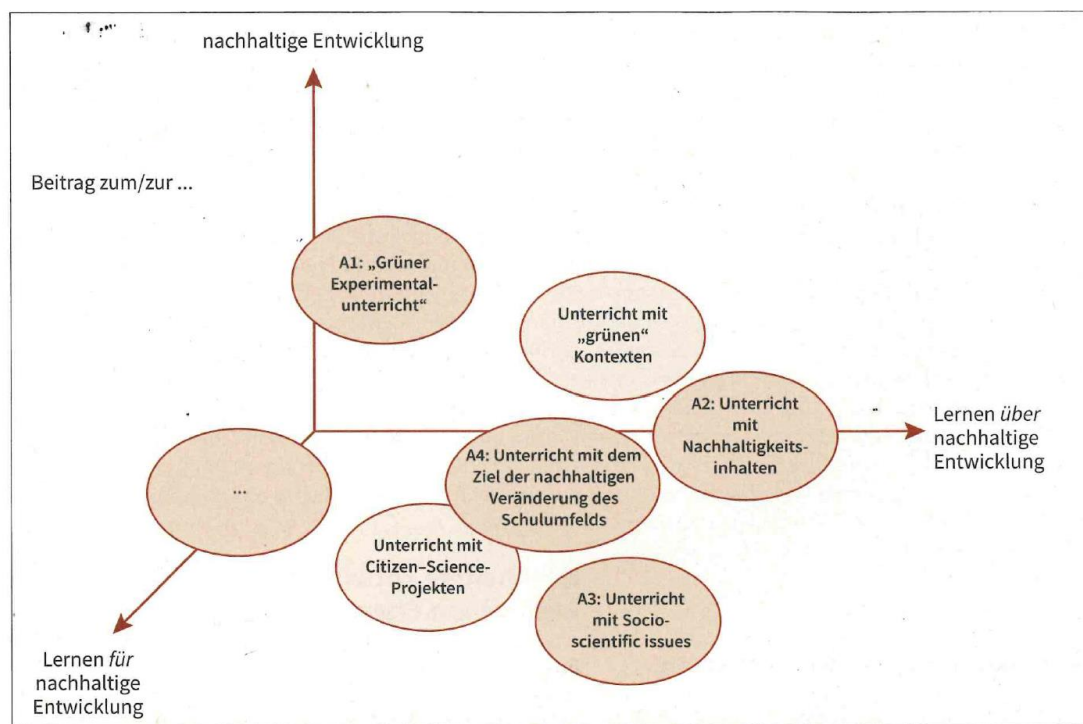


Abbildung 85. Ansätze zur Einbindung von BNE in den Chemieunterricht¹⁵²

Der erste Ansatz des grünen Experimentalunterrichts zählt zum didaktischen Konzept der Grünen Chemie [engl. *Green Chemistry*]. Der Begriff *Green Chemistry* beschreibt eine auf Anastas und Werner zurückgehende Publikation aus dem Jahr 1999, die sich mit ressourcenschonenden Synthesen und umweltschonenden Prozessen in der Chemieindustrie beschäftigte [215]. Daraus entwickelten sich die zwölf Prinzipien der Green Chemistry, die heute noch in Forschung und Industrie Anwendung finden. Im europäischen Kontext wird in diesen Zusammenhängen von *Sustainable Chemistry* gesprochen [216, S.63-64]. Im der deutschsprachigen Chemiedidaktik wird dieser Begriff unter anderem von der Arbeitsgruppe Ingo Eilks (Universität Bremen) verwendet. Diese versteht darunter einen speziellen (Forschungs)zweig von BNE, mit dessen Hilfe nachhaltige Verfahrensweisen in den Chemieunterricht integriert werden können. Dazu wurden auch Unterrichtsszenarien und Materialien z.B. zur Synthese von Polymilchsäure für den Regelunterricht an Schulen entwickelt. Exemplarisch sei hier der Artikel von Linkwitz und Eilks *Unterricht und Experimente zur Nachhaltigkeit – Green Chemistry in der Schule* genannt [217].

Der Unterricht mit Nachhaltigkeitsinhalten ist eine weitere Möglichkeit, BNE in das Fach Chemie zu integrieren. Chemische Fachinhalte werden mit Aspekten der nachhaltigen Entwicklung verbunden. Technische Verfahren, wissenschaftliche Ansätze oder Einzelaspekte wie der Einsatz von Energiesparmaßnahmen können im Unterricht thematisiert werden. Möglichkeiten der curricularen Anbindung solcher Inhalte haben Kiesling, Venzlaff und Bohrmann-Linde mit einem Verlaufsplan für die Sekundarstufe I und II aufgezeigt [218]. Jedem Inhaltsfeld des NRW-Lehrplans wurden SDGs zugeordnet und passende BNE-Kontexte benannt (vgl. Abbildung 86). In dem Beitrag konnte gezeigt

¹⁵² Abbildung Ansätze zur Einbindung von BNE im Chemieunterricht: [214, S.5].

werden, dass BNE in jedem Inhaltsfeld durch die gesamte Schulchemie integrierbar ist und sich die Inhalte auch auf Curricula anderer Bundesländer übertragen lassen [218, S.97].

Kiesling et. al. stellen außerdem ein BNE-förderndes Unterrichtsmodul *Klimawirksamkeit von Kohlenstoffdioxid und Ansätze zur Emissionsreduktion* vor, welches Lernende durch eine mehrdimensionale Vermittlung der Fachinhalte zu einer multiperspektivischen Betrachtung anleitet und in ihrer Bewertungskompetenz schult [218, S.100-101].

Sek. II	Sustainable development goals (SDGs)	Inhaltsfeld Thema Kompetenzen
EF	 	Inhaltsfeld 1: Organische Stoffklassen Aromastoffe in Lebensmitteln <i>Wirtschaftlichen und gesundheitlichen Nutzen von Lebensmittelzusatzstoffen für den eigenen Konsum bewerten</i> Eintrag von Lösemitteln in die Umwelt <i>Verwendung von Lösemitteln in Farben und Lacken beurteilen und Gefahren sowie Entsorgungsmöglichkeiten diskutieren</i>
	 	Inhaltsfeld 2: Reaktionsgeschwindigkeit und chemisches Gleichgewicht Natürlicher und anthropogener Treibhauseffekt <i>Klimawirksamkeit von Kohlenstoffdioxid und Nutzung von Kohlenstoffdioxid als Rohstoff beschreiben.</i> Katalyse in technischen Verfahren <i>Nutzen und Grenzen der Beeinflussung des chemischen Gleichgewichts bei der Ammoniaksynthese und historische Bedeutung dieses Synthesewegs für die Ernährung erläutern</i>
Q1/Q2	  	Inhaltsfeld 3: Säuren, Basen und analytische Verfahren Säuren und Basen in Alltagsprodukten <i>Wirksamkeit verschiedener Reinigungsmittel vergleichen und ihre Anwendungsgebiete beurteilen</i> Wasserqualität <i>Parameter für eine gute Wasserqualität in der Umwelt bestimmen und experimentell überprüfen</i>
	 	Inhaltsfeld 4: Elektrochemische Prozesse und Energetik Alternative Energiequellen – Wasserstoff und Elektromobilität <i>Zu politischen Impulsen zur Energiewende Stellung nehmen und den Einsatz von Wasserstoff und Strom für den Mobilitätssektor beurteilen</i>
	  	Metallkorrosion <i>Korrosionsschutzmaßnahmen unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten beschreiben und Handlungsoptionen aufzeigen</i>
		Inhaltsfeld 5: Reaktionswege in der organischen Chemie Fette in Nahrungsmitteln <i>Qualität von Fetten für eine ausgewogene Ernährung beurteilen und deren Bedeutung für Menschen in Industrie- und Entwicklungsländern erörtern</i>
	  	Power to chemicals – Methanol <i>Bedeutung von Grundchemikalien wie Methanol für die chemische Industrie erklären und alternative Synthesewege bewerten</i>
	 	Inhaltsfeld 6: Moderne Werkstoffe Kunststoff-Recycling <i>Ökonomische, ökologische und sozial Aspekte abwägen und zu Recyclingverfahren (werkstoffliches, rohstoffliches und thermisches Recycling) Stellung beziehen</i>
	 	Biologisch abbaubare Kunststoffe <i>Herstellung, Verwendung und Entsorgung von „Bio“-Kunststoffen aus unterschiedlichen Perspektiven bewerten</i>
	  	

AK Bohrmann-Linde, Wuppertal 2022

Abbildung 86. Verlaufsplan BNE-gerechter Themen für den Chemieunterricht der SII¹⁵³

¹⁵³ Abbildung Verlaufsplan SII: <https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/de/unterrichtsmaterialien/bildung-fuer-nachhaltige-entwicklung/> (letzter Zugriff 09.02.25).

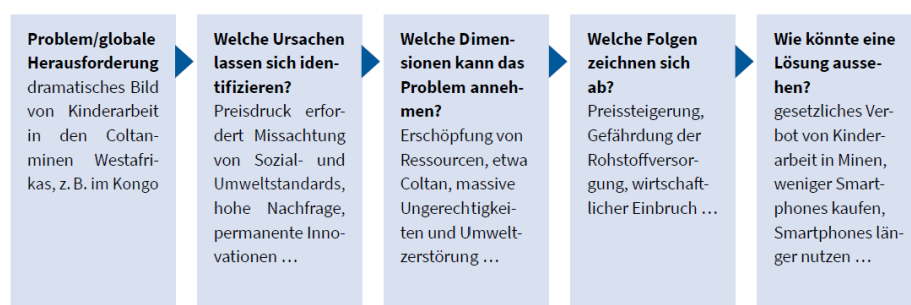
Der dritte Ansatz beschäftigt sich mit *Socio-scientific issues*. Die entwickelten Konzepte finden sich beispielsweise im gesellschaftskritisch-problemorientierten Unterrichtsverfahren wieder, welches die Schulung der Bewertungskompetenz durch die Behandlung aktueller gesellschaftlich-relevanter Thematiken (z.B. Fracking, Energy Drinks, Biokunststoffe) oder die kritische Auseinandersetzung mit Werbung und Presseberichten im Chemieunterricht in den Mittelpunkt stellt [219].

Eine nachhaltige Veränderung des Schulumfelds soll durch den vierten Ansatz realisiert werden. Im Gegensatz zu den anderen Konzepten steht die Handlungsorientierung im Vordergrund dieses Unterrichtsansatzes. Schulische oder städtische Projekte mit BNE-Bezug werden in diesem Rahmen umgesetzt. Fachliche Inhalte werden mit gesellschaftlichem Engagement verknüpft und münden in *Citizen-Science-Projekten*, wie z.B. der Untersuchung von Feinstaub in der eigenen Region [214, S.5].

Die Grenzen zwischen den genannten BNE-Ansätzen sind fließend und zukünftig könnten weitere integriert werden. Dazu scheint es auch folgerichtig, über Fächergrenzen hinaus zu blicken. Als Exkurs sei hier der von Hoffmann vorgeschlagene lösungsorientierte Unterrichtsansatz für den Geographieunterricht genannt. Hoffmann stellte während seiner Untersuchungen fest, dass bei der Vermittlung von globalen Problemen bei Lernenden oft Resignation, negative Denkmuster und Hilflosigkeit auftreten.

Als primären Grund identifiziert er, dass sehr wenig oder gar keine Zeit im Unterrichtsgeschehen mit dem Aufzeigen von Lösungsansätzen verbracht wird [220, S.11]. Deshalb schlägt er einen lösungsorientierten Unterrichtsansatz vor, der technologische Ideen in den Mittelpunkt stellt und produktive Denkprozesse bei den Lernenden initiiert (vgl. Abbildung 87).

Problemlösungsorientierter Unterrichtsansatz:



Strikt lösungsorientierter Unterrichtsansatz:

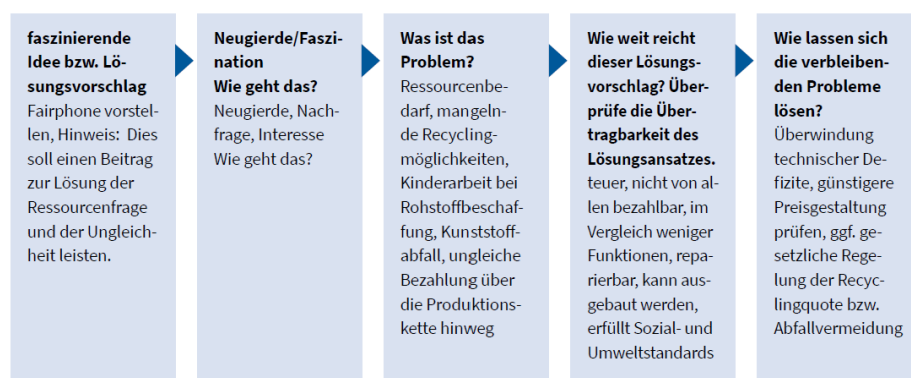


Abbildung 87. Gegenüberstellung problemlösungsorientierter und lösungsorientierter Unterrichtsansatz¹⁵⁴

¹⁵⁴ Abbildung Gegenüberstellung problemlösungsorientierter und lösungsorientierter Unterrichtsansatz: [220, S.12].

Herausforderungen bei der Umsetzung von BNE

Die Umsetzung eines fächerübergreifenden Bildungskonzepts wie BNE bietet zahlreiche Chancen, aber auch einige Herausforderungen. Durch die Komplexität der Thematik und die Vielschichtigkeit der Aufgaben, kann BNE überfordernd und überfrachtend auf Lernende wirken [205, S.115-116]. Ein unterschiedliches Verständnis von Begrifflichkeiten erschwert den gemeinsamen Austausch im Bildungsbereich. In einer nationalen Mentoring-Studie zur Qualität und zum Umfang der Umsetzung von BNE im deutschen Schulsystem, stellen die Forschenden fest, dass die curriculare Verankerung sehr stark zwischen Fächern und Bundesländern variiert [212, S.1]. Darüber hinaus lässt sich eine „substanzielle Qualifizierungslücke“ [212, S.14] der Lehrkräfte zu BNE feststellen, weshalb die schulische Implementation noch gehemmt ist. In einem nationalen Mentoring zur Perspektive der Lehrkräfte werden diese Thesen zu BNE bestätigt. Obwohl die Mehrzahl der Lehrpersonen BNE eine hohe Relevanz beimisst, fühlt sich ein großer Teil nicht ausreichend informiert und weitergebildet, um das Bildungskonzept im eigenen Unterricht umzusetzen [221, S.2]. Bei 69% der befragten Lehrkräfte wurde BNE im Studium nicht thematisiert.

Außerdem geben die Lehrpersonen mangelnde Verankerung in den Bildungs- und Lehrplänen (80%), sowie fehlende Weiterbildungen (75%) und Unterrichtsmaterialien (74%) als Hemmschwellen für eine Implementierung an [221, S.3-5].

Diese Entwicklungen wirken sich auch auf die Lernenden aus. In der Studie *Zukunft? Jugend fragen* des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) aus dem Jahr 2023 gab über die Hälfte der 1150 befragten Jugendlichen an, noch nie von BNE gehört haben (52%) [222]. Vier Fünftel gaben an, dass BNE als umfassendes Bildungskonzept weder in der Schule (78%) oder Berufsschule (85%), noch an der Hochschule (79%) eine Rolle gespielt habe [222, S.41].

Im Fach Chemie befindet sich die schulische Integration von BNE ebenfalls noch in einem „positiven Spannungsfeld“ [214, S.6]. Die bildungspolitischen Forderungen nach einer Umsetzung sind gegeben und in der Chemiedidaktik gibt es auch schon einige Vorschläge für unterrichtspraktische Umsetzungen. Dennoch finden diese BNE-Impulse noch nicht ausreichende Verbreitung in der Unterrichtspraxis.

Dies konnte auch in einer selbst durchgeführten Online-Umfrage unter naturwissenschaftlichen Lehrkräften im Jahr 2020 in Zusammenarbeit mit Julian Venzlaff festgestellt werden. Die Umfrage wurde unter dem Titel *Uni fragt Schule – Bezugspunkt BNE und bilingualer naturwissenschaftlicher Unterricht* durchgeführt [223]. Ziel war es unter anderem, die Umsetzung von BNE im Chemieunterricht und die schulischen Bedarfe an BNE-relevanten Themen und Materialien zu erfragen, damit diese zielgenau entwickelt werden können. Von den 77 Gesamtteilnehmenden füllten nur 36 den Fragebogen komplett aus, weshalb sich alle weiteren Schilderungen auf diese kleine Stichprobe beziehen und die Ergebnisse entsprechend vorsichtig zu bewerten sind (vgl. Anhang 3). Dennoch liefern sie aufschlussreiche Informationen bezüglich der Umsetzung von BNE in der Unterrichtspraxis, sowie der Bedeutung bestimmter thematischer Inhalte für die Lehrkräfte [218, S.98]. Drei Viertel der Lehrpersonen gaben an, BNE-Themen in ihrem Unterricht umzusetzen. Befragt nach vermittelten Inhalten, nannten die Lehrkräfte Themen wie z.B. Wasserstoff, Energiequellen, Recycling und Treibhauseffekt.

Bei der Befragung zeigte sich auch ein grundsätzliches Interesse der Lehrpersonen an Fortbildungen (86,1%) und einem Schülerlaborangebot (55,6%). Aus den Ergebnissen ließ sich außerdem ein Auftrag für die Chemiedidaktik ableiten, dass weitere BNE-Unterrichtskonzepte entwickelt werden sollten, um BNE-Gestaltungsmöglichkeiten und die Mehrdimensionalität verschiedener Inhalte aufzuzeigen. Als gewünschte Dateiformate wurden von den Lehrkräften Animationen (18 Nennungen), Arbeitsblätter (16 Nennungen), Versuche (13 Nennungen) und Videos (11 Nennungen) angegeben.

In einer weiteren Online-Umfrage, die im Rahmen einer Masterarbeit aus dem Jahr 2024 durchgeführt wurde [224, S.14-24] zeigte sich, dass sich in einigen Bereichen kaum Veränderungen in den Ansichten der Lehrpersonen feststellen ließen. Per Online-Fragebogen wurden insgesamt 212 Chemielehrkräfte befragt. 176 Befragte gaben an, bereits BNE-bezogene Themen in ihrem Unterricht umzusetzen. Die Mehrheit der Teilnehmenden erachtete BNE als wichtig (55%) bzw. sehr wichtig (33%) für den Chemieunterricht.

Befragt danach welche Dimensionen aus dem Modell der Leitlinie BNE NRW in ihrem Unterricht schwerpunktmäßig adressiert werden, gaben 68% die ökonomische und 91% der Lehrkräfte die ökologische Dimension an. Eine geringere Bedeutung wurde der sozialen, politischen und kulturellen Dimension mit jeweils ca. 20% beigemessen [225, S.328].

Trotz der vergleichsweise kleinen Stichproben in beiden Umfragen, wird aus den Rückmeldungen der Lehrkräfte dennoch deutlich, dass für das Fach Chemie weiterhin Fortbildungs- und Handlungsbedarf in Bezug auf BNE besteht. Existierende Vorgaben und Leitlinien sollten noch stärker in den schulischen Alltag integriert werden [225, S.328]. Dies deckt sich auch mit Ergebnissen aus einer Studie zur Umsetzung der SDGs im deutschen Bildungssystem, im Auftrag des Rats für Nachhaltige Entwicklung der Bundesregierung, aus dem Jahr 2018. Dort wird die Förderung von Fortbildungen für Lehrkräfte und Entwicklung und Verbreitung von Lehrmaterialien mit SDG-Bezug explizit empfohlen [226, S.26].

4.1.5 Zwischenfazit

Durch die gewonnenen Erkenntnisse aus den Kapiteln 4.1.1 bis 4.1.4, können die aufgestellten konzeptionellen Fragestellungen (F) nun wie folgt beantwortet (A) werden:

(F1) *Wie kann die Thematik CCS für den (bilingualen) Chemieunterricht laut Bildungsstandards und Kernlehrplan verortet werden?*

(A1) Sowohl in den Bildungsstandards als auch in den Lehrplänen der Bundesländer wird CCS für den Chemieunterricht nur sporadisch erwähnt. In den Bildungsstandards findet CCS keine explizite Erwähnung, es lässt sich jedoch an bestehende Themen wie z.B. den Inhaltsbereich *Lebenswelt und Gesellschaft* verorten und anschließen.

In den Kernlehrplänen der Bundesländer findet sich nur in zwei Bundesländern (Schleswig-Holstein und Rheinland-Pfalz) eine Erwähnung von CCS. In allen anderen 14 Lehrplänen und Rahmenvorgaben für das Gymnasium finden sich weder für die Sekundarstufe I, noch für die Sekundarstufe II explizite Nennungen oder Umschreibungen der CCS-Prozesskette.

(F1.1) *In welchen thematischen Zusammenhängen wird CCS angeführt?*

(A1.1) In den zwei erwähnten Beispielen wird CCS im Themenbereich *Chemie und Umwelt* sowie *Klima und Kohlenstoffkreislauf* angeführt.

Obwohl die Thematik CCS in bildungspolitischen Vorgaben wenig explizite Erwähnung findet, lassen sich jedoch in den meisten Bundesländern Anknüpfungspunkte finden. Beispielsweise bei der Behandlung des chemischen Gleichgewichts oder des Treibhauseffekts in der Sekundarstufe II bzw. über BNE oder Green Chemistry Inhalte. Da sich die im bilingualen Unterricht zu vermittelnden Fachinhalte an den Vorgaben des deutschsprachigen Sachfachs orientieren, lässt sich das Thema CCS in Nordrhein-Westfalen im Inhaltsfeld „Reaktionsgeschwindigkeit und chemisches Gleichgewicht“ der Einführungsphase (Klassenstufe 11) verorten. Da sich keine explizite Erwähnung oder Umschreibung im Kernlehrplan findet, eignet es sich im Besonderen als Exkurs innerhalb des Regelunterrichts oder als Inhalt eines außerschulischen Lernangebots. Dies wurde auch in Lehrkräftefortbildungen zurückgemeldet (vgl. Kapitel 5.2.2 und 5.3.2).

(F2) *Wie groß ist der Stellenwert der Thematik CCS in den untersuchten Schullehrwerken?*

(A2) Sowohl in den untersuchten deutschen als auch englischsprachigen Lehrwerken finden sich vereinzelt Inhalte zu CCS. Von fünfzehn untersuchten englischen Veröffentlichungen enthalten drei inhaltliche Referenzen zur Technologie, in 26 deutschen Lehrwerken sind nur fünf konkrete Erwähnungen zu finden. Insgesamt lässt sich jedoch beobachten, dass sich im Verhältnis zu den insgesamt 41 gesichteten Lehrwerken, nur etwa 19% der Thematik widmen. Zu diesen 19% gehören in der untersuchten Stichprobe zum größten Anteil Lehrwerke, die in den letzten fünf Jahren veröffentlicht wurden.

(F2.1) *In welchen thematischen Zusammenhängen wird CCS angeführt?*

(A2.1) Meist findet sich der Themenbereich als Exkurs in der Sekundarstufe II wieder. Der Kohlenstoffkreislauf, der Treibhauseffekt, fossile Brennstoffe und das chemische Gleichgewicht sind Fachinhalte, die mit der Technologieoption in Verbindung gebracht werden.

Durch die Untersuchung der Schulbücher wurde deutlich, dass es sich bei dem Themengebiet CCS aus schulischer Perspektive um einen thematischen Exkurs handelt. Alle gesichteten Lehrwerke bieten jedoch thematische Grundlagen und Anknüpfungspunkte, um den Themenbereich auch außerhalb eines schulischen Lernsettings zu thematisieren.

(F3) *Welche Möglichkeiten bietet das Bildungskonzept Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) zur Thematisierung von CCS?*

(A3) BNE befähigt Lernende, sich kritisch mit aktuellen Themen auseinanderzusetzen und zukunftsfähige Entscheidungen zu treffen. Gemäß des Orientierungsrahmens Globale Entwicklung würde sich die Thematik CCS in diesem Sinne sehr gut in die naturwissenschaftlichen Themen „10. Chancen und Gefahren technischen Fortschritts“ oder „11. Klimawandel“ einbetten lassen. Da es eine innovative, zukunftsrelevante Thematik ist, kann es durch die Berücksichtigung von mehreren Dimensionen und Perspektiven für die Lernenden über das Fach Chemie hinaus einen sinnstiftenden Beitrag zu BNE leisten.

Auch die Implementation der Thematik in einem außerschulischen Lernort wie dem Schülerlabor, wird in der BNE Leitlinie NRW explizit als authentisch und sinnstiftend aufgeführt, was für die Umsetzung eines Schülerlaborangebots zur beschriebenen Thematik spricht. Durch eine Schulung der Bewertungskompetenz lässt sich der konzipierte Kurs als Beitrag von BNE an curriculare Inhalte und Kompetenzen angliedern. BNE bietet den Vorteil einer didaktischen Umsetzung der Themenstellung mit Nachhaltigkeitsinhalten unter dem Fokus eines lösungsorientierten Unterrichtsansatzes. Außerdem bietet es einen Beitrag, um den Bedarf an BNE-Materialien, -Fortbildungen und -Lernangeboten gerecht zu werden.

4.2 Vorkenntnisse der Lernenden

In den folgenden Unterkapiteln 4.2.1-4.1.3 werden die notwendigen fachlichen und sprachlichen Vorkenntnisse der Lernenden für das Lernangebot evaluiert. Da in einem Schülerlaborsetting sehr kurzzeitige Interventionen mit sehr unterschiedlichen Kohorten stattfinden werden, muss sichergestellt werden, dass das gestaltete Lernangebot auf die Kenntnisse des Großteils der teilnehmenden Lernenden angepasst ist. Die gewonnen Erkenntnisse innerhalb dieses Kapitels sollen zur Beantwortung der folgenden konzeptionellen Fragestellungen (F) beitragen:

(F4) Welche fachinhaltlichen Vorkenntnisse der Lernenden müssen berücksichtigt werden?

(F5) Welche fremdsprachlichen Vorkenntnisse der Lernenden sind zu erwarten?

(F6) Wie kann das Schülerlaborangebot inhaltlich und sprachlich vorentlastet werden?

4.2.1 Fachliche Vorkenntnisse in der L1

Um einen Eindruck zum Vorwissen von Lernenden und Studierenden zur Thematik Kohlenstoffdioxid und CCS zu erhalten, wurden zu Beginn des Projekts kurze Befragungen mit dem Tool Mentimeter durchgeführt. Eine Übersicht dieser Abfragen ist in Tabelle 17 zu finden.

Tabelle 17. Befragungen von Schüler- und Studentengruppen mit dem Umfragetool Mentimeter

Probandengruppe	Datum	Lernort	Sprache der Befragung
Studierende LA Grundschule und Sopä (n = 42)	27.11.2019	Universität	Deutsch
Schüler*innen Grundkurs Englisch Q2 (n = 12)	16.11.2019	Schule	Englisch
Studierende LA Grundschule und Sopä (n = 86)	12.01.2021	Universität	Deutsch
Schüler*innen Grundkurs Chemie EF (n = 12)	01.02.2021	Schule	Deutsch

Die Abfrage enthielt zwei Teilbereiche. In der ersten Frage wurden die Kohorten zu ihren Assoziationen zur Begrifflichkeit Kohlenstoffdioxid befragt. Die Ergebnisse wurden in einer Wordcloud visualisiert.

[illegible][illegible]

Auf den ersten Blick wird deutlich, dass Studierende im Gegensatz zu Lernenden in der Lage sind, weit mehr und ausdifferenziertere Begrifflichkeiten zu nennen. Bei allen Kohorten lässt sich ein klarer Fokus auf Umweltthematik und Klimawandel erkennen. Obwohl drei der vier Kohorten in einem Unterrichtssetting mit chemischem Schwerpunkt befragt wurden, sind chemische Fachbegriffe rar. Außerdem wird Kohlenstoffdioxid in allen Kohorten mit negativen Begrifflichkeiten konnotiert und z.B. als umweltschädlich und teilweise sogar als giftig und gefährlich eingeordnet.

Im zweiten Teil der Abfrage wurden die Probanden gebeten, sechs Maßnahmen der Emissionsreduktion nach deren Relevanz (von 100%) zu gewichten. Die erfragten Thematiken sind in Tabelle 19 aufgetragen. Als die drei wichtigsten Themen wurden die Nutzung von kohlenstoffarmen Energieträgern, ein sparsamer Umgang mit Energie und das Aufforsten von Wäldern in fast allen Probandengruppen herausgestellt. Die Themen CCS, CCU, und DAC wurden von allen Kohorten als weniger relevant eingestuft. Eine mögliche Erklärung wäre, dass die letztgenannten Technologien den Befragten weniger bekannt sind.

Tabelle 19. Prozentuale Gewichtung von Emissionsreduktionsstrategien

Probandengruppe	Speicherung von CO₂-Emissionen (CCS)	Nutzung von CO₂-Emissionen (CCU)	Einsatz von Luftfiltern (DAC)	Aufforsten von Wäldern	Nutzung von kohlenstoffarmen Energieträgern	sparsamer Umgang mit Energie
Studierende LA Grundschule und Sopä (n = 42)	6%	9%	10%	29%	22%	24%
Schüler*innen Grundkurs Englisch Q2 (n = 12)	10%	7%	13%	41%	19%	9%
Studierende LA Grundschule und Sopä (n = 86)	9%	12%	11%	25%	21%	22%
Schüler*innen Grundkurs Chemie EF (n = 12)	10%	10%	8%	24%	25%	22%

Im Rahmen von fachdidaktischen Lehrveranstaltungen fiel außerdem immer wieder auf, dass Studierende sowohl im Bachelor- als auch im Masterstudium des Gymnasiallehramts wenig, bis keine Kenntnisse zur CCS-Thematik hatten, - eine Beobachtung, die sich mit den vorangegangenen Untersuchungen zum Vorwissen deckt.

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde daraufhin eine Stichprobe von acht Chemie-Lehramtsstudierenden u.a. zu ihren Vorkenntnissen mit Hilfe eines Fragebogens befragt. Ein Item lautete: „Das Themengebiet Carbon Capture and Storage war neu für mich“.

Zu den erwähnten Themenbereichen haben Lernende ausgebildete (Fehl-)Vorstellungen und können durch diese auch Lernhürden entwickeln. Das chemische Gleichgewicht wird dabei als besonders herausfordernd wahrgenommen. Schülerinnen und Schüler scheinen z.B. besondere Schwierigkeiten zu haben, den Einfluss von Faktoren wie z.B. der Temperatur auf die Gleichgewichtsreaktionen zu beurteilen [229, S.165]. In Bezug auf die Behandlung von Gasen wie Kohlenstoffdioxid, gibt es Fehlvorstellungen, die sich aus der Alltagssprache entwickelt haben. Dazu zählen Verallgemeinerungen, dass alle Gase brennbar, flüssig¹⁵⁶ und giftig oder gefährlich sind [230, S.16]. Eine Beobachtung, die sich auch in den durchgeführten Abfragen zum Vorwissen bestätigt. In Bezug auf den Klimawandel hat z.B. Schuler in einer explorativen Fragebogenstudie festgestellt, dass Lernende den Klimawandel als bedeutendes, bedrohendes und globales Problem wahrnehmen, aber wenig Querbezüge zwischen den Fächern und verschiedenen Dimensionen (Ökonomie, Ökologie, Soziales) herstellen können. Darüber hinaus werden oft Modelle zum Ozonloch mit denen des natürlichen Treibhauses der Erde vermischt und so die Treibhausgase nicht von den Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKWs) oder anderen Luftschadstoffen abgegrenzt. Dementsprechend werden verursachende Emissionen als giftig und aggressiv wahrgenommen und diese Eigenschaften auch auf das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid übertragen [231, S.272, 282-283].

Bei der Behandlung des Kohlenstoffkreislaufs wird der Wechsel zwischen Stoff und Teilchenebene (vgl. Johnstone Dreieck 3.6.2) von den Lernenden als besonders herausfordernd empfunden und als Ursache für viele Fehlvorstellungen beschrieben. Die bei der Photosynthese ablaufenden Prozesse werden meist nicht mit dem Gas Kohlenstoffdioxid assoziiert. Auf Grund seiner Eigenschaften wird es als farblos, masselos und deshalb nicht als Reaktionspartner angesehen. Daher wird das Gas nicht als Teil der „Pflanzennahrung“ und späteren Massen gebildeter Produkte wahrgenommen [232, S.309]. Diese Fehlvorstellungen konnten bei der selbst durchgeführten Mentimeterabfrage nicht festgestellt werden (vgl. Tabelle 18).

Die erwähnten Lernendenvorstellungen sollten aufgegriffen und vorentlastet werden. Dies kann z.B. durch eine gezielte Vorbereitung des Schülerlabormoduls erfolgen, indem Inhalte aus dem Regelunterricht aufgegriffen und wiederholend thematisiert werden. Für das geplante Schülerlabor wird es deshalb ein optionales Vorbereitungsmodul (siehe 4.2.3) entwickelt, das die Lernenden in Anspruch nehmen können. Dabei wird neben Fachkenntnissen auch englischsprachliches Grundvokabular eingeführt.

4.2.2 Sprachliche Vorkenntnisse in der L2

Lernende, die ein bilinguales Lernangebot in der Oberstufe besuchen, haben meist mindestens fünf Jahre lang Englischunterricht erhalten. Damit wird ein sprachliches Niveau nach dem europäischen Referenzrahmen für Sprachen von B1-B2 verbunden. Schülerinnen und Schüler können die Sprache auf fortgeschrittenem Niveau bzw. selbstständig verwenden.

Die sprachlichen Kompetenzformulierungen legen die Bundesländer in ihren entsprechenden Kernlehrplänen fest. Dabei werden meist Zielformulierungen für die Beendigung der Sekundarstufe I formuliert.

¹⁵⁶ Bei dieser Fehlvorstellung bezieht sich das Autorenteam auf das Flüssiggas in Feuerzeugen.

Im Bereich Grammatik sollten z.B. Lernende in NRW grundlegende Zeitformen, Konditionalsätze, Passivkonstruktionen, will-future progressive sowie will-future-perfect beherrschen [233, S.34-35]. Dies deckt sich mit den in der Literatur formulierten erforderlichen Grammatikkenntnissen für den bilingualen Chemieunterricht (vgl. Tabelle 20). Lernende sollten außerdem in der Lage sein, mit Sach- und Gebrauchstexten wie z.B. Zeitungsartikeln, Diagrammen sowie Audio- und Videoclips umzugehen. Im Bereich Textproduktion können sie z.B. Zusammenfassungen, digital gestützte Präsentationen und Stellungnahmen verfassen [233, S.37-38]. Im Bereich Sprachmittlung sind Lernende am Ende der Sekundarstufe in der Lage, Informationen aus schriftlichen Quellen zu entnehmen und in eine andere Sprache zu übertragen [233, S.33].

Tabelle 20. Übersicht sprachliche Strukturen für den BCU¹⁵⁷

Element des Chemieunterrichts	Sprachliche Strukturen
Beobachtung eines Experiments	<i>present progressive</i>
Lesen und Befolgen einer Versuchsanleitung	Imperativ (Schülerversuch) bzw. Passiv (Lehrerversuch)
Versuchsdurchführung	Imperativ (z. B. Phrasen wie „Pass me the beaker, please.“), simple present („We have to dissolve the salt in the water and then heat the solution.“)
Auswertung	<i>simple present</i> , <i>If-Satz</i> (meist nur Typ 1 nötig)
Hypothesen formulieren und begründen	<i>simple present</i> , <i>will-future</i> , <i>If-Satz</i> (meist nur Typ 1 nötig), <i>simple past</i>

Auf Grund der geringen Verbreitung des bilingualen Chemieunterrichts (vgl. 3.6), haben Lernende meist einen sehr gering ausgeprägten Fachwortschatz in der L2. Darüber hinaus kann es ihnen Schwierigkeiten bereiten, fachspezifische Textsorten wie z.B. ein Protokoll in der englischen Sprache anzufertigen. Beides sind Aspekte, die jedoch als sprachliche Voraussetzungen für das Lernangebot benötigt werden (vgl. Abbildung 90).

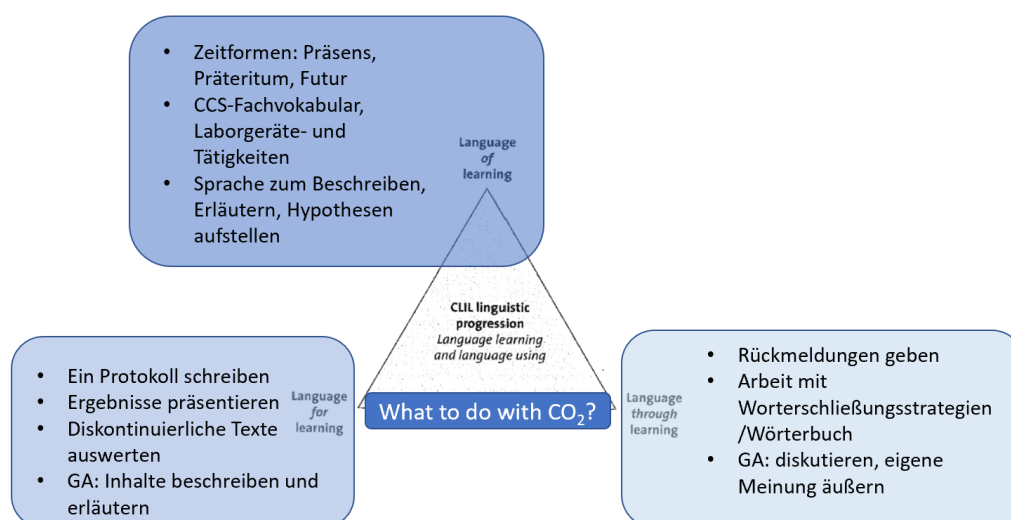


Abbildung 90. Antizipierte sprachliche Anforderungen nach dem The Language Triptych¹⁵⁸

¹⁵⁷ Tabelle Übersicht sprachliche Strukturen für den BCU [16, S.184].

¹⁵⁸ Abbildung The Language Triptych angepasst an eigenes Lernsetting nach [109, S.36].

Um diese sprachlichen Hürden zu überwinden, müssen im Lernsetting verschiedene Verstehenshilfen und Scaffoldingmaßnahmen eingesetzt werden.

Zur Unterstützung der Kommunikation in der Gruppe können z.B. Redemittel zur Verfügung gestellt werden. Wortschatz kann mit Hilfe von Visualisierungen und Annotationen erschlossen werden. Darüber hinaus scheint es bei kurzen Interventionen zielführend, legitime Kommunikationsstrategien wie *code-switching* und *message before accuracy*¹⁵⁹ klar zu kommunizieren, um etwaige Sprachhemmungen abzubauen. Die betreuenden Personen können außerdem als *language tutors*¹⁶⁰ in der Lernumgebung fungieren. Auch die Zusammenfassung der bilingual gewonnenen Erkenntnisse durch die Lernenden z.B. in Form eines Posters wird als lernförderlich beschrieben [188, S.24-27].

4.2.3 Konzeption eines Vorbereitungsmoduls

In der Chemiedidaktik der Bergischen Universität Wuppertal steht der Besuch des Schülerlabors Kohorten der Jahrgangsstufen EF bis Q2 (Klasse 11-13) offen. Das bilinguale Angebot „*What to do with CO₂?*“ sollte als regulärer Kurs etabliert werden und sich nicht nur an bilinguale Oberstufenkurse, sondern auch an Kurse aus dem Regelunterricht richten. Um dies zu realisieren und der Vielfalt der Kohorten und deren Unterschiedlichkeit an sprachlichen und inhaltlichen Vorkenntnissen gerecht zu werden, wurde ein Vorbereitungsmodul für das Kursangebot entwickelt. Die Intention des Moduls ist es, eine inhaltliche Vorentlastung vorzunehmen und an Vorwissen der Lernenden (vgl. 4.2.1) anzuknüpfen bzw. dieses ggf. zu wiederholen. Die Lernenden treten mit angebahnten Sprachwechseln in einen ersten Kontakt mit einer bilingualen Sprachsituation. Notwendige Fachbegriffe werden in beiden Sprachen kontrastierend dargestellt und mit bekannten Methoden aus dem Fremdsprachenunterricht vermittelt (vgl. 4.2.2). Die besondere Wichtigkeit einer solchen Vorbereitung sowie die Entwicklung von passenden Materialien für den nachhaltigen Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler wird auch in der Schülerlaborforschung betont [193, S.147,194, S.133].

Nach der Analyse der curricularen Vorgaben und etablierten Lehrwerke (vgl. 4.1.1-4.1.4) wurden folgende inhaltliche Schwerpunkte zur Vorbereitung auf das Schülerlaborangebot identifiziert: Kohlenstoffdioxid und seine Eigenschaften, der Kohlenstoffkreislauf, das chemische Gleichgewicht am Beispiel CO₂, die Quellen von CO₂ und der Einfluss von Kohlenstoffdioxid auf das Klima.

Auf dieser Grundlage wurde ein *Tandembogen* zur Aktivierung des inhaltlichen Vorwissens aus dem Unterricht entworfen. Partner A erhält eine Aufgabenstellung und Partner B kann diese mit Lösungsvorschlägen überprüfen (siehe Abbildung 91). Danach wird gewechselt und Partner B muss eine Aufgabe beantworten. Die Arbeitsaufträge werden abwechselnd beantwortet und korrigiert, bis alle vollständig beantwortet sind. Am Ende der Abfrage können die Lernenden ihre Kenntnisse zu den einzelnen inhaltlichen Schwerpunkten mit Hilfe einer Zielscheibe selbst einschätzen.

¹⁵⁹ **Message before accuracy:** Prinzip der Fehlerkorrektur, bei der freie mündliche Äußerungen der Lernenden nur von der Lehrperson korrigiert werden, wenn sie unklar oder unvollständig sind. Kleinere sprachliche Fehler werden ignoriert.

¹⁶⁰ **Language tutors:** SprachberaterInnen, die während der kommunikativen Gruppenphasen sprachliche Hilfestellungen geben.

A BILINGUAL LAB SEQUENCE

TANDEMBOGEN

TANDEMBOGEN
A

3

Nennen Sie Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid und dessen Verwendung. Die folgenden Gliederungspunkte können Ihnen helfen.

- Vorkommen:
- Entstehung:
- Nachweis:
- Reaktionen:
- Toxizität:
- Verwendung:

TANDEMBOGEN
B

A BILINGUAL LAB SEQUENCE

TANDEMBOGEN

TANDEMBOGEN
B

3

Überprüfen Sie die Aussagen Ihres Partners und ergänzen Sie ggf. fehlende Aspekte.
(Aufgabe: Nennen Sie Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid und dessen Verwendung.)

Kohlenstoffdioxid ist ein geruchloses, farbloses, nicht brennbares Gas

- **Vorkommen:** natürlicher Kohlenstoffkreislauf, Raumluft enthält 0,038% Kohlenstoffdioxid
- **Entstehung:** Bei Verbrennungsprozessen (z.B. fossiler Energieträger), Atmungs- und Gärprozesse, Rodung, biologischer Abbau
- **Nachweis:** Kalkwasserprobe
- **Reaktionen:** z.B. gut löslich in Wasser, reagiert zu Kohlensäure $H_2CO_3 \rightarrow CO_2 + H_2O$
- **Toxizität:** gesundheitlich unbedenklich (ab einem Volumenanteil von 8% in der Luft können Menschen betäubt werden)
- **Verwendung:**
 - großtechnische Synthesen z.B. zur Herstellung von Harnstoff und Methanol
 - verflüssigtes Kohlenstoffdioxid z.B. Einsatz in Kältetechnik und Feuerlöschern
 - gelöstes Kohlenstoffdioxid bspw. in Getränken wie z.B. Mineralwasser, Verwendung als Trockeneis/schnee

TANDEMBOGEN
B

Abbildung 91. Beispiel einer Tandembogenaufgabe (links) PartnerIn A-Aufgabenstellung, (rechts) PartnerIn B - Antwort

Die abgefragten Inhalte orientieren sich an den Vorgaben des Kernlehrplans des Landes Nordrhein-Westfalen (vgl. 4.1.1) und fördern schwerpunktmäßig die Sach- und Bewertungskompetenz der Lernenden. Lernende beschreiben in den Aufgaben u.a. die Merkmale eines chemischen Gleichgewichtes (S7, S15, K10) und erklären die Beeinflussung des Kohlenstoffdioxid-Kohlensäure-Gleichgewichts nach dem Prinzip von Le Chatelier (S8, S15, K10) [197, S.30]. Außerdem bewerten sie die Folgen eines Eingriffs den Kohlenstoffkreislauf (B12, B13, B14, S5, E12, K13) [197, S.31].

A BILINGUAL LAB SEQUENCE

Focus on Language I

Task:

1) Work with a partner. Match the correct German/English equivalents.

GERMAN

Kohlenstoffdioxid

Temperaturanstieg

Dürre

Treibhauseffekt

Löslich, (N) Löslichkeit

Polare Eismassen

Globale Erwärmung

Fossile Energieträger

Umwelt

etw. verbrennen, (N) Verbrennung

Kohlenstoffkreislauf

ENGLISH

fossil fuels

(to) combust, (N) combustion

soluble, (N) solubility

carbon cycle

carbon dioxide

polar ice sheets

drought

temperature increase

greenhouse effect

global warming

environment

A BILINGUAL LAB SEQUENCE

Focus on Language II

Task:

a) Fill in the mind map with the words or phrases you found.

b) Present one word or phrase you have chosen for your mind map and explain how it relates to the topic.
c) Make sure to complete your mind map with your classmates' ideas.

Abbildung 92. (links) Focus on Language I, (rechts) Focus on Language II

Zur Vorentlastung einiger deutscher und englischer Fachbegriffe wurden die Arbeitsmaterialien *Focus on Language* entworfen. Das *Material Focus on Language I* enthält geschlossene und halboffene Aufgabenstellungen für etwas schwächere Gruppen, die Hemmungen im Umgang mit der englischen Sprache haben und sich an das Konzept bilingualer Unterricht herantasten wollen (vgl. Abbildung 92).

(Online)-Wörterbücher wie z.B. Leo oder PONS können als Unterstützung verwendet werden. Das *Material Focus on Language II* enthält offenere Aufgabenstellungen für stärkere Gruppen, die ggf. schon über Erfahrungen mit bilingualem Unterricht verfügen.

137

Das Material wird den Lehrkräften der besuchenden Kurse vor ihrem Besuch zur Verfügung gestellt und kann nach Bedarf als individuelle Lernbegleitung eingesetzt werden. Die Lehrkräfte erhalten ein Handbuch mit didaktischen Erläuterungen und Lösungen zu den Arbeitsmaterialien sowie deren exemplarische Einbettung in eine 45-minütige Einzelstunde (vgl. Abbildung 93). Darüber hinaus werden die Materialien für die Lernenden als digitales E-Book und als analoge Arbeitsblätter zur Verfügung gestellt, um deren Einsatz so niederschwellig wie möglich zu gestalten.

VORBEREITUNGSMODUL FÜR LEHRKRÄFTE

Hinweise zum Material

Tandembogen

Focus on Language I

Focus on Language II

Lösungen

VORBEREITUNGSMODUL FÜR LEHRKRÄFTE

HINWEISE

Vorschlag zur Einbettung der Materialien in eine Einzelstunde (45 Minuten)

Phase	Zeit/Sprache	Inhalte	Methode, Sozialform	Medien und Experimente
Einstieg	(5 Min)	Sammlung von Vorwissen zur Verbindung Kohlenstoffdioxid	Brainstorming/Blitzlicht UG	Tafel o. digitale Tafel
Warm-up	(15 Min)	Bearbeitung des Tandembogens Anschließende Besprechung der Selbstevaluation ggf. Wiederholung/Besprechung von schwierigen thematischen Inhalten	Selbstlernen PA Plenum, UG	AB Tandembogen
Focus on Language	(20 Min)	Bearbeitung des Arbeitsblatts Focus on Language I oder II	EA/PA	AB Focus on language I oder II
Abschluss	(5 Min)	Vergleich der Ergebnisse Klärung von Fragen und Unklarheiten ggf. HA zur Wiederholung	Plenum, UG Plenum, UG	-

Abbildung 93. Einblick in die Lehrkräftehandreichung des Vorbereitungsmoduls

4.2.4 Zwischenfazit

Durch die gewonnenen Erkenntnisse aus den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.3, können die aufgestellten konzeptionellen Fragestellungen (F) nun wie folgt beantwortet (A) werden:

(F4) Welche fachinhaltlichen Vorkenntnisse der Lernenden müssen berücksichtigt werden?

(A4) Für das Laborangebot muss davon ausgegangen werden, dass sowohl Lernende als auch Studierende wenig Vorkenntnisse zu den CCS-Prozessen zu haben. Vielen sind die Technologien gänzlich unbekannt. Darüber hinaus erscheint es so, als seien meist nur rudimentäre Fachkenntnisse zu Kohlenstoffdioxid und dessen Eigenschaften vorhanden.

Lernende sollten in der Sekundarstufe I bereits Eigenschaften, Nachweis und Reaktionsverhalten von Kohlenstoffdioxid kennengelernt haben und über Grundkenntnisse zu Stoffkreisläufen, der Photosynthese, sowie dem natürlichen und anthropogenen Treibhauseffekt verfügen. In der Sekundarstufe II wird in diesem Zusammenhang auch meist das chemische Gleichgewicht eingeführt, welches für die Betrachtungen der Lösevorgänge von Kohlenstoffdioxid in Wasser notwendig ist.

Auch Kenntnisse über die Beeinflussung des Gleichgewichts durch die Änderungen von Temperatur, Druck und pH-Wert, sind hilfreich, um die Prozesse der natürlichen Einbindung von Kohlenstoffdioxid (vgl. 2.2.2.3) sowie die geologischen Speichermechanismen (vgl. 2.4.2) zu verstehen. Grundkenntnisse zum anthropogenen Treibhauseffekt ermöglichen das Verständnis für die etwaige Notwendigkeit der Technologieoption. Vorwissen zu chemischen und physikalischen Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid erleichtert den Zugang zu Adsorptions- und Absorptionsverfahren (vgl. 2.2.2.1-2.2.2.2).

Um eine gewisse fachinhaltliche Grundlage sicherzustellen, müssen im Laborangebot Inhalte aus dem Regelunterricht aufgegriffen und wiederholend thematisiert werden.

(F5) *Welche fremdsprachlichen Vorkenntnisse der Lernenden sind zu erwarten?*

(A5) Die fremdsprachlichen Kenntnisse der Lernenden im Fach Englisch sollte mindestens dem Niveau B1-B2 entsprechen. Die für den bilingualen Chemieunterricht nötigen grammatikalischen Strukturen und Texterschließungsstrategien sind den Schülerinnen und Schülern bekannt. Da die meisten Lernenden keine Erfahrungen mit bilingualem Chemieunterricht haben, ist davon auszugehen, dass sie über einen sehr gering ausgeprägten Fachwortschatz in der Fremdsprache verfügen.

Weiterhin muss bedacht werden, dass Kenntnisse zu fachspezifischen Textsorten wie Versuchsprotokollen in der Muttersprache angelegt sind und höchstwahrscheinlich in der Fremdsprache fehlen oder nur zu einem geringen Teil versprachlicht werden können.

Die Integration von Verstehenshilfen und Scaffoldingmaßnahmen ist daher essentiell, um etwaige sprachlich auftretende Hürden zu überwinden. Darüber hinaus sollten für eine niederschwelligere, mündliche Kommunikation Strategien wie das *code-switching*, *message before accuracy* und der Einsatz von *language tutors* in das Angebot eingebracht werden.

(F6) *Wie kann das Schülerlaborangebot inhaltlich und sprachlich vorentlastet werden?*

(A6) Eine vollständige Antizipation aller Lerngruppen und deren individueller Bedarfe ist schwer umsetzbar. Nichtsdestotrotz scheint es sinnvoll, eine gewisse inhaltliche Vorentlastung vorzunehmen, an das Vorwissen der Lernenden (vgl. 4.2.1) anzuknüpfen und Inhalte zu wiederholen. Im Idealfall bewirkt diese Vorbereitung einen nachhaltigeren Lernerfolg während und nach dem Schülerlaborbesuch [193, S.147,194, S.133]. Außerdem haben viele Gruppen keinerlei Erfahrungen mit bilingualem Chemieunterricht, weshalb ein erster Kontakt mit der bilingualen Sprachsituation vor dem Laborbesuch hilfreich sein kann.

Aus dieser Intention heraus wurde ein Vorbereitungsmodul mit leicht angebahnten Sprachwechseln konzipiert, bei der zu Beginn eine Aktivierung und Evaluation von vorhandenem inhaltlichem Vorwissen in der deutschen Sprache durch den Einsatz eines Tandembogens erfolgt. Daran anschließend werden notwendige Fachbegriffe in beiden Sprachen kontrastierend dargestellt und mit bekannten Methoden aus dem Fremdsprachenunterricht vermittelt (vgl. 4.2.2).

Folglich kann den Laborbesuch mit Hilfe des Vorbereitungsmoduls inhaltlich und sprachlich vorentlastet werden, weil die konzipierten Aufgabenstellungen an Vorkenntnisse der Lernenden anknüpfen und thematisch zum Lernangebot hinführen. Da die Materialien den begleiteten Lehrkräften vor dem Besuch als optionales Angebot zur Verfügung gestellt werden, können diese die Notwendigkeit und den Umfang des Einsatzes abwägen und an die individuellen Lernvoraussetzungen ihrer Gruppe anpassen.

4.3 Aufbau der Schülerlaborsequenz

In den folgenden Unterkapiteln 4.3.1-4.3.3 werden die konzeptionellen Schwerpunkte und die Grundstruktur des Schülerlaborangebots beschrieben. Die gewonnenen Erkenntnisse innerhalb dieses Kapitels sollen zur Beantwortung der folgenden konzeptionellen Fragestellungen (F) beitragen:

(F7) Welche Planungsstrategien liegen dem bilingualen Schülerlaborangebot zu Grunde?

(F8) Welche Kompetenzen werden im Lernangebot geschult?

(F9) Wie müssen die fachlichen Inhalte zu CCS für das Schülerlaborangebot didaktisch reduziert werden?

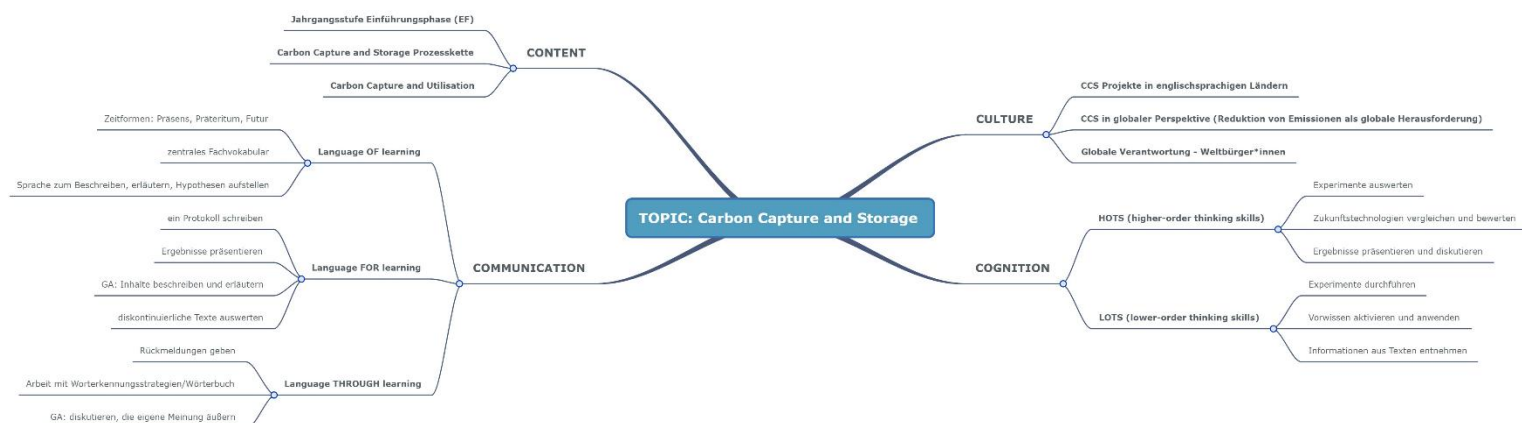
(F10) Wie wird die deutsche und englische Sprache eingesetzt, um die sachfachliche Diskurskompetenz in zwei Sprachen zu realisieren?

(F11) Welche Aspekte der BNE finden sich im Laborangebot wieder?

4.3.1 Planungsgrundlagen und Kompetenzbeschreibungen

Konzeptionen von bilingualen Lernsettings sollten nach dem Prinzip des „backward planning“ [173, S.10] realisiert werden. Vor Beginn der Durchführung werden Lernziele und Lernprodukte für das Erreichen des Endes einer Reihe geplant und festgesetzt. Diese Überlegungen sind auch in den etablierten Planungsrastern für bilingualen Unterricht wiederzufinden.

Angelehnt an das 4Cs-Frameworks schlagen Coyle, Hood und Mash ein *Mind Map Template* zur Strukturierung von Unterrichtseinheiten vor [109, S.56, 79]. Mit Hilfe der MindMap kann so die Umsetzung einfacher visualisiert werden. In Abbildung 94 wurde eine solche CLIL mind map für das geplante Schülerlaborangebot entworfen. Die 4C-Dimensionen werden hier aufgegriffen und für die konkreten inhaltlichen Schwerpunkte (Content), die sprachlichen Anforderungen (Communication), die methodischen Anforderungen (Cognition) und die kulturelle Bedeutung (Culture) ausdifferenziert. Aus der Abbildung wird deutlich, wie vielfältig die Anforderungen an Lernende sind, die in bilingualen Lernumgebungen lernen. Darüber hinaus zeigt es auch die Komplexität der Faktoren auf, die bei der Konzeption einer solchen Einheit berücksichtigt werden müssen.

Abbildung 94. CLIL mind map für das Schülerlaborangebot¹⁶¹

Das 4Cs Modell wurde von Krebs für den deutschsprachigen Raum erweitert und es wurden Strategien formuliert, die neben den 4Cs angebahnt werden müssen, um eine erfolgreiche Umsetzung von CLIL-Lernsettings zu ermöglichen [154, S.11]. Dies sind z.B. Lernendenaktivierung und die Integration von Scaffoldingmaßnahmen. Eine Übersicht dieser Strategien und deren Umsetzungsbeispiele in der Schülerlaborsequenz ist in Tabelle 21 visualisiert. Einige der Aspekte bieten Schnittmengen mit den zentralen Merkmalen der CLIL-Methodik [122] bzw. Halletts *Bilingual Triangle* [124] (vgl. 3.4).

Tabelle 21. Strategien der CLIL-Stundenplanung in der Schülerlaborsequenz nach Krebs¹⁶²

Strategie	Beschreibung der Strategie	Umsetzung in der Schülerlaborsequenz, z.B.:
Aktivierung der Lernenden	<ul style="list-style-type: none"> Fachliches Vorwissen und Vorerfahrungen aktivieren 	<ul style="list-style-type: none"> Vorbereitungsmodul Einstiegsinheit zur Aktivierung von Vorwissen
Reichhaltiger Input	<ul style="list-style-type: none"> Verwendung von verschiedenen Darstellungsformen, sprachlich bedeutsamer, authentischer und anspruchsvoller Input 	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz von Laborpostern mit dt./eng. Vokabular Einsatz von englischsprachigen Lernvideos Einsatz von englischsprachigen grafischen Darstellungen (Diagramme, Flow-Charts)
Scaffolding	<ul style="list-style-type: none"> authentisches Material mit sprachlichen und inhaltlichen Hilfestellungen bearbeiten Unterstützungsmaßnahmen für die Produktion von gesprochenen bzw. verschriftlichten Lernprodukten 	<ul style="list-style-type: none"> Übersetzungshilfen am Rand der Arbeitsmaterialien, Annotationen für fachliche Begriffsklärung Einsatz von Formulierungshilfen, Wordbanks
Möglichst viel (auch gesteuerter) Output	<ul style="list-style-type: none"> viel mündliche bzw. schriftliche Lernendeninteraktion 	<ul style="list-style-type: none"> kommunikativer Austausch in einer Kleingruppe gemeinsames Aushandeln von Entscheidungen und deren Begründung Präsentation der Ergebnisse

¹⁶¹ Abbildung CLIL mind map: eigene Darstellung mit dem Tool WiseMapping.¹⁶² Tabelle Strategien für CLIL-Stundenplanung nach [154, S.11], erweitert für das Schülerlaborsetting.

Strategie	Beschreibung der Strategie	Umsetzung in der Schülerlaborsequenz, z.B.:
Verbindung von Sprache, Inhalt und Kultur* (*Verständnis von interkulturellem Lernen im BCU [126, S.184])	<ul style="list-style-type: none"> • Verzahnung von Sprache und Fach • „Fremde“ Wissenschaft Chemie als Kultur kennenlernen • Authentische Materialien, die Wissenschaft und Kultur der Länder verbinden 	<ul style="list-style-type: none"> • Sprachbewusstheit durch die Vermittlung von L1 und L2 und geplanten Sprachwechseln • Arbeitsweisen der Chemie erleben • Authentische Textgrundlagen, Vertonung von Texten/Begriffsdefinitionen durch Muttersprachler

Leider sind die Vorgaben des 4C-Modells nicht passgenau zu den kompetenzorientierten Kernlehrplänen, die in Deutschland als Grundlage für bilinguale Lernsettings fungieren, obwohl einige Parallelen zu erkennen sind.

Folglich wurde für die Erstellung der Schülerlaborsequenz nach einer passgenaueren Strukturierung recherchiert. Da es für den bilingualen Chemieunterricht keine Handreichungen gibt, wurde für die didaktische Konzeption des Moduls auf die Vorschläge des Landes NRW für den BU Biologie [198, S.10] zurückgegriffen. Das Planungsraster für das kompetenzorientierte Vorhaben mit den passenden Kompetenzformulierungen ist in Abbildung 95 dargestellt¹⁶³.

Bilinguale Diskurskompetenz <ul style="list-style-type: none"> • entnehmen Informationen aus deutschen und englischen Sachtexten und geben diese strukturiert und fachsprachlich angemessen in der Zielsprache wieder (<i>read, describe, present</i>) • beschreiben strukturiert und fachsprachlich angemessen chemische Phänomene und Prozesse (<i>describe, explain, analyse</i>) • wenden adäquates Fachvokabular im Umgang mit naturwissenschaftlichen Darstellungsformen an (<i>diagram, table, protocol, chemical equations</i>) • nutzen geplante Sprachwechsel: Begriffe und fachkommunikative Strukturen werden in die jeweils andere Sprache übertragen (<i>mediate</i>) 	Kompetenzbereich: Sachkompetenz (S) <ul style="list-style-type: none"> • beschreiben Stoffkreisläufe in Natur oder Technik als Abfolge chemischer Reaktionen (S4) • beschreiben die Umkehrbarkeit chemischer Reaktionen, das dynamische Gleichgewicht und das Donator-Akzeptor-Prinzip und wenden diese an (S7) • beschreiben Einflussfaktoren auf chemische Reaktionen und Möglichkeiten der Steuerung durch Variation von Reaktionsbedingungen sowie durch den Einsatz von Katalysatoren (S8) • entwickeln Reaktionsgleichungen (S16) 	Möglichkeiten fachübergreifenden Arbeitens <ul style="list-style-type: none"> • nutzen chemische Konzepte zur Vernetzung von Sachverhalten innerhalb der Chemie sowie mit anderen Unterrichtsfächern (S10), z.B.: • Geografie: Jgst. EF Inhaltsfeld 2: Raumwirksamkeit von Energieträgern und Energienutzung • Sozialwissenschaft: Jgst. Q1/Q2 Inhaltsfeld 7: Globale Strukturen und Prozesse • Biologie: Jgst. Q1/2 Inhaltsfeld: Ökologie • Englisch: Jgst. Q1/2 Inhaltsfeld: Welt im Wandel
Kompetenzbereich: Bewertung (B) <ul style="list-style-type: none"> • betrachten Verfahren zur Verminderung des Kohlenstoffdioxidstoßes aus unterschiedlichen Perspektiven und beurteilen diese sachgerecht auf der Grundlage chemischer Kenntnisse (B1) • beurteilen Daten hinsichtlich ihrer Angemessenheit und Grenzen (B3) • beurteilen und bewerten ausgewählte Capture-, Storage- und Utilisation-Methoden in aktuellen gesellschaftlichen Zusammenhängen (B12) • identifizieren Kriterien für Entscheidungen aus chemischer Perspektive (B14) • bewerten den gesellschaftlichen und ökologischen Nutzen der ausgewählten Capture-, Storage- und Utilisation-Methoden (B10) 	<p style="text-align: center;">What to do with CO₂? A Bilingual Lab Sequence</p> <p style="text-align: center;">Jahrgangsstufe 11</p> <p style="text-align: center;">Gesamtumfang: 4-6 Stunden</p>	Kompetenzbereich: Kommunikation (K) <ul style="list-style-type: none"> • wählen relevante und aussagekräftige Informationen und Daten zu ausgewählten Capture-, Storage- und Utilisation-Methoden und erschließen Informationen aus Quellen mit verschiedenen Darstellungsformen (K2) • verwenden Fachbegriffe und -sprache zunehmend korrekt (K9) • erklären ausgewählte Capture-, Storage- und Utilisation-Methoden und argumentieren fachlich schlüssig (K10) • präsentieren chemische Sachverhalte sowie Lern- und Arbeitsergebnisse unter Einsatz geeigneter analoger und digitaler Medien (K11)
Interkulturelle Kompetenzen <ul style="list-style-type: none"> • erwerben erste Kenntnisse als Basis für eine interkulturelle Kommunikationsfähigkeit zum Thema <i>Carbon Capture and Storage</i> in der Zielsprache • nutzen die Zielsprache Englisch als <i>lingua franca</i> in internationaler, fachlicher Kommunikation 	Kompetenzbereich: Erkenntnisgewinnung (E) <ul style="list-style-type: none"> • identifizieren und entwickeln Fragestellungen zum Problem des Verbleibs und des Einflusses anthropogen erzeugten Kohlenstoffdioxids unter Einbezug von Gleichgewichten (E2) • führen experimentelle Untersuchungen – den chemischen Arbeitsweisen und Sicherheitsregeln entsprechend – durch, protokollieren sie und werten diese unter Anleitung aus (E5) • reflektieren Möglichkeiten und Grenzen des konkreten Erkenntnisgewinnungsprozesses sowie der gewonnenen Erkenntnisse zu verschiedenen Emissionsreduktionsstrategien (E12) 	Kriteriengeleitete Diagnose und Leistungsbewertung <ul style="list-style-type: none"> • führen eine Selbstevaluation ihrer Vorkenntnisse mit Hilfe eines Tandembogens durch • erstellen und präsentieren eine Expert Card als Lernprodukt des Schülerlaborangebots

Abbildung 95. Planungsraster für das kompetenzorientierte Unterrichtsvorhaben „What to do with CO₂?“¹⁶⁴

¹⁶³ In der Literatur werden noch andere Möglichkeiten zur Gestaltung von bilingualen Lernumgebungen aufgezeigt. Leisen schlägt die Lernschritte einer Lernlinie mit passendem Planungsraster vor [131, S. 42, 52, 56-57]. Habekost skizziert ein fünfschrittiges Planungsraster für bilinguale Lernsettings [234, S.40]. Für den Pluriliteracies Ansatz werden Deeper Learning Episodes (DLE) mit Planungsrastern aufgezeigt [235, S.12-18].

¹⁶⁴ Abbildung Planungsraster: eigene Darstellung nach Vorlage [198, S.16].

4.3.2 Konzeptionelle Schwerpunkte

Im Rahmen dieser Arbeit sollte ein bilinguales Schülerlaborangebot entstehen, welches verschiedene konzeptionelle Schwerpunkte aufgreift. Ein curricular innovatives Thema *Carbon Capture and Storage* sollte mit Hilfe von gezielten Sprachwechseln und mit Aspekten der Bildung für nachhaltige Entwicklung umgesetzt werden. Im Folgenden werden diese Sachverhalte kurz erläutert, eingeordnet und deren Umsetzung im Schülerlabor beschrieben.

Erschließung der innovativen Fachthematik CCS

Carbon Capture and Storage sollte als Fachthema zugänglich gemacht und im Rahmen der curricularen Innovationsforschung für den Regelunterricht und das Schülerlabor erschlossen werden. Dabei hat sich die curriculare Innovationsforschung das Ziel gesetzt, gesellschaftlich, technisch und wissenschaftlich relevante Themen aufzugreifen und für den Chemieunterricht aufzubereiten. Dies kann z.B. geschehen, indem Experimente, Medien und Lernsettings entwickelt werden (vgl. Abbildung 96).

Die curriculare Innovationsforschung nimmt dabei eine Brückenfunktion ein und stellt die Verbindung zwischen fachwissenschaftlichen Inhalten und unterrichtlicher Praxis her. Im Rahmen dieses Konzepts plädiert Tausch für eine enge und gleichberechtigte Zusammenarbeit von Lehrenden der Schule und Hochschule [22, S.43-44]. Die Präsentation der erarbeiteten Materialien in Lehrkräftefortbildungen und deren Diskussion ist folglich ebenso Teil des Forschungsansatzes, wie auch die Erprobung und Evaluation von entwickelten Einheiten mit Lernendengruppen an Schulen oder der Universität [236, S.35].

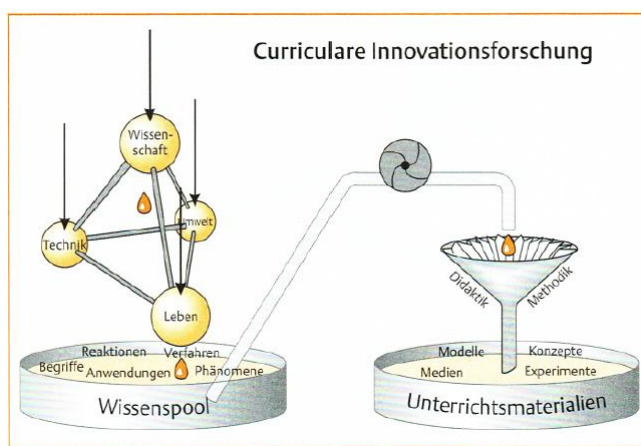


Abbildung 96. Curriculare Innovationsforschung¹⁶⁵

Um eine innovative Thematik für den Regelunterricht und das Schülerlabor zu erschließen, bietet sich der von Tausch vorgeschlagene didaktisch integrative Chemieunterricht an. Dessen Grundintention ist die Verknüpfung von Fachinhalten und Kontexten mit Hilfe von modernen Methoden und Medien [236, S.44]. Mittels vierphasiger konstruktivistischer Lernschleifen können Teile solcher Lerneinheiten grundlegend konzipiert werden. Der Lernbaustein wird als nach oben deutende Spirale, die Kontexte und Fachinhalte verbindet, dargestellt (vgl. Abbildung 97).

¹⁶⁵ Abbildung Curriculare Innovationsforschung [236, S.35].

Der Lernzyklus innerhalb der Schleife ist in vier Phasen aufgeteilt. Zu Beginn steht die Phase des Explorierens, in der die Vorkenntnisse der Lernenden erkundet werden. Dies geschieht meist durch die Wahl eines Kontextes, der Bezüge zur Lebenswelt und dem Alltag der Schülerinnen und Schüler herstellt. In der Phase des Experimentierens werden mit Hilfe von durchgeführten Experimenten neue Inhalte und Fakten erforscht. Daran schließt sich die Phase des Akkomodierens an, bei der etablierte Fachkonzepte und -systematiken der Lernenden durch die Erkenntnisse aus der Experimentierphase angepasst bzw. erweitert werden. Die Lerneinheit wird durch die vierte Phase des Applizierens abgeschlossen, indem die gewonnenen Kenntnisse auf einen neuen Sachverhalt aus der Lebenswelt der Lernenden angewendet wird [22, S.63-65].

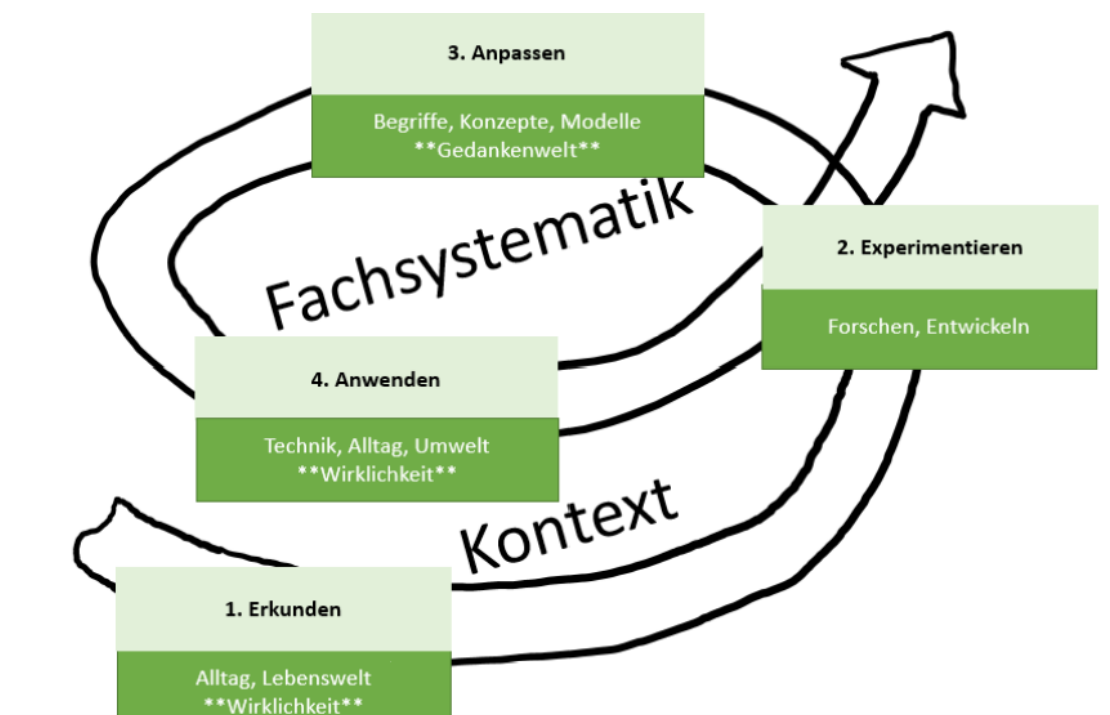


Abbildung 97. Grundstruktur einer konstruktivistischen Lernschleife¹⁶⁶

Bedingt durch die Komplexität des Themenfelds CCS, müssen die Inhalte für das Lernsetting ausgewählt und didaktisch reduziert werden. Dabei bleibt es nicht aus, dass Fachinhalte auf Grund der didaktischen Zielsetzung nur partikularisiert oder generalisiert vermittelt werden können und nicht die umfassende fachwissenschaftliche Realität widerspiegeln.

Die erste detaillierte Planung der Schülerlaboreinheit entstand mit dem Versuch, alle relevanten thematischen Inhalte in der Sequenz zu etablieren. Eine tabellarische Übersicht der Entwicklung der inhaltlichen Module ist Abbildung 98 zu entnehmen.

¹⁶⁶ Abbildung Grundstruktur konstruktivistische Lernschleife: eigene Zeichnung nach [22, S.65].

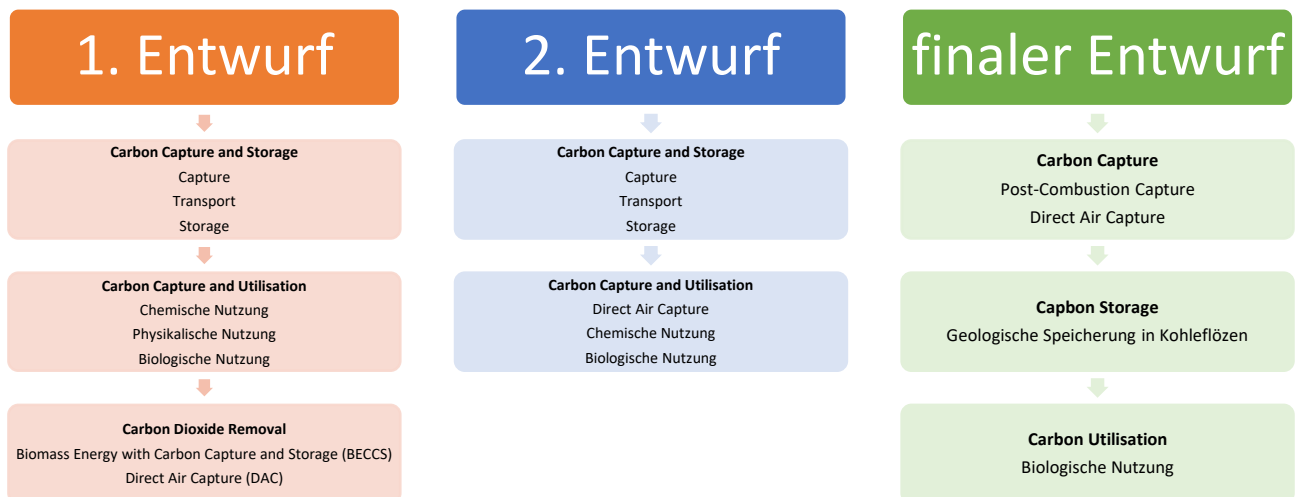


Abbildung 98. Entwicklung der inhaltlichen Module der Schülerlaborsequenz

Zu Beginn bestand die Idee, allen Lernenden die Gesamtheit der CCS-Prozesskette zu vermitteln und sie dann arbeitsteilig Technologien zu *Carbon Utilisation* und *Carbon Dioxide Removal* erarbeiten zu lassen.

Nach einer intensiveren Recherche und Erprobung von geeigneten Experimenten für diese Themen im Labor (vgl. 4.4) zeigte sich, dass einige inhaltliche Module schwerer als Schülerexperiment umzusetzen waren als andere. Exemplarisch sei hier der Bereich Transport erwähnt, der eine besondere Herausforderung darstellte (vgl. 4.4.1).

In den Fällen, in denen sich geeignete Experimente fanden, konnte in ersten Pilotierungen (vgl. 5.1) festgestellt werden, dass der zeitliche Umfang des Angebots die verfügbaren Rahmenbedingungen übersteigen würde, da die Lernenden zur Bearbeitung der Arbeitsmaterialien einen höheren Zeitbedarf hatten als dies zuvor antizipiert worden war. Aus diesem Grund mussten die Inhalte vom ersten bis zum finalen Entwurf auf den zur Verfügung stehenden zeitlichen Rahmen angepasst werden. Durch die parallel stattfindende Literaturrecherche, wurde der inhaltliche Fokus auf Technologieoptionen gelegt, die in aktuellen fachwissenschaftlichen Veröffentlichungen und Berichten zur Klimakrise als relevant angesehen wurden (vgl. 2.5). Da der Themenbereich eine hohe Komplexität aufweist, wurden thematische Einschränkungen auf Grund des Zeitrahmens und der Realisierbarkeit von Experimenten notwendig. Folglich mussten Maßnahmen der didaktischen Reduktion vorgenommen werden (vgl. Tabelle 22).

Tabelle 22. Übersicht der Maßnahmen der didaktischen Reduktion

CCS-Prozesskette	Ausgewählte Themenbereiche	Didaktische Reduktion
Carbon Capture	Post-Combustion Capture	Partikularisierung Prozessschritt Chemische Absorption mit Beispielsubstanz NaOH
	Direct Air Capture	Vernachlässigung von S-DAC-Verfahren und Fokussierung auf L-DAC-Verfahren
Carbon Storage	Geologische Speicherung in Kohleflözen	Beschränkung auf qualitative Ebene: Modellierung sorptiver Speicher mit Aktivkohle
Carbon Utilisation	Biologische Nutzung durch natürliche Einbindung	Schwerpunkt: Kultivierung von Mikroalgen, Vernachlässigung der Verfahren der anschließenden Rohstoffproduktion

Dementsprechend kann das final entstandene Angebot nicht dem Anspruch gerecht werden, die Gesamtheit der Thematik abzudecken. Für die didaktisierte Vermittlung mussten Schwerpunkte gesetzt werden. Durch den modularen Charakter der Einheiten besteht jedoch die Möglichkeit, neue Inhalte zu ergänzen oder bestehende Inhalte gänzlich auszutauschen, was eine Anpassung an Entwicklungen des Forschungsgebiets ermöglicht.

Obwohl die Thematik CCS als innovativ bezeichnet werden kann, ist es curricular noch wenig verankert (vgl. 4.1.1). In der 2020 durchgeführten Umfrage mit dem Titel *Uni fragt Schule – Bezugspunkt BNE und bilingualer naturwissenschaftlicher Unterricht* [218] schrieben die beteiligten Lehrkräfte der Thematik im Rahmen des regulären Chemieunterrichts mit 71% eine hohe Relevanz und Aktualität zu. 58% der Befragten sahen eine Notwendigkeit für die Entwicklung von Materialien für selbige Thematik. Dabei wurden Versuche, Videos, sowie Arbeitsblätter als wichtige Dateiformate herausgestellt.

71% der Lehrkräfte gaben an, dass sie auch ein ganztägiges Schülerlaborangebot besuchen würden. Für die Teilnahme an einer Lehrkräftefortbildung sprachen sich 86% aus, sofern die Inhalte eng an den Kernlehrplan angebunden würden. Diese Ergebnisse bestätigen die Bedeutung der Thematik für den Chemieunterricht und die Notwendigkeit der Entwicklung passender Arbeitsmaterialien.

Einsatz gezielter Sprachwechsel

Neben der fachlichen Ausrichtung sollte das bilinguale Schülerangebot durch Einsatz gezielter Sprachwechsel die Anbahnung einer doppelten Sachfachliteralität realisieren. Zur Entwicklung einer naturwissenschaftlichen Kompetenz in zwei Sprachen, sollten beide Sprachen integrale Bestandteile der Laborsequenz sein und Sprachwechsel funktional passend und geplant eingesetzt werden (vgl. 3.5.2).

Die fachsprachliche Analyse des Themenbereichs CCS in beiden Sprachen ist dafür ein erster Schritt, um Unterschiede auszumachen und potentielle Stolpersteine bei Sprachwechseln zu identifizieren. Bei der Evaluation der grundlegenden Fachbegriffe der Chemie fällt auf, dass viele einen ähnlichen sprachlichen Ursprung haben und leicht übertragbar sind (vgl. 3.6.1). Dies lässt sich z.B. an den Begriffen Reaktion (reaction), chemische (Summen)Formel (chemical formula) und Chemikalien (chemicals) deutlich machen.

Für das Lernmodul benötigen die Schülerinnen und Schüler gewisse Vorkenntnisse, die sie aus dem deutschsprachigen Fachunterricht mitbringen (vgl. 4.2.1). Der Großteil dieser deutschen Fachbegriffe ist den englischen ebenfalls ähnlich und Übertragungen in die englische Sprache können meist einfach hergestellt werden. Exemplarisch seien hier Photosynthese (photosynthesis), Klimawandel (climate change), Kohlenstoffdioxidemissionen (carbon dioxide emissions), fossile Brennstoffe (fossil fuels), Kohle (coal) und Kohlenstoffkreislauf (carbon cycle, false friend: carbon circle) genannt. Bei einer Beschreibung der CCS-Technologien kommt den Lernenden der Umstand zu Gute, dass auch in der deutschsprachigen Literatur meist die englischsprachigen Begriffe (z.B. Direct Air Capture, Post-Combustion Capture) verwendet werden. Die deutschen Äquivalente (z.B. Abscheidung aus der Luft, Abscheidung nach der Verbrennung) sind weniger verbreitet. Abweichungen bei den Begrifflichkeiten in der L1 und L2 gibt es im Besonderen bei der Bezeichnung der Laborgeräte. Hier muss im Schülerlabor gezielt durch z.B. Visualisierungshilfen und Annotationen unterstützt werden.

Konzeptuell gibt es beim Wechsel der Fachsprache in L1 und L2 wenig Probleme, da die Nomenklatur, Begrifflichkeiten und chemischen Messmethoden weltweit durch die *The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)* festgelegt wird. Dadurch gibt es in Bezug auf die fachlichen Konzepte in den meisten Bereichen der Chemie große Übereinstimmungen. Ein kleinerer Stolperstein könnte bei der Angabe von Kohlenstoffdioxid-Equivalenten oder der Angabe von Emissionswerten auftreten. Bei englischsprachigen und deutschen Quellen kommt es durch die Angabe der Zahlenwerte zu Verunsicherungen. So wird in beiden Sprachen von Millionen [engl. million] gesprochen, werden jedoch Milliarden angegeben entspricht dies [engl. billion]. Entsprechend werden auch die SI-Präfixe M (Mega - 10^6) und G (Giga - 10^9) abgeleitet. Probleme treten dann auf, wenn die SI-Einheiten versprachlicht werden müssen, also z.B. 5 Gt CO₂-Emissions. Im Deutschen wird von 5 Milliarden Tonnen und im Englischen von 5 billion tons gesprochen.

Da die Mehrheit der Lernenden keine Vorerfahrungen mit bilingualem Chemieunterricht haben wird (vgl. 3.6), bietet es sich an, bereits bekannte Fachmethoden und Aufgabenformate aus dem deutschsprachigen Fachunterricht und dem Fremdsprachenunterricht einzusetzen, um Sprachwechsel methodisch umzusetzen. Dabei ist es sinnvoll, wenn es zu einem „Schulterchluss“ der Methoden der Chemiedidaktik und Fremdsprachendidaktik kommt [126, S.196].

Aus der Chemiedidaktik können z.B. der Wechsel der Repräsentationsformen, sowie die klare Trennung der Stoff- und Teilchenebene mit Hilfe des Johnstone-Dreiecks einfließen, während aus dem Fremdsprachenunterricht Mediationsaufgaben und sprachensible Methodenwerkzeuge verwendet werden könnten. Durch die Kontrastierung der beiden Sprachen, indem z.B. Begriffe klar definiert und erläutert werden, können Lernschwierigkeiten abgebaut werden [237, S.3]. Dies kann z.B. durch den Einsatz von Vokabellisten oder Glossaren realisiert werden. Die so initiierten funktionalen und von der Lehrkraft geplanten Sprachwechsel, haben im Laborangebot eine hauptsächlich kognitive und kommunikative Funktion. Die Schülerinnen und Schüler sichern ihr Verständnis, erwerben Fachbegriffe in beiden Sprachen, bauen Fachkonzepte in beiden Sprachen auf und überwinden inhaltliche Herausforderungen [140, S.93].

Da es sich um kurzzeitige Interventionen handelt, sollte in Gruppenphasen ein gewisses *code-switching* erlaubt sein, wobei die Fremdsprache als zentrale Arbeitssprache fungiert [188, S.16-17].

Das Wechseln der Sprache ist in diesen Situationen ungeplant und erfüllt für die Lernenden affektive und kommunikative Funktionen. Im Besonderen bei Diskussionen von brisanten Themen wie dem Klimawandel, kann der Wechsel von der L2 zu der L1 einen leichteren emotionalen Zugang ermöglichen. Sollten im Austausch fremdsprachliche Herausforderungen auftreten, können Wechsel in die L1 ebenfalls helfen diese zu überwinden [140, S.93].

In der 2020 durchgeführten Umfrage mit dem Titel *Uni fragt Schule – Bezugspunkt BNE und bilingualer naturwissenschaftlicher Unterricht* beschäftigte sich ein Teil der Fragen mit dem bilingualen Chemieunterricht [218]. Nur 38% der befragten Lehrkräfte gaben an, dass sie sich für diesen interessieren. Die Mehrheit (66%) hatte keine Vorerfahrungen mit bilinguaem Unterricht. Nur acht Teilnehmende hatten schon einmal Chemie bilingual unterrichtet. Dies ist ein Phänomen, was der mangelnden Verbreitung von bilingualen Chemieunterricht geschuldet ist (vgl. Kapitel 3.6) und eine Implementation und Erprobung von Einheiten erschwert. Durch diesen Blickwinkel sollte man auch das Antwortverhalten zu einem bilingualen Schülerlabor betrachten, das sich nur 19% der Befragten wünschten. Dies entspricht der Zahl der Lehrkräfte mit Vorerfahrungen im Bereich bilingualer Chemieunterricht (BCU). Die Lehrkräfte sprachen sich dennoch mit 41% für die Eignung von CCS als Thematik für den BCU aus, passende Materialien wünschten sich 25%. Die Ergebnisse zeigen anhaltende Vorbehalte der Lehrkräfte gegenüber bilingualen Lernangeboten im Fach Chemie, besonders wenn sie selbst noch keine Erfahrungen mit BCU gemacht haben.

Nach einigen Pilotierungen und Erprobungen (vgl. 5) wurde deutlich, dass sich der alleinige Einsatz der englischen Sprache auf Grund der Kürze der Interventionen herausfordernd gestalten würde. Die Schülerlaborsequenz sollte so gestaltet werden, dass auch Lerngruppen ohne bilinguale Vorerfahrungen daran teilnehmen könnten. Eine reine Vermittlung auf Englisch wie im ersten Entwurf vorgesehen (vgl. Abbildung 99) schien daher nicht sinnvoll.

Um eine intendierte bilinguale Diskurskompetenz anzubahnen (vgl. 4.3.1) wurde zeitweise überlegt, zu Beginn der Intervention ein deutschsprachiges Modul zu etablieren und die Kenntnisse dann auf Englisch in weiteren Modulen zu vertiefen. Auf Grund der zeitlichen Rahmenbedingen und den erfolgreichen Erfahrungen mit hauptsächlich englischsprachigem Material im Verlauf der Erprobungen der SommerUni (vgl. 5.2.1) blieb schlussendlich die Erkenntnis, dass der Einsatz von beiden Sprachen, angelehnt an den Typ C nach Diehr, notwendig sein würde. Die sprachlichen Kenntnisse der Lernenden sollten in beiden Sprachen aufgebaut werden. Darüber hinaus ermöglichte diese Vorgehensweise auch die Entkräftung der Vorbehalte einiger Lehrkräfte gegenüber eines bilingualen Angebots. Beide Sprachen sollten geplant mit gezielten Sprachwechseln im finalen Lernangebot eingesetzt werden (vgl. Abbildung 99). Darüber hinaus zeigte sich in den Erprobungen, dass etwaige Hemmnisse gegenüber der Fremdsprache besonders durch die Erlaubnis von *code-switching* und dem Einsatz von Betreuenden als *language tutors* (vgl. 4.2.2) abgebaut werden konnten.

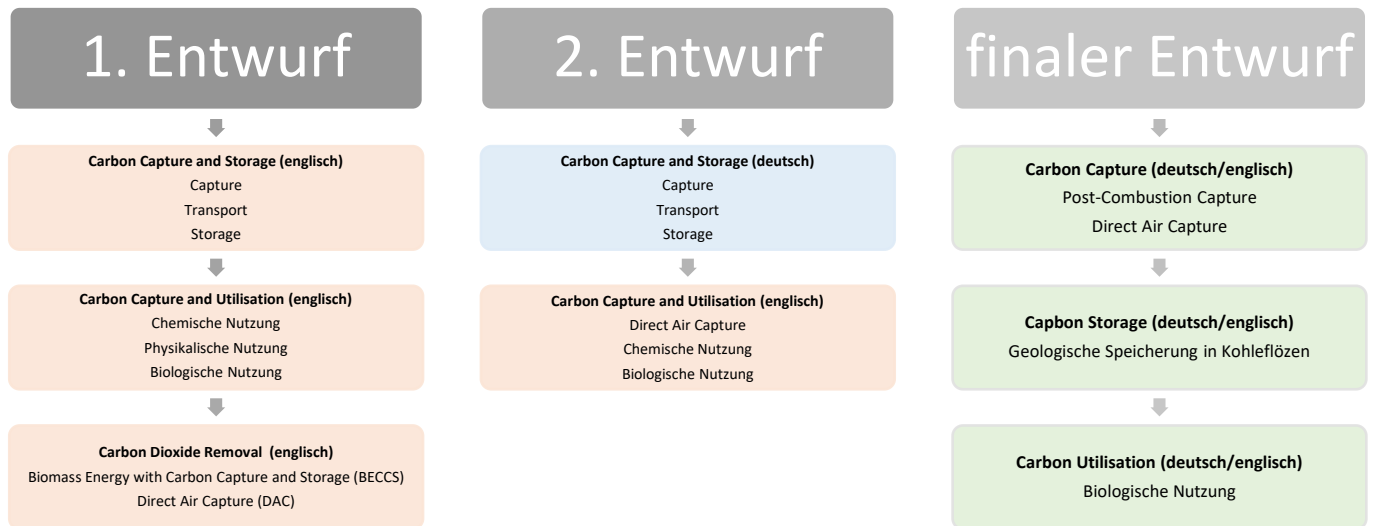


Abbildung 99. Entwicklung des Einsatzes der Sprachwechsel der Schülerlaborsequenz

In Abbildung 100 ist eine konstruktivistische Lernschleife zu dem Lernbaustein *Carbon Storage* dargestellt. Innerhalb der Lernschleife werden deutsch- und englischsprachige Elemente und Sprachwechsel integriert. Diese Konzeption steht exemplarisch für weitere Stationen des bilingualen Lernangebots, die in analoger Weise sprachlich aufbereitet sind.

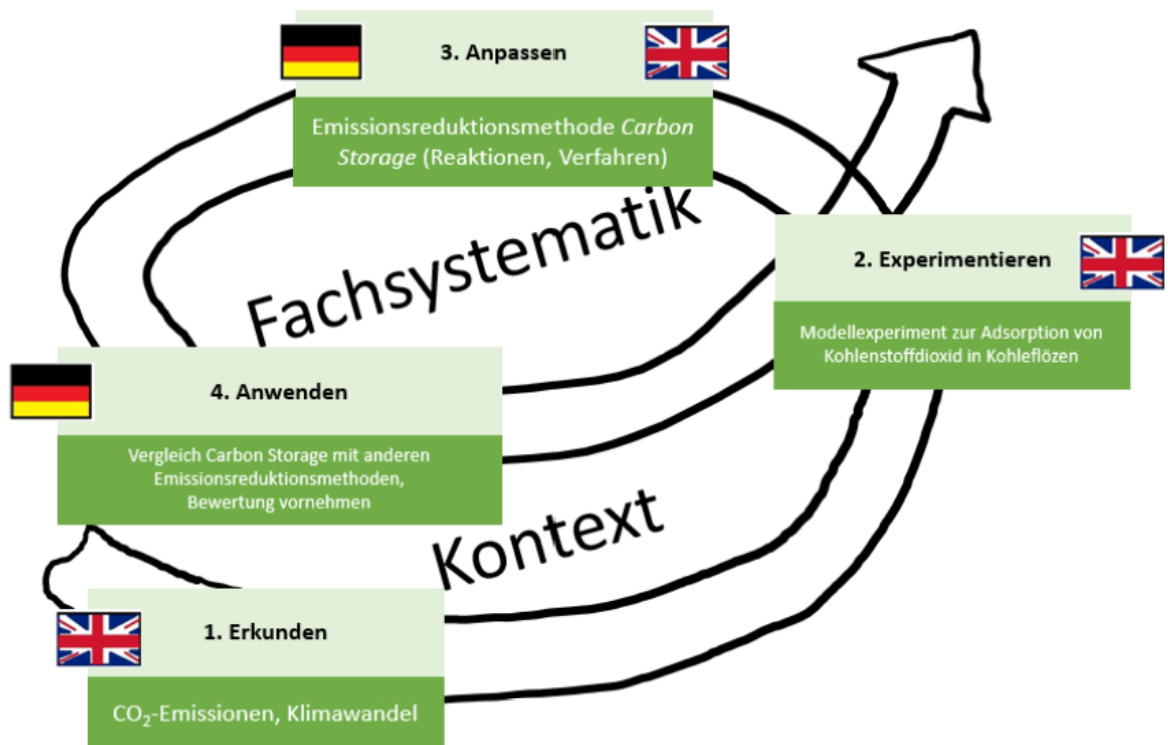


Abbildung 100. Lernschleife zu Station 2 Carbon Storage mit deutsch- und englischsprachigen Elementen¹⁶⁷

¹⁶⁷ Abbildung konstruktivistische Lernschleife Carbon Storage: eigene Darstellung nach Vorlage [22, S.65].

Bildung für nachhaltige Entwicklung

Zur Erschließung der Fachthematik CCS in einem bilingualen Lernsetting wurde das Bildungskonzept BNE in das Lernangebot integriert. Dies bietet sich an, weil der Themenbereich sinnvoll unter Aspekten der Nachhaltigkeit mehrdimensional betrachtet und evaluiert werden kann.

Um dies zu visualisieren wurden dem Laborangebot drei passende Sustainable Developmental Goals (SDGs) zugeordnet (vgl. Abbildung 101). Die Lernenden beschäftigen sich mit Maßnahmen aus SDG 7 *bezahlbare und saubere Energie*, SDG 9 *Industrie, Innovation und Infrastruktur* sowie SDG 13 *Maßnahmen zum Klimaschutz*, die zum Erreichen der Zielsetzungen beitragen können.



Abbildung 101. SDGs 7, 9 und 13¹⁶⁸

SDG 7 beschreibt die Zielsetzung, den Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und moderner Energie für alle zu sichern. Im Unterziel 7.a wird darüber hinaus auf die Wichtigkeit der internationalen Zusammenarbeit hingewiesen, die u.a. Zugang und Forschung zu saubereren fossilen Energie-Technologien und damit einhergehenden Investitionen in die Energieinfrastruktur forciert. Dieser Umstand wird in Ziel 9 erweitert, in dem eine widerstandsfähige Infrastruktur aufgebaut und eine breitenwirksame und nachhaltige Industrialisierung gefördert und Innovationen unterstützt werden sollen. Im Unterziel 9.3 wird eine geplante Verbesserung und Nachrüstung von industriellen Prozessen mit nachhaltigeren Technologieoptionen bis 2023 beschrieben [207]. Abschließend werden in SDG 13 umgehend die Ergreifung von Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen als Zielsetzung formuliert.

Im Unterziel 13.3 wird die Verbesserung der Bildungsangebote und die Verbreitung von BNE in Curricula und Lehrkräftebildung forciert [238].

In den Zielsetzungen der SDGs lässt sich sowohl die CCS-Prozesskette thematisch verankern, als auch die Auseinandersetzung mit der Technologie in einem Bildungskontext. Darüber hinaus fügt sich die Thematik passgenau in die nationalen Rahmenvorgaben (vgl. 4.1.1) ein und lässt sich in der Leitlinie BNE für das Fach Chemie in den Themenbereichen *Klimawandel, Stoffkreisläufe, Energieversorgung und technischer Fortschritt* [186, S.35] verorten.

Für das Schülerlaborangebot wurde außerdem versucht, die Förderung von vernetzenden Wissensprozessen durch eine mehrdimensionale Perspektive zu realisieren. Die Lernenden sollten mit Hilfe einer relevanten gesellschaftlichen Fragestellung *Wohin mit den CO₂-Emissionen?* [engl. *What to do with CO₂?*] Carbon Capture and Storage Technologien aus ökologischer, ökonomischer und politischer Perspektive betrachten und bewerten.

¹⁶⁸ Abbildung mit drei SDGs: <https://unric.org/de/17ziele/> (letzter Zugriff 17.02.25).

Durch die Berücksichtigung mehrerer Dimensionen und deren Interdependenz sollen die vielfältigen Beziehungen und Abhängigkeiten der einzelnen Dimensionen aufgezeigt werden.

Ziel war es, einen potentiellen technologischen Lösungsansatz für die Klimakrise experimentorientiert zu thematisieren, mit Hilfe von bestimmten Kriterien zu bewerten und daraus Handlungsoptionen abzuleiten. Um dies zu ermöglichen, müssen die Lernenden neben Experimentieranleitungen, zusätzliche Informationen zu den Technologien über Videos, Informationstexte und Informationskarten erhalten.

4.3.3 Aufbau der Stationen

Nach Berücksichtigung der konzeptionellen Schwerpunkte wurde eine Grundstruktur des bilingualen Laborangebots entworfen. Den Lernenden sollten Pflichtstationen und optionale Stationen zur Bearbeitung zur Verfügung stehen.

Pflichtstationen

Der grundlegende Aufbau des Laborangebots kann Abbildung 102 entnommen werden. Neben den einzelnen Phasen der Durchführung sind dort die verwendeten Materialien, die angesprochenen BNE-Dimensionen und fächerübergreifende Ansatzpunkte angegeben. Die jeweils dominante Sprache der einzelnen Phasen ist mit der entsprechenden Flagge gekennzeichnet.

Nach einem kurzen Einstieg in das Thema arbeiten die Lernenden arbeitsteilig an drei verschiedenen Stationen. Die Pflichtstationen wurden angelehnt an die Grundstruktur der konstruktivistischen Lernschleife für die Lernenden entworfen (vgl. 4.3.2). Ausgehend von einem Alltags- und Lebensweltbezug werden sie in die zu bearbeitende Technologieoption eingeführt. Danach bearbeiten sie ein dazu passendes Experiment, welches sie möglichst selbstständig durchführen und auswerten. Anschließend wird weiteres Hintergrundwissen durch einen Informationstext zur Verfügung gestellt. Die Erkenntnisse aus den Stationen werden dann gebündelt und in einer Expertenkarte „Expert Card“ zusammengefasst. Diese Karten stellen sich die Lernenden gegenseitig auf Englisch vor und nehmen dann eine Zuordnung in die CCS-Prozesskette und Bewertung der Technologie vor. Die Vorstellung der Erkenntnisse und der abschließende gemeinsame Austausch erfolgen auf Deutsch.










  	Modulinhalte	Dimension BNE <i>dimensionsbezogene Schwerpunkte der Module</i>					Interdisziplinäre Aspekte
	Versuche und Arbeitsmaterial	ökologisch	ökonomisch	sozial	Kult- urell	politisch	
Einstieg  	<ul style="list-style-type: none"> • Sprachwechsel (zeitökonomische, affektive Funktion) • Einführung in die Lernumgebung und das Thema 	Klimaschutz Stoffkreisläufe	Technologischer Fortschritt				
Station 1:  Carbon Capture Möglichkeiten der CO ₂ -Abtrennung Schwerpunkt: Senkung des CO ₂ -Gehalts durch Direct Air und Post-Combustion Capture	<ul style="list-style-type: none"> • Schülerexperiment: Absorption of Carbon Dioxide • Infotext: Post-Combustion Capture • Video: The Company Climeworks and their Project • Schülerexperiment: Absorption Rate of Carbon Dioxide with Different Solvents • Expert Card • Sprachwechsel (kognitive und kommunikative Funktion) • Mediation Task: Sustainability of the Direct Air Capture Technology 	Klimaschutz Stoffkreisläufe	Technologischer Fortschritt Wirtschaftskreisläufe Energieversorgung				Geschichte wirtschaftliche und technische Entwicklungen in der Vergangenheit und Reflexion der Konsequenzen für aktuelle Anforderungen unserer Gesellschaft
Station 2:  Carbon Storage Möglichkeiten der CO ₂ -Speicherung Schwerpunkt: Senkung des CO ₂ -Gehalts durch CCS und Beurteilung von Nutzen und Chancen	<ul style="list-style-type: none"> • Video: Carbon Capture and Storage • Model Experiment 1: Geological Storage of Carbon Dioxide in Coal Seams • Model Experiment 2: Desorption of Carbon Dioxide in Coal Seams • Infotext: Questions answered about CCS • Expert Card • Sprachwechsel (kognitiv und kommunikative Funktion) • Mediation Task: Model Experiment 3 - Lime water test • Sprachspiel: Wortsuche 	Klimaschutz Stoffkreisläufe	Technologischer Fortschritt Wirtschaftskreisläufe			Maßnahmen zur Bewältigung des Klimawandels Demokratische Prozesse Weltwirtschaft	Politik und Wirtschaft Externalisierung von Umweltbelastungen volkswirtschaftlich, auch im globalen Kontext, wirksam begegnen können
Station 3:  Carbon Utilisation CO ₂ als Rohstoff Schwerpunkt: Pflanzen und Algen als Basis für Biotreibstoffe und Mittel zur Reduzierung von CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Schülerexperiment: Carbon Dioxide and Photosynthesis • Video: The Diversity of Algae • Expert Card • Sprachwechsel (kognitive und kommunikative Funktion) • Mediation Task: Microalgae as Climate Saviours • Sprachspiel: Kreuzworträtsel 	Klimaschutz Stoffkreisläufe Ressourcenverbrauch	Technologischer Fortschritt Wirtschaftskreisläufe Energieversorgung				Biologie Ökologische Auswirkungen der globalen Nutzung von Rohstoffen und mögliche Alternativen
Präsentation und Abschlussdiskussion 	<ul style="list-style-type: none"> • Sprachwechsel (kognitive und kommunikative Funktion) • Vorstellung der vervollständigten CCUS-Grafik, Präsentation der Ergebnisse, Formulierung von Handlungsoptionen 						

Abbildung 102. Struktur der Schülerlaboreinheit

Station 1 *Carbon Capture* beschäftigt sich mit den Möglichkeiten der Abtrennung von Kohlenstoffdioxid. Exemplarisch werden die Post-Combustion Capture und Direct Air Capture vorgestellt. Mit einem Video der Firma Climeworks, welches deren Projekt in Island (vgl. 2.4.1) vorstellt, erhalten die Lernenden einen exemplarischen Eindruck über die Etablierung der DAC-Technologie. Als Versuche werden die Absorption von Kohlenstoffdioxid in Natronlauge (vgl. 4.4.2.3) und die Absorption von Kohlenstoffdioxid in verschiedenen alkalischen Lösungsmitteln durchgeführt (vgl. 4.4.2.4). Ein Informationstext zu Post-Combustion Capture und eine Mediationsaufgabe zu DAC komplettieren das Lernangebot.

In Station 2 *Carbon Storage* wird die geologische Speicherung in Kohleflözen thematisiert. Neben einem dreiteiligen Modellexperiment zur Adsorption von Kohlenstoffdioxid (vgl. 4.4.2.5), schauen sich die Lernenden ein Video zur CCS-Prozesskette an und bearbeiten eine Mediationsaufgabe und ein Wortsuchspiel.

Der Versuch Kohlenstoffdioxid als Einflussfaktor auf die Photosynthese ist zentraler Bestandteil der Station 3 *Carbon Utilisation* (vgl. 4.4.2.6). Die Schülerinnen und Schüler setzen sich mit der Rolle von Wasserpflanzen zur Aufnahme und Nutzung von Kohlenstoffdioxid auseinander. Am Beispiel der Mikroalgen arbeiten sie mit Hilfe eines Lernvideos und eines Mediationstextes die Vor- und Nachteile dieser Technologieoption heraus. Im Anschluss können sie zur Festigung der englischen und deutschen Fachbegriffe auch noch ein Kreuzworträtsel bearbeiten.

Optionale Stationen

Für Lernende, die die Bearbeitung ihrer Pflichtstation schneller als andere Gruppen beendet haben, stehen noch vier optionale Stationen zur Verfügung (vgl. Abbildung 103). Dabei haben die Lernenden die Wahl, ob sie in *Optional 1* eine Rechercheaufgabe zu weiteren Pilotprojekten der Technologien vornehmen, in *Optional 2* ihren CO₂-Fußabdruck kalkulieren, in *Optional 3* ein Taboo-Sprachspiel mit englischen und deutschen Fachbegriffen bearbeiten oder in *Optional 4* ein Experiment zum Kohlenstoffdioxid-Kohlensäure-Gleichgewicht (vgl. 4.4.2.2) durchführen möchten. Die verschiedenen Stationen adressieren verschiedene BNE-Dimensionen und können auch für fächerübergreifende Betrachtungen genutzt werden.






	Modulinhalte	Dimension BNE <i>dimensionsbezogene Schwerpunkte der Module</i>					Interdisziplinäre Aspekte
	Versuche und Arbeitsmaterial	ökologisch	ökonomisch	sozial	kulturell	politisch	
Optional 1:  Projects for Greenhouse Gas Removal <i>Schwerpunkt:</i> Weltweite Verbreitung der Technologien visualisieren und Pilotprojekte kennenlernen	<ul style="list-style-type: none"> Rechercheaufgabe: Projects for Greenhouse Gas Removal 	Stoffkreisläufe Klimaschutz	Technologischer Fortschritt			Entwicklungszusammenarbeit Demokratische Prozesse	Physik Energieversorgung der Zukunft, Energiespeicherung und Verteilung
Optional 2:  Carbon Footprint Calculator <i>Schwerpunkt:</i> Reflexion des eigenen Konsumverhaltens, persönlichen Fußabdruck berechnen, Impulse für einen nachhaltigen Lebensstil und Konsum	<ul style="list-style-type: none"> Selbstevaluation: Carbon Footprint Calculator 		Technologischer Fortschritt Konsummuster / Lebensstile	Inter- und intragenerationelle Gerechtigkeit Gestaltbarkeit nachhaltiger Lebensweisen	Wertebildung Verhältnis Mensch-Umwelt		Erdkunde Natürlichen Lebensgrundlagen für Folgegenerationen durch nachhaltiges Wirtschaften sowie soziales und ökologisch verträgliches Handeln sicherstellen Praktische Philosophie Entscheidung und Gewissen, Freiheit und Verantwortung
Optional 3:  Taboo Game <i>Schwerpunkt:</i> deutsche und englische Fachbegriffe erklären und wiederholen	<ul style="list-style-type: none"> Sprachwechsel (kommunikative Funktion) Taboo Game mit deutschen und englischen Begrifflichkeiten 						Englisch Bilinguale Diskurskompetenz, Funktionale kommunikative Kompetenz: Sprechen, Sprachbewusstheit
Optional 4:  How Does Temperature Affect the Carbon Dioxide/Carbonic Acid Equilibrium? <i>Schwerpunkt:</i> Anknüpfung und Wiederholung von Vorkenntnissen zum chemischen Gleichgewicht	<ul style="list-style-type: none"> Schülerexperiment mit Auswertungsfragen 	Stoffkreisläufe					Politik und Wirtschaft: die Frage, wie der Externalisierung von Umweltbelastungen volkswirtschaftlich, auch im globalen Kontext, wirksam begegnet werden kann

Abbildung 103. Übersicht der optionalen Stationen des Schülerlaborangebots

4.3.4 Zwischenfazit

Durch die vorgenommenen Entscheidungen aus den Kapiteln 4.3.1 bis 4.3.3, können die aufgestellten konzeptionellen Fragestellungen (F) nun wie folgt beantwortet (A) werden:

(F7) *Welche Planungsstrategien liegen dem bilingualen Schülerlaborangebot zu Grunde?*

(A7) Den Planungsrahmen für das bilinguale Schülerlaborangebot bot das von Coyle, Hood und Mash etablierte 4Cs-Framework. Dieses wurde durch spezifische Strategien wie z.B. Lernendenaktivierung und die Integration von Scaffoldingmaßnahmen ausdifferenziert. Auf Grundlage dieser allgemeinen Planungsstrategien wurden dann konkrete Kompetenzen formuliert.

(F8) *Welche Kompetenzen werden im Lernangebot geschult?*

(A8) Das Schülerlaborangebot wurde als kompetenzorientiertes Unterrichtsvorhaben konzipiert. Es werden sowohl Kompetenzen des Sachfachs Chemie, als auch die bilinguale Diskurskompetenz und interkulturelle Kompetenzen geschult. Darüber hinaus werden Möglichkeiten des fächerübergreifenden Arbeitens aufgezeigt.

(F9) *Wie müssen die fachlichen Inhalte zu CCS für das Schülerlaborangebot didaktisch reduziert werden?*

(A9) Auf Grund des vorgegebenen Formats und Zeitrahmens des Schülerlaborangebots und der intendierten Zielgruppe, mussten in Bezug auf die Vermittlung der Fachthematik Schwerpunkte gesetzt werden. Um die Komplexität der involvierten Prozesse wie *Post-Combustion Capture* oder *DAC* zu reduzieren, wurden didaktische Reduktionsmaßnahmen vorgenommen. Im Besonderen wurden Inhalte vernachlässigt und teilweise partikularisiert, um sie für die Lernenden in dem kurzen Interventionszeitraum verständlich zu machen. Weitere didaktische Anpassungen wurden auf Grund der Verfügbarkeit von passenden Experimenten und deren Durchführbarkeit im intendierten Zeitrahmen vorgenommen. Schlussendlich mündete der Planungsprozess in drei Pflichtstationen, die nach der Phasierung einer konstruktivistischen Lernschleife angelegt wurden, um die Fachsystematik, den Kontext und die beiden verwendeten Sprachen miteinander zu verbinden.

(F10) *Wie wird die deutsche und englische Sprache eingesetzt, um die sachfachliche Diskurskompetenz in zwei Sprachen zu realisieren?*

(A10) Damit beide Sprachen integrale Bestandteile der Laborsequenz sein können, müssen funktionale Sprachwechsel geplant eingesetzt werden. Dazu werden die einzelnen Lernsequenzen sprachlich miteinander verwoben. Deutsch- und englischsprachige Anteile wechseln sich ab. Nach einer Erarbeitung in der englischen Sprache erfolgten die Sicherung und Anwendung des Gelernten auf Deutsch. Den Lernenden bekannte Fachmethoden und Aufgabenformate aus dem deutschsprachigen Fachunterricht und dem Fremdsprachenunterricht werden verwendet, um die Sprachwechsel methodisch umzusetzen.

(F11) Welche Aspekte der BNE finden sich im Laborangebot wieder?

(A11) Das Lernangebot schließt thematisch an internationale und nationale Rahmenvorgaben an und versucht in allen Modulen dimensionsbezogene Schwerpunkte zu ökologischen, ökonomischen und politischen Aspekten zu etablieren. Die Lernenden sollen so besonders im Bereich der Bewertungskompetenz geschult werden, um später in der Lage zu sein, etwaige Handlungsoptionen formulieren zu können. Dies lässt sich nur realisieren, wenn den Schülerinnen und Schülern neben Fachinhalten auch zusätzliche Informationen zu den Technologieoptionen über Videos und Infotexte zur Verfügung gestellt werden.

4.4 Experimentauswahl und Adaption

Im folgenden Teilkapitel wird die Auswahl und Adaption von geeigneten Experimenten für das Schülerlaborangebot beschrieben. Dabei werden folgende Fragestellungen adressiert:

(F12) Welche Versuche zu CCS existieren bereits?

(F13) Welche Versuche eignen sich für das geplante Setting?

(F14) Welche Adaptionen müssen vorgenommen werden?

4.4.1 Analyse und Auswahl von geeigneten Experimenten

Zu Beginn des Projekts wurden bereits bestehende englischsprachige und deutschsprachige didaktisierte Quellen nach schulnahen Experimenten gesichtet. Trotz der Vielseitigkeit des Materials im englischsprachigen Bereich, waren die experimentellen Umsetzungen meist eher auf eine jüngere Zielgruppe ausgerichtet. So wurde z.B. ein Modellexperiment für die Abtrennung von Kohlenstoffdioxid vorgeschlagen, indem man einen Luftballon auf eine Mineralwasserflasche stülpt [239, S.37-38]. Die geologische Speicherung wurde durch das Einpusten von Atemluft mit Hilfe eines Strohhalmes in Kalkwasserlösung modelliert [240, S.47-50]. In anderen Beispielen wurde die Porosität und Permeabilität verschiedener Speicherstätten mit unterschiedlichen Arten von „Luft-Schokoladen“ verdeutlicht, die in Milch gegeben wurden. Anschließend versuchten die Lernenden die Flüssigkeit mit Hilfe der Schokolade anzusaugen¹⁶⁹.

Die beschriebenen Experimente waren für die intendierte Zielgruppe im Schülerlabor zu einfach und nicht altersgerecht. Für die Sekundarstufe II fanden sich englischsprachige Lernmaterialien zu CCS, die jedoch meist ohne Experimente auskamen und einen Schwerpunkt auf die Bewertung der Technologie legten. Bilingual-englische Module zu dem Themenbereich existierten nach den Ergebnissen der Recherchebemühungen nicht.

¹⁶⁹ Versuchsvideo verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=gduSKRebnxA> (letzter Zugriff 30.10.24).

In deutschsprachigen Veröffentlichungen fanden sich viele Experimente zu BNE-relevanten Themen wie z.B. Klima, Kalkkreislauf und Versauerung der Meere, die mit der Thematik CCS in Verbindung gebracht werden könnten. Diese Vielfalt an Versuchen lässt sich mit der curricularen Verankerung der Themen begründen. CCS wurde in den Materialien teilweise als Thematik behandelt, jedoch meist ohne die Verwendung von Experimenten.

In chemiedidaktischen Veröffentlichungen fanden sich einige Experimentiervorschläge [241,242]. Die meisten der vorliegenden Veröffentlichungen richteten sich jedoch primär an jüngere Zielgruppen der Sekundarstufe I [243] oder sehr viel ältere Lerngruppen an Universitäten [244].

Folglich war die Auswahl und Integration von Experimenten für das Schülerlaborangebot mit gewissen Herausforderungen verbunden. Um geeignete Experimente auszuwählen, wurden Kriterien aus der chemiedidaktischen Literatur zu Grunde gelegt (vgl. Tabelle 23).

Tabelle 23. Chemiedidaktische Auswahlkriterien für Experimente

Nr.	nach Pfeifer, Lutz, Bader (2002) [245, S.295-297]	nach Barke, Harsch (2014) [230, S.160f]	nach Reiners (2017) [246, S.106f]	nach Sommer et al. (2019) [247, S.464f]
1	Der Altersstufe angemessen	Für die Altersstufe geeignet (motivierend, interpretierbar)	für Altersstufe der Lernenden geeignet	Angemessenheit an die Altersstufe der Lernenden
2	Auf vorhanden Kenntnissen aufbauen	Auf vorhandene Kenntnisse der Lernenden aufbauen	Einbezug Vorkenntnisse	Aufbau auf Vorkenntnissen
3/4	Zeigen, was es zu zeigen vorgibt Deutlich erkennbarer Effekt	Didaktisch „ergiebig“, bedeutsamen Sachverhalt der Chemie darstellen Deutlich erkennbarer Effekt	Präzise Formulierung Beobachtungsauftrag	Fachliche Richtigkeit, deutliche Effekte
5	Sicherheitsrichtlinien entsprechen	Kein Sicherheitsrisiko mit sich bringen	Sicherheitstechnische Vorgaben beachten (z.B. DGUV, Entsorgung)	Arbeitssicherheit und Gefährdungsbeurteilung
6	In zeitlichen Rahmen passen	Innerhalb angemessener Zeitspanne durchführbar sein	Organisatorische Vorgaben beachten (u.a. Kosten)	Zeitlicher Rahmen
7	Mit den vorhandenen Ausstattungen durchzuführen sein	Gegebenheiten der Schulsammlung zugeschnitten	Institutionelle Vorgaben beachten (räumliche Ausstattung, Gerätschaften)	Räumliche Gegebenheiten und Ausstattungen
8	Hohe Wahrscheinlichkeit des Gelingens	Hohe Wahrscheinlichkeit des Gelingens	Zeitliche Vorgaben (Gelingen, Erprobung, Zeitrahmen)	Erfolgreiche Durchführung
9	-	Als Schülerversuch einsetzbar sein		

Auf dieser Grundlage wurde ein eigener Kriterienkatalog (vgl. Abbildung 104) erstellt, der die bekannten Kategorien inkludiert.

Kriterium 1: Ist das Experiment für die Lernenden altersgemäß angemessen?
Kriterium 2: Baut es auf vorhandene Kenntnisse der Lernenden auf?
Kriterium 3: Zeigt es einen bedeutsamen Sachverhalt der Chemie? Ist dieser fachlich richtig?
Kriterium 4: Zeigt es einen deutlich erkennbaren Effekt?
Kriterium 5: Entspricht es den Sicherheitsrichtlinien? Was muss beachtet werden?
Kriterium 6: Ist es innerhalb einer angemessenen Zeitspanne durchführbar?
Kriterium 7: Welche institutionellen Vorgaben müssen beachtet werden?
Kriterium 8: Hat das Experiment eine hohe Gelingwahrscheinlichkeit?
Kriterium 9: Ist das Experiment als Schülerversuch einsetzbar?

Abbildung 104. Kriterien zur Auswahl von Experimenten

Da die CCS-Prozesskette sehr komplex ist, liegt die Schlussfolgerung nahe, dass die fachlichen Inhalte für Schülerinnen und Schüler didaktisch reduziert, genauer, partikularisiert werden müssen. Durch die Betrachtung von Teilaspekten der Prozesskette, lassen sich die Fachinhalte in jeweils einem überschaubareren Rahmen erfassen. Der Komplexität der Abläufe geschuldet müssen einige Aspekte vernachlässigt werden und können nicht allumfänglich von den Lernenden erarbeitet werden (vgl. 4.3.2). Dabei wird darauf geachtet, dass die Lerninhalte und Experimente trotz didaktischer Reduktion fachlich richtig, angemessen und ausbaufähig sind [248, S.52-63]. Aus diesem Grund eignen sich besonders alltagsnahe, einfache Handversuche und Modellexperimente, um die Lernenden an die Thematik heranzuführen und die grundlegenden Abläufe und chemischen Prozesse zu erläutern. Nach Sommer et al. müssen drei Kriterien für Modellexperimente erfüllt werden. Der Bezug zur Originalanwendung muss gegeben sein, es sollten experimentelle Methoden des Faches Chemie genutzt werden und es findet eine materielle Modellierung des Originals statt [249, S.541-542].

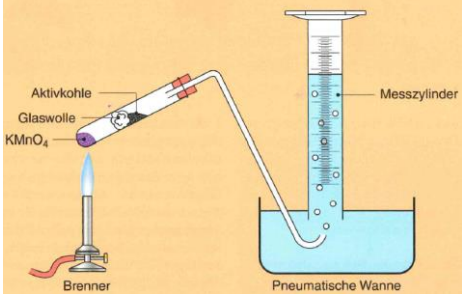
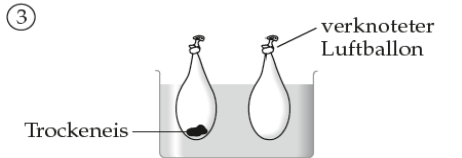

Im Folgenden wird eine Auswahl an Versuchen vorgestellt, die sich aus der Literatur- und Lehrwerksrecherche (Stand Dezember 2021) ergeben haben. Dabei wurde ein Konzept mit Hilfe von bestehenden Versuchen zu entwickeln als zentrale Zielsetzung verfolgt. Eine Eigenkonzeption von Versuchen in Form eines experimentellen Schwerpunktes des Promotionsprojekts war nicht vorgesehen. Die Experimente wurden zur besseren Strukturierung thematischen Bereichen zugeordnet und nach ihrer Eignung auf Grundlage der Kriterien für Schulexperimente evaluiert. Wurden sie als geeignet für das Lernsetting eingestuft, erfolgte eine spätere Erprobung und Adaption im Labor (vgl. 4.4.2).


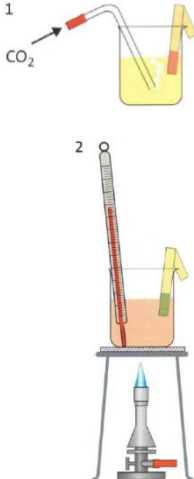
Als Kategorisierung wurden fünf thematische Teilbereiche für das Oberthema CCS ausgewählt, die im Folgetext genauer vorgestellt werden. Neben Experimenten für das Vorbereitungsmodul, wurden Experimente zu Carbon Capture, Carbon Transport, Carbon Storage und Carbon Utilisation recherchiert.

Im ersten Teilbereich werden Versuche zur Wiederholung des Wissens zu Kohlenstoffdioxid vorgestellt. Dieser Bereich bot vielfältige Möglichkeiten und eine große Auswahl an Experimenten.

Dies liegt darin begründet, dass die Inhalte im schulischen Regelunterricht als Pflichtstoff angesehen werden. Bei der Zusammenstellung wurde besonders darauf geachtet, Versuche auszuwählen, die experimentell schwieriger in der Schule umzusetzen sind. Dies ist z.B. bei den Versuchen mit Trockeneis gegeben, weil nicht alle Schulen die finanziellen Mittel oder Aufbewahrungsmöglichkeiten haben, um mit Trockeneis zu arbeiten. Weiterhin sollten die Experimente an bekannte Konzepte der Lernenden anknüpfen und zur Thematik CCS hinführen. Aus diesem Grund wurden Experimente zum chemischen Gleichgewicht und der Verbrennung von Kohle ausgewählt (vgl. Tabelle 24).

Tabelle 24. Experimente für das Vorbereitungsmodul



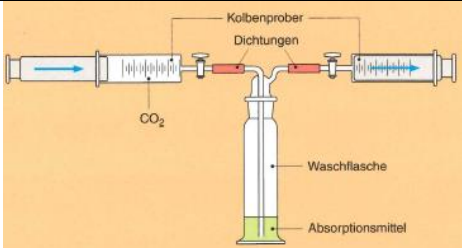
Beschreibung der Experimente	Bild
<p>Oxidation von Kohlenstoff und Volumenbestimmung des entstandenen Kohlenstoffdioxids</p> <p>In ein Reagenzglas werden 10 g Kaliumpermanganat gegeben und mit Glaswolle abgedeckt. Darüber wird 0,5 g getrocknete, gepulverte Aktivkohle gegeben. Das Reagenzglas wird verschlossen und in die Apparatur eingefügt (siehe Skizze). Anschließend wird die Aktivkohle bis zum Glühen erhitzt. Danach wird das Kaliumpermanganat von unten erhitzt. Das entstandene Gasvolumen kann am Messzylinder abgelesen werden.</p> <p>Der Versuch wurde als geeignet ausgewählt. Genauere Erläuterungen zum Experiment erfolgen in 4.4.2.1.</p>	 <p>Versuchsskizze [241, S.16]</p>
<p>Versuche mit Trockeneis</p> <p><i>Option 1: Untersuchung von Trockeneis</i></p> <p>Kleine Trockeneis-Pellets werden in einen Luftballon gegeben und dieser verschlossen. Anschließend wird der verschlossene Ballon in ein 60 Grad heißes Wasserbad gegeben. Zum Vergleich kann ein verschlossener Ballon ohne Trockeneis beobachtet werden (siehe Bild).</p> <p>Der verschlossene Ballon dehnt sich aus und ist nach ca. 3 Minuten so groß wie eine Honigmelone. Nach Zugabe in das Wasserbad dehnt er sich schneller aus und platzt nach ca. 1,5 Minuten. Das Trockeneis fällt dabei in das Wasserbad und bildet den typischen Nebel.</p> <p><i>Option 2: Trockeneis in verdünnter Natronlauge</i></p> <p>In ein Becherglas wird verdünnte Natronlauge mit Bromthymolblau-Indikator und in ein anderes Becherglas wird verdünnte Natronlauge mit Universalindikator hinzugefügt. Im Anschluss werden in jedes Becherglas je 2-3 kleine Stücke Trockeneis gegeben.</p> <p>Die Reaktion des Trockeneises ist nach Zugabe sehr deutlich sichtbar (siehe Bild rechts) und wird nach ca. einer Minute durch einen Farbumschlag des Indikators verdeutlicht.</p> <p>Option 1 und 2 wurden ausgewählt und im Labor erprobt. Auf Grund der späteren Gestaltung des Laborangebots wurden beide Optionen aus zeitlichen Gründen aus der Planung herausgenommen.</p>	 <p>Versuchsaufbau Option 1 [250]</p>  <p>Versuchsaufbau Option 2 [eigenes Foto]</p>


Beschreibung der Experimente	Bild
<p>Temperaturabhängigkeit chemisches Gleichgewicht</p> <p><i>Option 1: Beeinflussung der Lage des Kohlenstoffdioxid-„Kohlensäure“-Gleichgewichtes</i></p> <p>50 mL spritziges Mineralwasser werden in einen 100 mL Enghals-Erlenmeyerkolben gegeben und danach mit einem pH5-Merck-Indikator versetzt. Anschließend wird der Kolben mit einem Luftballon verschlossen. Der Kolben wird bis zum Farbumschlag erhitzt und dann im Eisbad abgekühlt, bis ein erneuter Farbumschlag auftritt (siehe Bilder).</p> <p>Gemäß der Originalquelle kann der Versuch auch mit Sprizentechnik durchgeführt werden. Laut den Autoren könnte man so sowohl die Temperatur- als auch die Druckabhängigkeit des Gleichgewichts demonstrieren. Die Versuche mit Sprizentechnik wurden im Labor erprobt. Auf Grund der fehlenden Zuverlässigkeit bei den beobachteten Effekten wurde die Versuchsversion mit Sprizentechnik ausgeschlossen und stattdessen die Version mit den Erlenmeyerkolben ausgewählt.</p> <p><i>Option: 2 Wie sauer ist die Kohlensäure?</i></p> <p>Entionisiertes Wasser wird bei Raumtemperatur in ein Becherglas gefüllt und mit einigen Tropfen Universalindikator versetzt. Kohlenstoffdioxid wird für zwei Minuten in die Lösung eingeleitet und anschließend die Farbe des Indikators notiert. Im zweiten Schritt wird die Lösung erwärmt und erneut die Farbe des Indikators notiert.</p> <p>Zur Feststellung der pH-Wert-Änderung kann auch Indikatorpapier verwendet werden (siehe Bild).</p> <p>Beide Versuchsoptionen wurden als geeignet ausgewählt. Genauere Erläuterungen zum Experiment erfolgen in 4.4.2.2.</p>	 <p>Versuchsaufbau Option 1</p> <p>[251, S.22-3-22-4]</p>  <p>Versuchsaufbau Option 2 [252, S.247]</p>

Der Bereich *Carbon Capture* stellte sehr lange eine große Herausforderung dar. Die verfügbaren, didaktisierten Experimente waren entweder zu einfach oder zu komplex, um sie mit Oberstufenlernenden durchzuführen. Auf der Suche nach modellhaften Experimenten für *Direct Air Capture* und *Post-Combustion* Prozesse, konnten dann jedoch zwei Versuche gefunden werden, die den Anforderungen für Lernendenexperimente gerecht werden konnten (vgl. Tabelle 25).

Tabelle 25. Experimente zum Themenbereich Carbon Capture



Beschreibung der Experimente	Bild
<p>Essig-Soda Flasche mit Ballon</p> <p>Essig und Backpulver werden in eine Trinkflasche eingefüllt. Anschließend wird ein Luftballon auf die Öffnung der Flasche gestülpt. Durch das bei der Reaktion entstehende Kohlenstoffdioxid, bläht sich der Ballon auf [239, S.39-40]. Ähnliche Versuche sind auch aus dem Grundschulbereich bekannt und werden z.B. auch als Rakete oder Vulkan umgesetzt.</p> <p>Der Versuch wurde auf Grund einer fehlenden Altersangemessenheit und fehlenden fachlichen Passung nicht ausgewählt.</p>	 <p>Versuchsaufbau [253]</p>
<p>Komplexer Modellbau Post-Combustion Anlage mit späterer geologischer Speicherung</p> <p>In der Vorschrift wird ein von Masterstudierenden konzipierter Aufbau einer modellhaften Post-Combustion Anlage mit Absorption durch Amine als Lösungsmittel beschrieben. Eine Alkohollampe fungiert als Emissionsquelle und generiert Verbrennungsgase, die dann in die Anlage eingeleitet werden. Als Lösungsmittel wird Monoethanolamin (MEA) verwendet, welches in der Absorber-Desorber-Anlage zur besseren Sichtbarkeit mit Fluorescein angefärbt wird. Am Ende der Desorber-Anlage kann Kohlenstoffdioxid extrahiert und durch die Kalkwasserprobe nachgewiesen werden. Die geologische Speicherung wird durch eine Vase mit verschiedenen farbigen Sand- und Gesteinsschichten repräsentiert (siehe Versuchsaufbau rechte Seite).</p> <p>Die Konzeption eines solchen Modells wurde auf Grund des benötigten Zeitraumens und den geringen Experimentiermöglichkeiten für Lernende, für das Schülerlabor ausgeschlossen. Außerdem ist die verwendete Chemikalie MEA ein Gefahrstoff und muss einer Ersatzstoffprüfung unterzogen, sowie im Abzug verwendet werden. Eine Nutzung einer solchen Modellanlage als Demoversuch oder Anschauungsobjekt kann jedoch zukünftig überlegt werden.</p>	 <p>Versuchsaufbau [244, S.633-634]</p>
<p>Absorption mit PET-Flaschen</p> <p>20 mL Natronlauge ($c(\text{NaOH}) = 2 \text{ mol/L}$) werden jeweils in zwei PET-Plastikflaschen gegeben. Eine Flasche wird mit Kohlenstoffdioxid, die andere mit Luft befüllt. Anschließend werden beide Flaschen verschlossen und geschüttelt.</p> <p>Die Flasche mit Kohlenstoffdioxid zieht sich nach kurzer Zeit zusammen und wird warm, während die andere Flasche unverändert bleibt (siehe Versuchsergebnis).</p> <p>Der Versuch wurde als geeignet ausgewählt. Genauere Erläuterungen zum Experiment erfolgen in 4.4.2.3.</p>	 <p>Versuchsergebnis [eigenes Foto] nach [244, S.635-636]</p>

Beschreibung der Experimente	Bild
<p>Absorption und Desorption mit Cola in kaltem und warmem Wasser</p> <p>Ein hohes Becherglas wird mit kaltem (5 °C) und ein anderes mit warmem Wasser (40 °C) gefüllt. Anschließend werden in zwei Reagenzgläser 40 mL Cola gegeben und die Reagenzgläser mit jeweils einem durchbohrten Stopfen verschlossen. Ein Reagenzglas wird mit dem Stopfen nach unten in das warme Wasser und eins in das kalte Wasser gestellt.</p> <p>Nach fünf Minuten hatte das Flüssigkeitsvolumen im warmen Wasser sichtbar abgenommen. Die genaue Messung ergab im Anschluss ein Restvolumen von 25 mL.</p> <p>Der Versuch wurde im Labor erprobt. Auf Grund der Klebrigkeit der Cola wurde diese durch Mineralwasser mit 1-2 Tropfen Universalindikator ersetzt.</p> <p>Die Volumenabnahme war im warmen Wasser deutlich sichtbar. Die Färbigkeit des Indikators änderte sich im warmen Wasser nur leicht (siehe Versuchsergebnis).</p> <p>Das Experiment wurde auf Grund der schwierigen Handhabbarkeit der Proben für die Anwendung als Schülerexperiment ausgeschlossen. Darüber hinaus war der Effekt nur deutlich sichtbar, wenn die Reagenzgläser beim Umdrehen verschlossen blieben und der Stopfen durchgehend festgehalten wurde. Das setzt eine schnelle und sorgsame Umsetzung voraus, die bei Schülerinnen und Schülern nicht immer gegeben ist. Der Versuch wurde aus diesen Gründen ausgeschlossen.</p>	 <p>Versuchsaufbau mit Cola [eigenes Foto] nach [244, S.635-636]</p>  <p>Versuchsergebnis mit Mineralwasser [eigenes Foto]</p>
<p>Bestimmung der Absorptionsraten</p> <p>Im Versuch werden geeignete Absorptionsmittel für Kohlenstoffdioxid untersucht. In eine Waschflasche werden 50 mL des gelösten Absorptionsmittels (NaOH, Na₂CO₃, CaCO₃) gegeben. Ein Kolbenprober wird anschließend mit 100 mL Kohlenstoffdioxid gefüllt und mit der Apparatur verbunden (siehe Versuchsaufbau). Anschließend wird das Gas durch das Absorptionsmittel geleitet. Am gegenüberliegenden Kolben wird das restliche Volumen des Gases abgelesen. Bei der Verwendung von Calciumhydroxid als Absorptionsmittel wird 5 g der Substanz in ein Trockenröhrchen gefüllt und mit Glaswolle an beiden Enden fixiert. Anstatt einer Gaswaschflasche wird das mit 2 mL Wasser angefeuchtete Trockenröhrchen an die Apparatur angeschlossen.</p> <p>Der Versuch wurde als geeignet ausgewählt. Genauere Erläuterungen zum Experiment erfolgen in 4.4.2.4.</p>	 <p>Versuchsaufbau nach [241, S.14]</p>

Beschreibung der Experimente	Bild
<p>Aminwäsche</p> <p><i>Versuchsteil B: Rückgewinnung des Amins aus der Waschlösung</i></p> <p>Kohlenstoffdioxid wird in eine Waschflasche mit Ethylendiamin-Lösung eingeleitet. Die Lösung wird anschließend auf 60 °C erhitzt. Die Freisetzung von Kohlenstoffdioxid wird mit einem entsprechenden Sensor überwacht und zum Nachweis in Bariumhydroxid-Lösung eingeleitet (siehe Abbildung Erhitzung Carbamat).</p> <p>Der Versuch muss auf Grund der beteiligten Stoffe im Abzug durchgeführt werden. Er wurde auf Grund des zeitlichen Rahmens und der Verfügbarkeit von anderen, unproblematischeren Lösungsmitteln (z.B. NaOH), ausgeschlossen. Ein Einsatz des Versuchs kann jedoch zukünftig erneut evaluiert werden.</p>	 <p>Erhitzung des Carbamats und Einleitung in Bariumhydroxid-Lösung [254, S.133]</p>

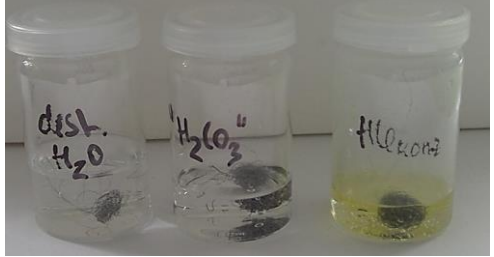

Die experimentelle Umsetzung des Bereichs *Carbon Transport*, gestaltete sich besonders herausfordernd. Die Experimente, die zur Auswahl standen (vgl. Tabelle 26) boten keinen besonderen Mehrwert zu einer Animation oder einer audiovisuellen Darstellung. Eine initiale Idee, die Korrosionsprozesse an einer Pipeline experimentell zu modellieren, wurde auf Grund des verfügbaren Zeitrahmens verworfen. Im finalen Material wird der Bereich Transport durch ein Gedankenexperiment zu einer Pipelineexplosion mit Video thematisiert.

Tabelle 26. Experimente zum Themenbereich Carbon Transport

Beschreibung der Experimente	Bild
<p>Gas-Transport unter Druck</p> <p>Eine Fahrradpumpe wird über einen verlängerten Schlauch mit einem Ballon verbunden. Durch die Betätigung der Pumpe wird der Ballon stetig mit Luft gefüllt.</p> <p>Diese Versuche wurde auf Grund der fachlichen Fehlpassung und der Altersangemessenheit ausgeschlossen.</p>	 <p>Versuchsdurchführung [239, S.41]</p>
<p>Papier Pipeline Modell</p> <p>Mit Hilfe von Papier werden Rohre der Pipeline geformt, die von den Lernenden verknüpft werden. Anschließend wird eine Murmel durch die Pipeline-Anlage geführt [240, S.47-48]. Als Alternative könnte Kinderspielzeug mit verknüpfbaren Plastikrohren verwendet werden (siehe Bild).</p> <p>Diese Form der Repräsentation wurde auf Grund der fachlichen Fehlpassung und der Altersangemessenheit ausgeschlossen. Außerdem erfüllt der Versuch nur bedingt die Kriterien eines Modells, weil nur geringe Bezüge zur Originalanwendung bestehen.</p>	 <p>Steckrohre der Firma Betzold¹⁷⁰</p>

¹⁷⁰ Bild Kinderspielzeug Plastikrohre:

https://www.betzold.de/prod/E_41310/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=PMax_google_shopping_betzold_DE_feedonly_Unterteilung&utm_term=&utm_content=&utm_id=21770664646&gad_source=1&gclid=EAlaIqobChMlo87vuDCiQMVL6-DBx3_Vx_2EAQYAYABEgKKmvD_BwE (letzter Zugriff 04.11.24).


Beschreibung der Experimente	Bild
<p>Korrosionsprozesse an Pipelines</p> <p>Drei Schnappdeckelgläser werden mit Eisenwolle versetzt. Ein Glas wird mit konzentrierter Salzsäure, eins mit Mineralwasser und eins mit destilliertem Wasser versehen. Nach drei Tagen lassen sich in allen Gläsern unterschiedlich starke Korrosionsprozesse beobachten.</p> <p>Der Versuch könnte als Modellexperiment für Korrosionsprozesse an einer Pipeline fungieren. Das Experiment wurde auf Grund des zeitlichen Rahmens als Option ausgeschlossen. Außerdem stellte sich im Rahmen der Recherche heraus, dass an Pipelines selten Korrosionsprozesse auftreten, da sie mit umfangreichem Korrosionsschutz versehen werden (vgl. 2.3.1).</p>	 <p>Versuchsaufbau [eigenes Foto]</p>
<p>Gedankenexperiment Pipelineunfall</p> <p>Die grundlegenden Überlegungen zur Konzeption eines Gedankenexperiments zu einer Pipelineexplosion, erfolgten bereits in einer Masterthesis [227, S.20-22, 41]. Im Rahmen der Arbeit wurde ein digitales Arbeitsmaterial konzipiert. Dieses wurde unter der unten genannten Leitfrage weiterentwickelt. Dies mündete in der Konzeption eines Gedankenexperiments mit passendem Arbeitsmaterial.</p> <p><i>Leitfrage:</i> Was passiert, wenn während des Onshore-Transports von Kohlenstoffdioxid in der Pipeline eine Leckage auftritt?</p> <p><i>Unterstützendes Material:</i> Infotext, Video, Phasendiagramm von Kohlenstoffdioxid mit hilfreichen Formulierungen zur Auswertung und Beschreibung, Stoffsteckbrief Kohlenstoffdioxid (siehe Anhang 7)</p>	 <p>Pipeline-Riss und Auswirkungen (von oben nach unten) nach 10, 30 und 120 Sekunden [255, S.343]</p>

Auf Grund der Verbreitung der geologischen Lagerstätten (vgl. 2.4.3) begann die Suche nach einem Versuch zur Speicherung in salinaren Aquiferen oder zur Verdeutlichung der Prozesse der Enhanced Oil Recovery (EOR). Leider entsprachen die verfügbaren Experimente nicht den Anforderungen, weshalb der Schwerpunkt auf die geologische Speicherung in Kohleflözen gelegt wurde (vgl. Tabelle 27).

Tabelle 27. Experimente zum Themenbereich Carbon Storage

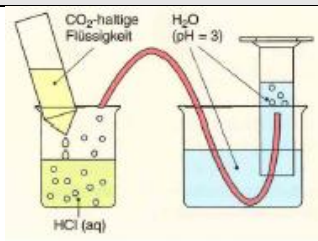
Beschreibung der Experimente	Bild
<p>Modellierung von Enhanced Oil Recovery (EOR)</p> <p><i>Version A</i></p> <p>Eine Flasche wird mit gefärbtem Wasser gefüllt. Die Öffnung wird mit Knete verschlossen. In ein weiteres Gefäß wird Backpulver gegeben und ebenfalls mit Knete verschlossen. In eine Spritze wird Essig eingefüllt und diese auf das Gefäß mit Backpulver gesetzt. Flasche und Gefäß werden über Strohhalm verbunden. In der Flasche befindet sich ein weiterer Strohhalm dessen Öffnung in ein weiteres Gefäß zeigt. Sobald die Apparatur dicht ist, wird Essig über die Spritze in das Gefäß mit Backpulver eingefüllt. Durch die Reaktion entsteht neben Natriumacetat auch Kohlensäure, welche in Wasser und Kohlenstoffdioxid zerfällt. Durch den Druck wird das angefärbte Wasser in den leeren Behälter gedrückt.</p> <p>Der Versuch wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit [256] erprobt, adaptiert und auf Grund seiner fehlenden Altersangemessenheit und Gelingwahrscheinlichkeit als Option ausgeschlossen.</p>	 <p>Versuchsaufbau [239, S.45]</p>  <p>Foto adaptierter Versuchsaufbau [256, S.17]</p>
<p><i>Version B</i></p> <p>Ein Einmachglas wird mit Steinen und 500 mL Speiseöl gefüllt. In den Deckel werden zwei Löcher gebohrt und Plastikschräuche hineingegeben. In ein weiteres Einmachglas werden 350 mL Wasser und 6 Brausetabletten gegeben. Das Glas wird mit einem durchbohrten Deckel und einem Plastikschräuch versehen und verschlossen. Die Gläser werden über Plastikschräuche miteinander verbunden. Das Öl wird durch das entstehende Gas aus dem Gefäß gedrückt und in einer Plastikflasche aufgefangen.</p> <p>Das Experiment wurde im Labor auch mit einem adaptiertem Versuchsaufbau mit Kolbenprobern (siehe Bild) getestet. Die Effekte waren nicht deutlich erkennbar und die Gelingwahrscheinlichkeit des Experiments waren nicht gegeben. Aus diesem Grund wurde der Versuch ausgeschlossen.</p>	 <p>Versuchsaufbau¹⁷¹</p>  <p>Adaptierter Versuchsaufbau [eigenes Foto]</p>

¹⁷¹ Versuchsaufbau Screenshot aus Video: <https://www.youtube.com/watch?v=84o41-AEo4&feature=youtu.be> (letzter Zugriff 04.11.24).

Beschreibung der Experimente	Bild
<p>CO₂-Sequestrierung – Ein Modellexperiment zu Gegenmaßnahmen zum Klimawandel</p> <p>100 mL Kohlenstoffdioxid werden in einen Kolbenprober gefüllt. 0,5 g Aktivkohle werden abgewogen und in ein Porzellanschiffchen gegeben. Anschließend wird die Apparatur aufgebaut (siehe Bild). Dazu werden, zwei Kolbenprober über ein Reaktionsrohr miteinander verbunden. Im Reaktionsrohr befindet sich das Porzellanschiffchen mit Aktivkohle.</p> <p>Kohlenstoffdioxid wird mit Hilfe des Kolbenprobers sanft 2–3-mal über die Aktivkohle geleitet. Danach wird der „leere“ Kolbenprober verschlossen. Mit Hilfe des Stempels des gefüllten Kolbenprobers wird für 10 Sekunden sanfter Druck auf die Apparatur ausgeübt (um ca. 5 – 10 mL). Die Volumina werden notiert.</p> <p>Der Versuch wurde zur Modellierung der Kohlenstoffdioxid-Speicherung in Kohleflözen als geeignet ausgewählt. Genauere Erläuterungen zum Experiment erfolgen in 4.4.2.5.</p>	 <p>Versuchsaufbau aus [242]</p>

Im Bereich *Carbon Utilisation* gab es eine Vielzahl von Veröffentlichungen, die sich für eine Umsetzung im Schülerlabor geeignet hätten. Schlussendlich wurde aus zeitökonomischen Gründen nur eine Kategorie, die biologische Nutzung von Kohlenstoffdioxid, ausgewählt. Dieses Teilgebiet hat im Gegensatz zu den anderen verfügbaren Themenbereichen den Vorteil, dass es auf Vorkenntnisse der Lernenden z.B. zur Photosynthese aus dem Biologieunterricht aufbaut (vgl. Tabelle 28).

Tabelle 28. Experimente zum Themenbereich Carbon Utilisation

Beschreibung der Experimente	Bild
<p>Physikalische Nutzung von Kohlenstoffdioxid in der Getränkeindustrie</p> <p><i>Phänomen:</i> Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Getränken</p> <p><i>Experimentelle Umsetzung:</i> Bestimmung des Kohlenstoffdioxidgehalts in Getränken</p> <p>20 mL eines kohlensäurehaltigen Getränks (Cola, Cola light, Mineralwasser) werden in einer Scheibler-Apparatur (siehe Versuchsaufbau) in eine 2 M Salzsäure getropft. Kohlenstoffdioxid wird freigesetzt und in einen Glaszylinder mit angesäuertem Wasser (pH = 3) geleitet. Das Gasvolumen kann anschließend im Messzylinder abgelesen und die Masse an Kohlenstoffdioxid über das ideale Gasgesetz berechnet werden.</p> <p>Das Experiment wurde als geeignet eingestuft, aber auf Grund der verfügbaren zeitlichen Ressourcen nicht ausgewählt. Ein Einsatz des Versuchs könnte jedoch zukünftig erneut evaluiert werden.</p>	 <p>Versuchsaufbau nach [257, S.34]</p>

Beschreibung der Experimente	Bild
<p>Chemische Nutzung von Kohlenstoffdioxid zur Herstellung von Methan</p> <p><i>Phänomen:</i> Methanisierung von Kohlenstoffdioxid mit Wasserstoff (Power-to-Gas) an einem Nickel-Katalysator [258, S.107-108]</p> <p><i>Experimentelle Umsetzung:</i></p> <p>Das Experiment wurde im Rahmen einer Masterthesis [227] erprobt. Für den Versuch werden 100 mL Wasserstoffgas in eine der Plastikspritzen gefüllt. Danach wird der 3-Wege-Hahn, der von der gefüllten Plastikspritze am weitesten entfernt ist, geöffnet, um 20 mL überschüssigen Wasserstoff auszuspülen und die gesamte Apparatur mit Wasserstoffgas zu füllen. Anschließend werden in die nicht mit Wasserstoffgas befüllte Plastikspritze 20 mL Kohlenstoffdioxid gefüllt. Sobald der Aufbau nach außen hin geschlossen ist, werden alle in der Apparatur befindlichen Gase in eine Plastikspritze geleitet, um ein Gasgemisch zu erzeugen. Danach wird die Katalysatoreinheit mithilfe des Bunsenbrenners auf etwa 300 °C erhitzt. Das Gasgemisch wird über den Katalysator geleitet, bis keine Volumenänderung mehr zu erkennen ist [227, S.18-19].</p> <p>Das Experiment wurde als geeignet eingestuft, aber auf Grund der verfügbaren zeitlichen Ressourcen nicht ausgewählt. Ein Einsatz des Versuchs könnte jedoch zukünftig erneut evaluiert werden.</p>	 <p>Versuchsaufbau [227, S.18]</p>
<p>Biologische Nutzung von Kohlenstoffdioxid zur Produktion von Biomasse</p> <p><i>Phänomen:</i> Nutzung von Kohlenstoffdioxid zur Algenkultivierung</p> <p><i>Experimentelle Umsetzung:</i> Experimente zur Photosynthese mit Modellschubstanz Wasserpest</p> <p><i>Option 1: Sauerstoffnachweis mit Indigocarmin und Natriumdithionit</i></p> <p>Eine Indigocarmin-Lösung wird hergestellt und ein Stängel Wasserpest hineingegeben. Anschließend wird die Lösung mit Paraffinöl überschichtet, damit kein Luftsauerstoff in die Lösung gelangt. Die Pflanzenteile werden 30-40 Minuten mit einer Pflanzlampe bestrahlt. Ist die Elodea photosynthetisch aktiv, entsteht Sauerstoff. Dieser reagiert mit dem farblosen Leukoindigocarmin zu blauem Natriumindigosulfat (siehe Foto). Der Versuch wurde auf Grund seiner Dauer, unsicheren Gelingwahrscheinlichkeit und notwendigen Herstellung der Nachweisreagenzien als Schülerexperiment ausgeschlossen. Der Nachweis könnte jedoch als Demonstrationsexperiment oder Video für das Lernangebot herangezogen werden.</p>	 <p>Reagenzglas mit Elodea und Nachweisreagenz [eigenes Foto]</p>

Option 2: „Papierbasierte Experimente“ zur Photosynthese

Eine Elodea-Pflanze wird in Teichwasser mit verschiedenen Lichtquellen (Tageslicht, Lampe, in einem Karton) beobachtet und die entstandenen „Bläschen“ gezählt. In einem zweiten Ansatz wird die Elodea-Pflanze in verschiedenen Wasserproben (Teich-, Mineral-, Leitungswasser) beobachtet und die entstandenen „Bläschen“ gezählt (siehe papierbasierter Versuchsaufbau).

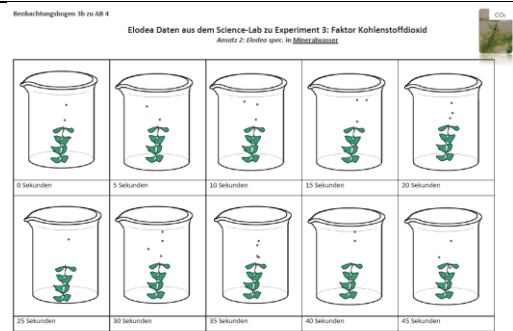
Das Experiment wurde als geeignet eingestuft, aber im Labor nicht papierbasiert, sondern als „Realexperiment“ erprobt.

Option 3: Die Photosynthese verstehen

Einige Stücke Wasserpest werden mit Leitungswasser gereinigt und in einen Erlenmeyerkolben gegeben. Dazu wird eine Wasserlösung mit dem pH-Wert von 6-7 und einige Tropfen Bromthymolblau-Indikatorlösung gegeben. Als Blindprobe wird ein weiterer Erlenmeyerkolben mit Wasser und Bromthymolblau-Lösung befüllt. Beide Kolben werden luftdicht verschlossen und 30-40 Minuten auf einen Overheadprojektor gestellt. Zusätzlich kann noch ein dritter Kolben mit Elodea und pH-Sonde verwendet werden (siehe Versuchsergebnis).

Nach Beendigung des Versuchs können die Proben für 12 Stunden abgedunkelt werden, um die Effekte rückgängig zu machen.

Beide Optionen 2 und 3 wurde als geeignet eingestuft. Genauere Erläuterungen zum Experiment erfolgen in 4.4.2.6.



Abgebildet sind alle neu entstandenen Bläschen in Sekunden.

Papierbasierter Versuchsaufbau Elodea in Mineralwasser [259, S.12]



Versuchsergebnis nach 30 Minuten
[260, S.105]

4.4.2 Adaption von geeigneten Experimenten

Die Mehrheit der ausgewählten Experimente wurde aus bestehenden fachdidaktischen Veröffentlichungen entnommen. Wenn die Versuche als geeignet befunden wurden (vgl. 4.4.1), wurden sie zunächst im Labor nach den Beschreibungen der Originalquelle durchgeführt und anschließend für das Schülerlaborsetting adaptiert. Die Erprobung und Optimierung der Versuche erfolgte dann in verschiedenen Iterationszyklen mit Schüler- und Studiengruppen sowie im Rahmen von Lehrkräftefortbildungen (vgl. 5. Erprobungen). In diesem Teilkapitel werden die ausgewählten Experimente genauer beschrieben und fachlich und didaktisch verortet. Dabei wird außerdem auf die vorgenommenen Adaptionen, als auch die nötigen Modifikationen für ein bilinguals Lernsetting eingegangen. Die deutschen und englischen Schülermaterialien sowie die Gefährdungsbeurteilungen zu den Experimenten sind im Anhang 2 zu finden.

4.4.2.1 Verbrennung von Kohle

Ziel des Versuches:

Bestimmung des Volumens an Kohlenstoffdioxid bei der Verbrennung von (Aktiv)Kohle

Originalvorschrift: [241, S.15]

Vorgenommene Adaptionen für das Schülerlabor:

Bei Erprobungen nach der Originalvorschrift stellte sich heraus, dass die bei der Reaktion gebildete Gasmenge zu groß für die Apparatur und die Gefahr für Rücksaugeffekte erhöht war. Um das Gefährdungspotential für die Lernenden zu reduzieren, wurde die verwendete Menge an Kaliumpermanganat von ursprünglich 10 g auf 1g reduziert. Daraus folgend wurden auch die verwendeten Mengen an Aktivkohle von 0,5 auf 0,05 g angepasst. Zur Verbesserung der Nachvollziehbarkeit wurde die Versuchsbeschreibung in kleinere Schritte unterteilt und im Imperativ formuliert.

Geräte: 250 mL Messzylinder, Reagenzglas (schwerschmelzbar/Duran) mit Stopfen und gebogenem Glasrohr, Bunsenbrenner, Glaswanne, Stativmaterial, Waage

Chemikalien: Aktivkohle, C (0,05 g), Glaswolle, Wasser, Kaliumpermanganat, KMnO_4 (1 g)



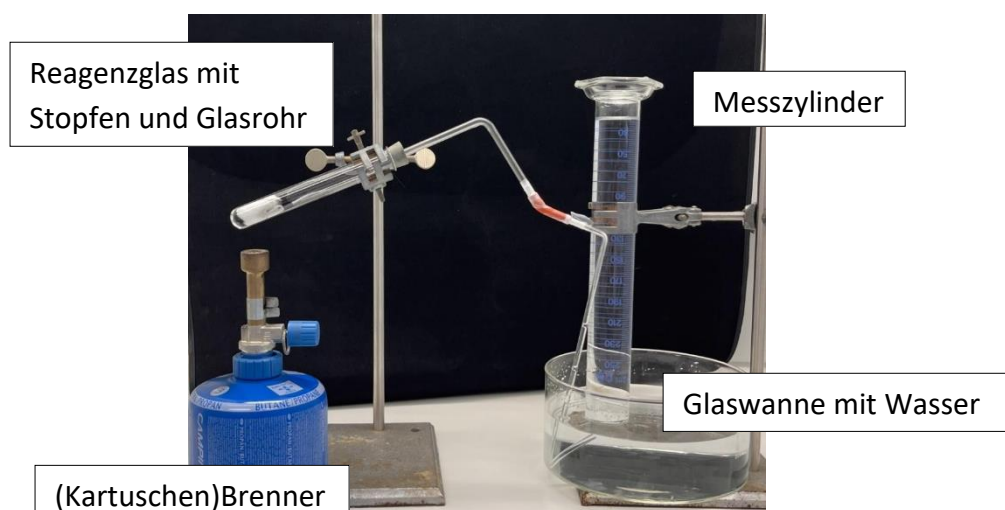
Gefahrenhinweise: Arbeit nur unter dem Abzug und mit Schutzbrille!



Tätigkeitsverbot für werdende und stillende Mütter!

Beim Erhitzen besteht Glasbruchgefahr!

Versuchsaufbau:



Durchführung:

1. Geben Sie 1 g Kaliumpermanganat in das Reagenzglas und bedecken Sie die Kristalle mit einem Glaswollstopfen. Wiegen Sie 0,05 g trockene, gepulverte Aktivkohle ab und geben Sie diese auf den Glaswollstopfen.
2. Bauen Sie die Apparatur nach der Skizze auf und lassen Sie diese abschließend von einer Lehrperson kontrollieren, bevor Sie beginnen.
3. Notieren Sie den Flüssigkeitsstand ihres Messzylinders oder machen Sie ein Foto mit Ihrem Handy.
4. Erhitzen Sie die Aktivkohle mit Hilfe des Brenners bis zum leichten Glühen. Erhitzen Sie anschließend das Reagenzglas heftig von unten.
5. Wenn keine weitere Gasentwicklung zu beobachten ist, nehmen Sie das Glasrohr aus dem Wasserbad, um Rücksaugeffekte zu verhindern.
6. Lesen Sie danach das Volumen an Gas am Messzylinder ab.
7. Entsorgung: Die festen Reaktionsprodukte werden mit Natriumthiosulfat-Lösung reduziert und anschließend in den Entsorgungsbehälter für Schwermetallabfälle geben.

Beobachtung:

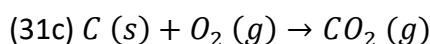
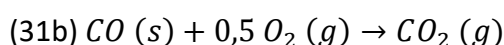
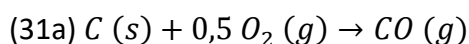
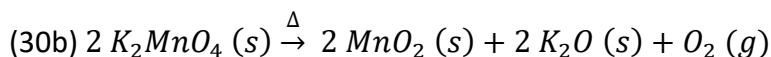
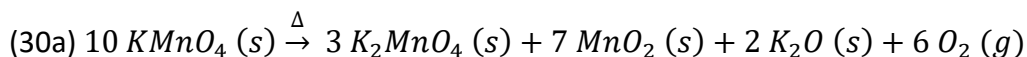
	Vor dem Versuch	Während des Versuchs	Nach dem Versuch
Gasvolumen in [mL]	0	50	100
Weitere Beobachtungen	Knistern beim Erhitzen	Nach einer Minute des Erhitzens ist im Messzylinder die Bildung farbloser Gasbläschen zu erkennen	schwarz-braune Färbung der Stoffe im Reagenzglas



Abbildung 105. Beobachtungen während des Versuchs

Fachliche Auswertung:

Beim Erhitzen auf über 240 °C zerfällt Kaliumpermanganat in einer thermischen Zersetzung in die Reaktionsprodukte Kaliummanganat (VI) (K_2MnO_4), Mangan(IV)-oxid (MnO_2), Kaliumoxid (K_2O) und Sauerstoff (vgl. Reaktion (30a)). Wird auf noch höhere Temperaturen erhitzt, zerfällt auch das entstandene Kaliummanganat (vgl. Reaktion 30b). Der bei Reaktionen (30a-b) entstehende Sauerstoff ermöglicht die anschließende Verbrennung der Aktivkohle (vgl. Reaktionen (31a-c) [32, S.1013]).



Die Entstehung der gasförmigen Reaktionsprodukte kann durch die Gasentwicklung im Messzylinder beobachtet werden. Als Vereinfachung wird angenommen, dass bei der Verbrennung nur Kohlenstoffdioxid entsteht (vgl. Reaktion 31 c). Mit dem ermittelten Gasvolumen von Kohlenstoffdioxid im Versuch, kann anschließend die Masse an Kohlenstoffdioxid bei der Verbrennung von 0,05 g Aktivkohle (Kohlenstoff) berechnet werden.

$$n(C) = \frac{m(C)}{M(C)} = \frac{0,05 \, g}{12 \frac{g}{mol}} \approx 0,0042 \, mol$$

Annahme auf Grund der ablaufenden Reaktion:

$n(C)$ entspricht $n(CO_2) = 0,0042 \, mol$.

$$m(CO_2) = M(CO_2) * n(CO_2)$$

$$m(CO_2) = M(1 * C + 2 * O_2) * 0,042 \, mol$$

$$m(CO_2) = M\left(1 * 12 \frac{g}{mol} + 2 * 16 \frac{g}{mol}\right) * 0,042 \, mol$$

$$m(CO_2) = M\left(44 \frac{g}{mol}\right) * 0,042 \, mol$$

$$m(CO_2) = 0,185 \, g$$

Nach der Berechnung entstehen im Versuch bei der Verbrennung von 0,05 g Aktivkohle, theoretisch 0,185 g Kohlenstoffdioxid. Bei der Versuchsdurchführung konnten 100 mL Kohlenstoffdioxid aufgefangen werden. Dies entspricht einer Masse von 0,196 g.

In einem Kohlekraftwerk wird Kohle zur Stromerzeugung verbrannt (vgl. 2.2.1.1). In diesen Kraftwerken werden ca. 750 g Kohlenstoffdioxid pro produzierter Kilowattstunde Strom freigesetzt [27, S.364].

Durchschnittlich sind es laut Umweltbundesamt nur 434 g Kohlenstoffdioxid pro Kilowattstunde¹⁷². Kohlekraftwerke gelten deshalb weltweit als Hauptverursacher der Emissionen aus der Energieerzeugung (vgl. 2.2).

Didaktische Einordnung:

Kohle ist ein komplexes Stoffgemisch (vgl. 2.4.1 Kohleflöze). Im Schülerexperiment wird deshalb Aktivkohle als Modellsubstanz verwendet. Würde man Braunkohle und Steinkohle verwenden, könnten bei der Verbrennung nitrose Gase freigesetzt werden, mit denen Lernende nicht arbeiten dürfen.

Die Vorgänge in einem Kohlekraftwerk (vgl. 2.2.1.1) werden im Experiment vernachlässigt und nur die Verbrennung von Kohlenstoff fokussiert. Der Zerfall des Kaliumpermanganats dient zur Herstellung des nötigen Sauerstoffs, der die anschließende Verbrennung der Aktivkohle ermöglicht. Dabei wird zur Vereinfachung eine Verbrennungsreaktion nach (31c) angenommen, bei der allein Kohlenstoffdioxid als Reaktionsprodukt entsteht. Dies erleichtert die anschließende Berechnung der Mengen an entstehendem Kohlenstoffdioxid.

Modifikationen für den bilingualen Unterricht bzw. den sprachsensiblen Chemieunterricht:

Zur sprachlichen Unterstützung werden die Lernenden aufgefordert den Versuchsaufbau mit den passenden Gerätschaften und Chemikalien zu beschriften. Als inhaltliche Hilfestellung wird eine vorstrukturierte Beobachtungstabelle, eine gestufte Hilfekarte (vgl. Abbildung 106) zur Berechnung sowie gestufte Auswertungsfragen zur Verfügung gestellt.

Aufgabe: Berechnen Sie, welche Masse an Kohlenstoffdioxid bei der Verbrennung von 0,05 g Aktivkohle (Kohlenstoff) entsteht.	
Stufe 1: Stellen Sie die Reaktionsgleichung für die Verbrennung von Kohlenstoff auf.	$\text{C (s)} + \text{O}_2 \text{ (g)} \longrightarrow \text{CO}_2 \text{ (g)}$
Stufe 2: Sie wissen, dass eine Masse [m] von 0,125 g Kohlenstoff verbrannt wird. Berechnen Sie nun die Stoffmenge [n].	Sie benötigen die Formel: $M = \frac{m}{n}$
Stufe 3: Stellen Sie die Formel nach [n] um und setzen Sie die Werte ein.	$n(\text{C}) = \frac{m(\text{C})}{M(\text{C})} = \frac{0,05 \text{ g}}{12 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,0042 \text{ mol}$
Stufe 4: Die Reaktionsgleichung (siehe Stufe 1) sagt aus, dass bei einem Einsatz von 0,01 mol Kohlenstoff auch 0,01 mol Kohlenstoffdioxid entstehen.	Annahme: n (C) entspricht n (CO ₂) = 0,0042 mol. Berechnen Sie nun die zugehörige Masse an Kohlenstoffdioxid. Dazu brauchst du wieder die Formel $m = M \cdot n$.
Stufe 5: Setzen Sie alle Werte in die Gleichung ein.	$m(\text{CO}_2) = M(\text{CO}_2) \cdot n(\text{CO}_2)$ $m(\text{CO}_2) = M(1 \cdot \text{C} + 2 \cdot \text{O}) \cdot 0,0042 \text{ mol}$ $m(\text{CO}_2) = M(1 \cdot 12 \text{ g/mol} + 2 \cdot 16 \text{ g/mol}) \cdot 0,0042 \text{ mol}$ $m(\text{CO}_2) = M 44 \text{ g/mol} \cdot 0,0042 \text{ mol}$ $m(\text{CO}_2) = 0,185 \text{ g}$
Nach der Berechnung entstehen bei der Verbrennung von 0,05 g Kohlenstoff genau 0,185 g Kohlenstoffdioxid. Vergleichen Sie den berechneten Wert mit Ihren Versuchsergebnissen.	

Abbildung 106. Gestufte Hilfekarte für den Versuch Verbrennung von Kohle

¹⁷² <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-stiegen-in> (letzter Zugriff 13.04.25).

4.4.2.2 Einfluss der Temperatur auf das Kohlensäure-Kohlenstoffdioxid-Gleichgewicht

Ziel des Versuchs:

Visualisierung des Einflusses der Temperatur auf das Kohlensäure-Kohlenstoffdioxid-Gleichgewicht

Originalvorschrift: [251, S.22-3-22-4] bzw. [252, S.247]

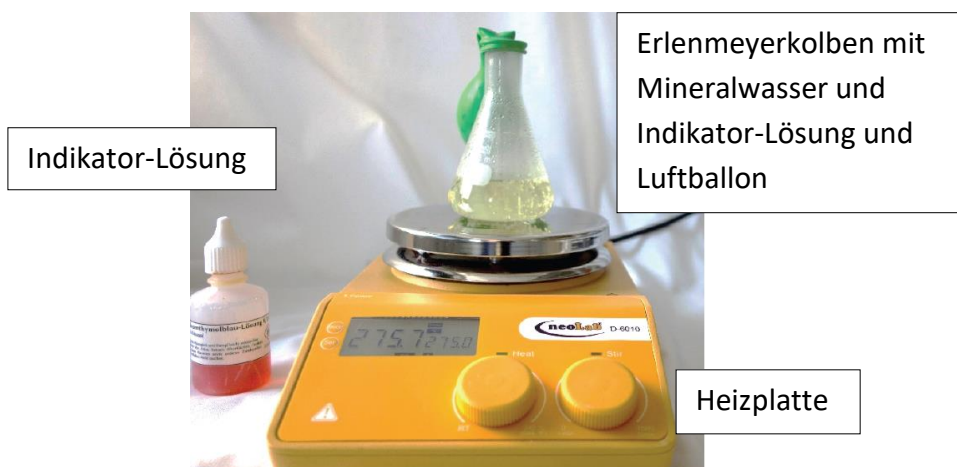
vorgenommene Adaptionen für das Schülerlabor:

Zur Erhöhung der Sicherheit des Versuches werden beim Erhitzen Siedesteine und eine Heizplatte statt eines Bunsenbrenners verwendet. Außerdem stehen den Lernenden Handschuhe zur Verfügung, um die erhitzte Probe sicher von der Heizplatte zu entfernen. Darüber hinaus wurde die Versuchsdurchführung angepasst, indem z.B. eine Vergleichsprobe ergänzt und als Indikator Bromthymolblau statt Merck 5 oder Universalindikator verwendet wurden.

Geräte: 2x 100 mL Erlenmeyerkolben, Luftballon, Siedesteine, 1000 mL Becherglas, Parafilm, Handschuhe, Magnetrührer mit Heizplatte

Chemikalien: Bromthymolblaulösung , spritziges Mineralwasser, Eis

Versuchsaufbau:



Durchführung:

1. Heizen Sie die Heizplatte auf 200 °C vor.
2. Füllen Sie die zwei Erlenmeyerkolben mit jeweils 50 mL Mineralwasser und geben Sie jeweils 5 Tropfen Bromthymolblaulösung hinzu.
3. Verschließen Sie einen Erlenmeyerkolben (EK 1) mit Parafilm und notieren Sie die Farbe der Lösung bei Raumtemperatur in der Tabelle (siehe unten).
4. Geben Sie in den zweiten Erlenmeyerkolben (EK 2) zwei Siedesteine und verschließen Sie ihn mit einem Ballon.
5. Stellen Sie EK 2 auf die Heizplatte und erwärmen Sie die darin enthaltene Lösung für ca. drei bis fünf Minuten. Beobachten Sie die Farbe der Lösung und notieren Sie Ihre Ergebnisse.

6. Lassen Sie EK 2 für drei Minuten abkühlen und bereiten Sie währenddessen mit dem 1000 mL Becherglas ein Eisbad vor. Stellen Sie EK 2 in das Eisbad. Notieren Sie die Farbe der Lösung nach fünf Minuten.

7. Vergleichen Sie die Lösungen in EK 1 und EK 2.

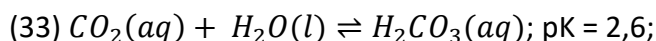
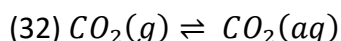
Entsorgung: Die Lösungen können im Abguss entsorgt werden. Bitte tragen Sie bei der Entsorgung der erwärmten Lösung Handschuhe.

Beobachtung:

Spritziges Mineralwasser	Farbe der Lösung	Weitere Beobachtungen (z.B. Der Ballon...)
EK 1: bei Raumtemperatur	gelb	
EK 2: nach 5 Minuten Erhitzen	grün-blau	...dehnt sich aus.
EK 2: nach 5 Minuten Eisbad	gelb	...fällt in sich zusammen.

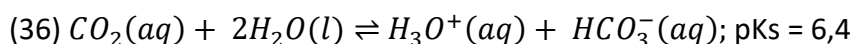
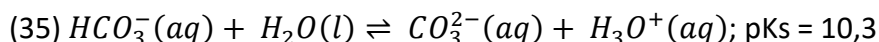
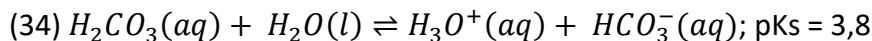
Fachliche Auswertung

„Spritziges“ Mineralwasser wird unter Drücken von 2000 bis 3000 hPa abgefüllt und mit reinem Kohlenstoffdioxid versetzt. Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen gelöstem und gasförmigen Kohlenstoffdioxid ein (vgl. (32)). Das gelöste Gas reagiert mit dem Wasser zu Kohlensäure (siehe (33)).



Hinreaktion exotherm, Rückreaktion endotherm (bevorzugt)

Da die Kohlensäure im Mineralwasser unbeständig ist, zerfällt sie in weiteren Teilreaktionen. Die Gleichgewichtsreaktionen (34-36) liegen nebeneinander vor. Ein Teil der Kohlensäure-Moleküle reagiert weiter zu Oxonium-Ionen (H_3O^+) und Hydrogencarbonat-Ionen (HCO_3^-) und weiter zu Carbonat-Ionen (CO_3^{2-}). Dies ist in Gleichung (34) und (35) dargestellt. Die Reaktion (36) bildet eine Zusammenfassung der Gleichgewichtsreaktionen (33 und 34) ab [33, S.285-286]:



Weniger als 1% des gelösten Kohlenstoffdioxids liegt als Kohlensäure vor. Mit 99,8% besteht der Großteil aus hydratisiertem Kohlenstoffdioxid [32, S.1046-1047]. Dies ist auch ein Grund, warum die Gesamtlösung nur als schwache Säure wirkt.

Die Gleichgewichtsreaktionen im Kohlensäure- Kohlenstoffdioxid- Gleichgewicht sind temperaturabhängig. Beim starken Erhitzen der Lösung verschiebt sich die Gleichgewichtsreaktion (33) auf die Eduktseite, so dass gelöstes Kohlenstoffdioxid entsteht. Dieses entweicht auf Grund der geringeren Löslichkeit des Gases bei hohen Temperaturen (vgl. Tabelle 29). Der Effekt kann im Versuch durch den ausgedehnten Ballon visualisiert werden, in dem das entstehende Gas aufgefangen wird.

Tabelle 29. Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser bei verschiedenen Temperaturen¹⁷³

Temperatur in [°C], Druck: 1,013 bar	Löslichkeit [pro L Wasser]
20°C	0,9 L
15°C	1 L
0 °C	1,7 L

Alle anderen beteiligten Gleichgewichtsreaktionen werden ebenfalls auf die Eduktseite verschoben. Die Farbe der Lösung verändert sich von gelb nach grün-blau (vgl. Abbildung 107).

Damit kann eine zunehmende Alkalinität der Lösung festgestellt werden. Kühlt man die Lösung im Eisbad ab, kann der beobachtete Effekt rückgängig gemacht werden. Der Ballon zieht sich zusammen und die Lösung zeigt eine gelbe Farbe.

Diese Färbung deutet auf eine vermehrte Acidität hin, die durch die Verschiebung der Gleichgewichte auf Produktseite und die damit einhergehende Entstehung von Kohlensäure erklärbar ist.

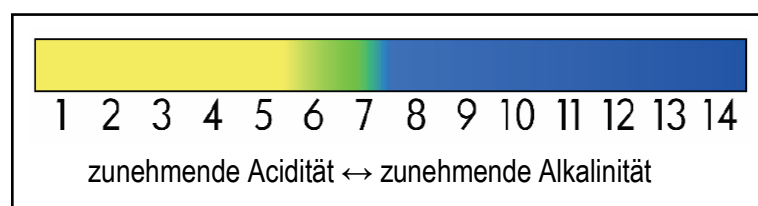


Abbildung 107. Farbige Skala des Indikators Bromthymolblau bei verschiedenen pH-Werten¹⁷⁴

Didaktische Einordnung:

Im Versuch wird ein geschlossenes System durch den Einsatz des Ballons modelliert. Vereinfacht wird alleinig eine qualitative Betrachtung des Gleichgewichts und des Einflusses von niedrigerer und höherer Temperatur vorgenommen. Exemplarisch für die ablaufenden Reaktionen werden Reaktionsgleichungen (35 und 36) für die Auswertung der Versuchsbeobachtungen herangezogen.

¹⁷³ Tabelle Löslichkeit Kohlenstoffdioxid bei verschiedenen Temperaturen: [32, S.1033].

¹⁷⁴ Abbildung Bromthymolblau: eigene Darstellung.

Modifikationen für den bilingualen Unterricht:

Um den sprachlichen Lernprozess zu unterstützen, werden für das bilinguale Lernangebot Annotationen und ein zu beschriftender Versuchsaufbau ergänzt. Neben einer einfach verfolgbaren, kleinschrittigen Versuchsanleitung können die Schülerinnen und Schüler mit Hilfe der vorstrukturierten Beobachtungstabelle ihre Beobachtungen zielorientiert festhalten. Zur inhaltlichen Auswertung des Versuchs sind die Lernenden aufgefordert, kurze Auswertungsfragen zu beantworten (vgl. Abbildung 108). Als Hilfestellungen stehen Infokarten zur Verfügung, die bei Bedarf genutzt werden können. Die Lernenden können ihr Lernergebnis selbstständig mit Hilfe des Lernbegleiters kontrollieren.


Optional 4: Experiment Carbon Dioxide Equilibrium		Optional 4: Experiment Carbon Dioxide Equilibrium	
SETUP Label the photo with the correct terms: 		CONCLUSION Choose the right answer from the questions below: 1. Which gas is dissolved in sparkling water and causes the balloon to inflate? <input type="checkbox"/> oxygen <input type="checkbox"/> hydrogen <input type="checkbox"/> carbon dioxide 2. As temperature increases (↑) <input type="checkbox"/> the pH in the solution increases (increasing alkalinity) <input type="checkbox"/> the pH in the solution decreases (increasing acidity) 3. As temperature decreases (↓) <input type="checkbox"/> the pH in the solution increases (increasing alkalinity) <input type="checkbox"/> the pH in the solution decreases (increasing acidity) <small>alkalinity: Alkalität (basisch) acidity: Acidität (sauer)</small>	

Abbildung 108. (links) zu beschriftender Versuchsaufbau, (rechts) Auswertungsfragen mit Selbstkorrektur

4.4.2.3 Absorption von Kohlenstoffdioxid in Natronlauge

Ziel des Versuchs: Absorption von Kohlenstoffdioxid in einem basischen Lösungsmittel visualisieren

Originalvorschrift: [244, S.636]

Vorgenommene Adaptionen für das Schülerlabor:

Für die Lernumgebung Schülerlabor wurde die Schilderung der Versuchsdurchführung aus der Originalquelle angepasst. Um den Versuch als Schülerexperiment zu realisieren, wurde auf den Einsatz einer Gasflasche verzichtet und auf die Nutzung von mit Gas gefüllten Infusionsbeuteln zurückgegriffen. Das Experiment wurde zusätzlich um die Visualisierung des Desorptionsphänomens erweitert.

Geräte:

zwei Plastikflaschen, Becherglas, Pipette, 10 mL Messzylinder

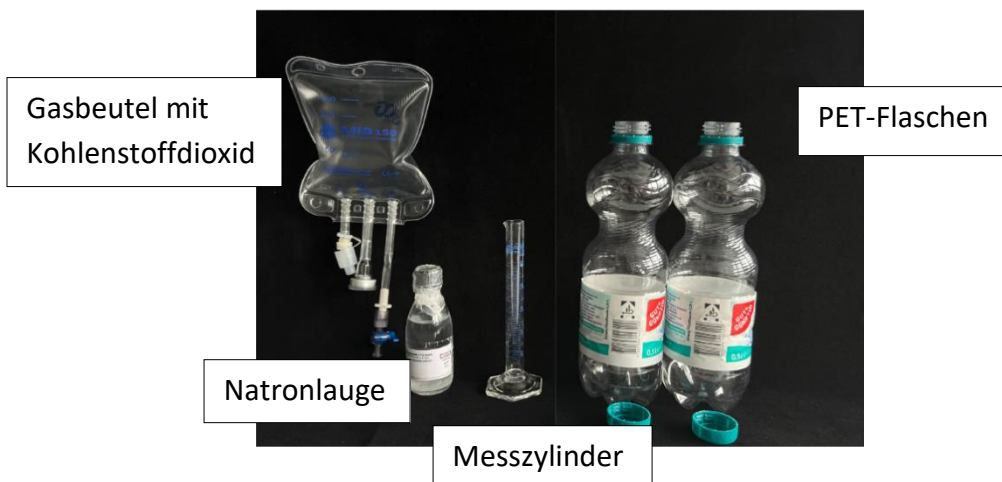
Chemikalien:

Kohlenstoffdioxidgas im Gasbeutel, CO₂(g)

Natriumhydroxid-Lösung, NaOH(aq), c = 2 mol/L



Versuchsaufbau:



Versuchsdurchführung:

1. Nutzen Sie die Pipette und füllen Sie jeweils 10 mL Natriumhydroxid-Lösung in die beiden Plastikflaschen. Verschließen Sie eine der Plastikflaschen.
2. Verwenden Sie den Gasbeutel und füllen Sie die zweite Plastikflasche vorsichtig mit Kohlenstoffdioxidgas. Schließen Sie anschließend zügig den Deckel.
3. Stellen Sie sicher, dass beide Flaschen verschlossen sind. Schütteln Sie beide Flaschen für 30 Sekunden.

Entsorgung: Entsorgen Sie die Natriumhydroxid-Lösung in einem bereitgestellten Entsorgungsgefäß.

Sprinter: Im industriellen Post-Combustion Prozess wird das Absorptionsmittel durch Desorption zurückgewonnen. Überlegen Sie, wie man experimentell vorgehen müsste, um den Prozess der Desorption auch in diesem Modellexperiment zu zeigen.

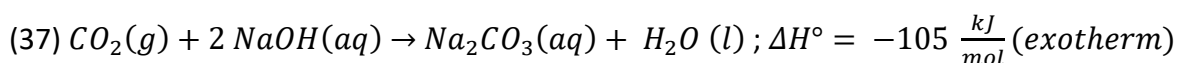
Beobachtung:

Zu Beginn	Während	Nach dem Experiment
<ul style="list-style-type: none">• beide Flaschen sind mit einer klaren, farblosen Lösung gefüllt	<ul style="list-style-type: none">• die Flasche mit dem Kohlenstoffdioxid zieht sich zusammen und wird warm• die Flasche mit der Umgebungsluft bleibt unverändert	<ul style="list-style-type: none">• die Flasche mit Kohlenstoffdioxid hat sich vollständig zusammengezogen• die Flasche mit der Umgebungsluft bleibt unverändert



Fachliche Auswertung:

Im Experiment wird eine Absorption von Kohlenstoffdioxid durch das alkalische Lösemittel Natronlauge verdeutlicht. Dazu werden beide Flaschen mit etwas Natronlauge befüllt. Anschließend wird eine Flasche mit Kohlenstoffdioxidgas und eine mit Luft gefüllt. Folglich unterscheiden sich die Kohlenstoffdioxidkonzentration und das Absorptionspotential in den beiden Flaschen. Die Flasche, die mit Luft gefüllt ist, enthält nur den für Luft typischen Anteil an Kohlenstoffdioxid, während die andere Flasche komplett mit Kohlenstoffdioxid aufgefüllt wurde. Alkalische Lösemittel wie Natronlauge, absorbieren Kohlenstoffdioxid, Luft jedoch nicht. Dies lässt sich in der Beobachtung durch den unterschiedlichen Zustand der PET-Flaschen beobachten. Die mit Luft und Natronlauge gefüllte Flasche bleibt unverändert, während sich die mit Kohlenstoffdioxid gefüllte Flasche zusammenzieht. Es findet eine chemische Gasabsorption statt. Das Kohlenstoffdioxid wird zum größten Teil entfernt und an das flüssige Absorptionsmittel gebunden. Natronlauge reagiert bei Kontakt mit Kohlenstoffdioxid zu Natriumcarbonat-Lösung und Wasser (vgl. (37)).



Auf der Teilchenebene werden die Kohlenstoffdioxid-Moleküle von Absorptionsmittel-Teilchen aufgenommen. Es sind nun weniger Moleküle in der Gasphase der Flasche. Der Druck, den die Moleküle auf die Flaschenwand ausüben, ist nun geringer als der Druck der Moleküle von der Außenseite der Flasche. Im Experiment lässt sich beobachten, dass sich die Flasche mit Kohlenstoffdioxid zusammenzieht. Der Prozess läuft als eine exotherme Reaktion ab und dabei wird Energie in Form von Wärme frei.

Durch die Zufuhr von Wärme kann die Reaktion über eine Desorption rückgängig gemacht werden. Diese Reaktion verläuft endotherm bei hohen Temperaturen. Im Experiment kann dies durch das Eintauchen der verschlossenen PET-Flasche in warmes Wasser realisiert werden.

Didaktische Einordnung:

Der Prozess der Absorption mit aminhaltigen Lösungsmitteln ist Teil des *Post-Combustion Capture* Verfahrens (vgl. 2.2.1.3). In diesem Experiment wird Natriumhydroxid-Lösung als Absorptionsmittel verwendet. Mit Hilfe des Absorptionsmittels kann reines Kohlenstoffdioxid aus Gasgemischen entfernt werden. Großtechnisch werden hauptsächlich Amine eingesetzt (vgl. 2.2.2.1).

Das Experiment kann den Absorptionsvorgang von Kohlenstoffdioxid in chemischen Lösemitteln veranschaulichen und phänomenologisch als Modellversuch für *Post-Combustion Capture* fungieren. Für den Einsatz als Schüler- bzw. Schulexperiment wurde Natronlauge als Lösungsmittel ausgewählt. Die Substanz Natronlauge ist den Lernenden bekannt, kann bei Standardbedingungen eingesetzt werden und spielt auch im Versuch zu *Direct Air Capture* eine Rolle (vgl. 4.4.2.4). Beide Versuche werden im Schülerlaborangebot in einer Station bearbeitet (vgl. 4.4.3). Andere mögliche Lösemittel wie Kaliumcarbonat oder Ammoniak (vgl. 2.2.2.1) wurden didaktisch auf Grund der nötigen Reaktionsbedingungen vernachlässigt.

Modifikationen für den bilingualen Unterricht:

Als sprachliches Scaffolding erhalten die Lernenden ein Übersichtsposter mit Abbildungen sowie deutschen und englischen Gerätebezeichnungen. Annotationen und die aktive Beschriftung der Geräte und Chemikalien tragen zum Verständnis und dem Erwerb von englischen Fachbegriffen bei. Inhaltlich werden die Lernenden durch eine vorstrukturierte Beobachtungstabelle mit Impulsen und einer Word Bank unterstützt. Die Auswertung des Versuches wird mit Auswertungsfragen angeleitet und durch gestufte Hilfekarten angereichert (vgl. Abbildung 109). Ein Infotext mit verschiedenen Visualisierungen ermöglicht den Zugang zu Hintergrundwissen zum industriellen Verfahren *Post-Combustion Capture*. Unbekannte Begriffe oder Konzepte können im Glossar des Lernbegleiters nachgelesen werden und sind verlinkt.

Station 1: Carbon Capture

HELP CARD 1

HELP 1

How do the contents of both bottles differ from each other?

HELP 2

Why does the bottle containing only carbon dioxide contract, while the one containing air does not? Explain the role of the sodium hydroxide solution as an [absorbent](#) (Absorptionsmittel).

HELP 3

An exemplary definition for a gas absorption:
Gas absorption can be used for the removal of one or more selected components of a mixture of gases. It is taken up by liquid or solid materials.

WORD BANK

- (to) differ: unterscheiden
- The bottle containing only...
- The bottle contracts because/does not contract because...
- Absorption is defined as a process where...

Station 1: Carbon Capture - Post-Combustion Capture

Infotext

Post-Combustion Capture is one option to remove carbon dioxide emissions from coal or power plants. In the *combustion process* flue gas is generated, which contains 5-15% CO₂. The mixture is taken through an absorption and desorption process, using chemicals like sodium hydroxide solution, to extract carbon dioxide.

```
graph LR; A[fossil fuel and air  
• combustion (power and heat)] --> B[flue gas  
• contains 5-15% CO2]; B --> C[absorption  
• with liquid solvent  
• low temperatures (30-50°C)]; C --> D[desorption  
• with liquid solvent  
• high temperatures (70-120°C)]; D --> E[pure separated carbon dioxide  
CO2];
```

You can imagine it as a train collecting the passenger carbon dioxide and dropping it off at the end of the journey.

Absorption occurs at low temperatures and is an exothermic process (see blue box on the following page). The carbon dioxide gas binds to the absorbents, just like a passenger getting on a train.

The mixture is then heated, where the desorption process occurs (see red box on the following page). In this endothermic reaction carbon dioxide can be separated from the absorbent and a pure carbon dioxide gas is released, like a passenger getting off a train.

combustion process:
Verbrennungsprozess

flue gas:
Rauchgas, das bei der Verbrennung in Kraftwerken entsteht

Abbildung 109. (links) gestufte Hilfekarte mit Word Bank, (rechts) Infotext mit Visualisierung

4.4.2.4 Absorption von Kohlenstoffdioxid in verschiedenen alkalischen Lösemitteln


Ziel des Versuchs: Absorptionsrate von Kohlenstoffdioxid in zwei alkalischen Lösemitteln

Originalvorschrift: [241, S.14]

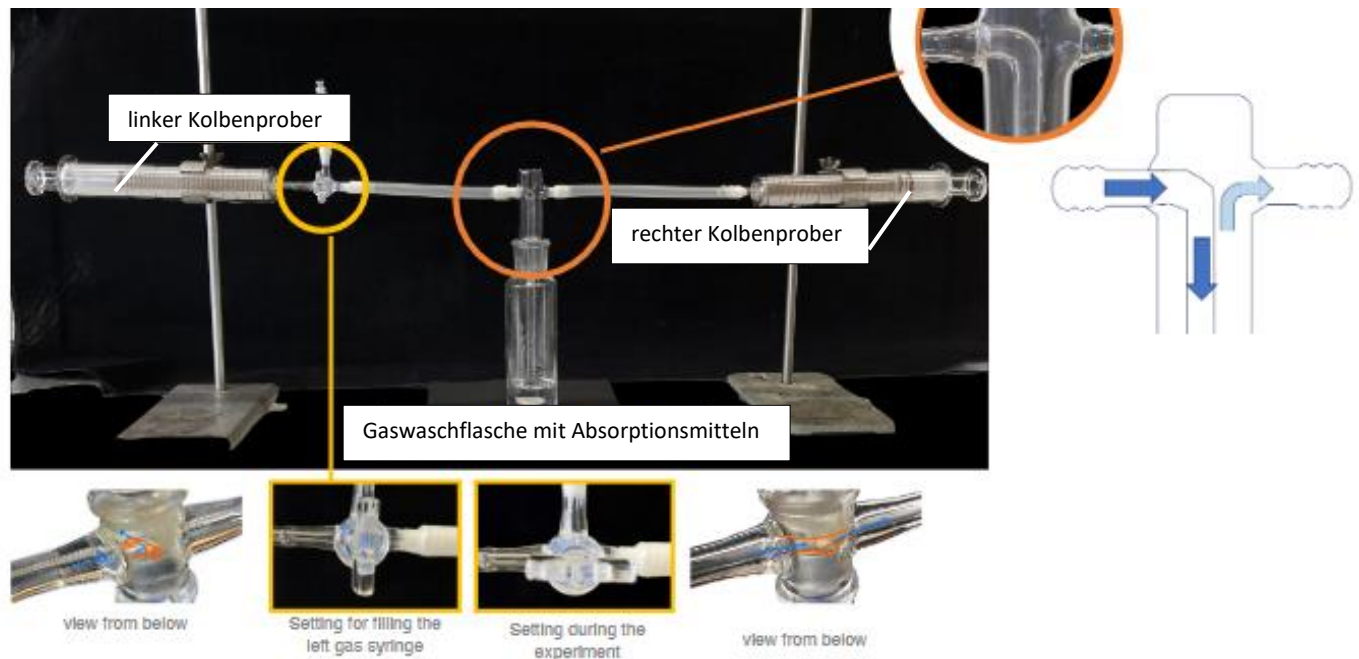
Vorgenommene Adaptionen für das Schülerlabor:

Die Versuchsdurchführung wurde vereinfacht und der Einsatz der Lösungsmittel von vier auf zwei reduziert. Durch die Nutzung von Infusionsbeuteln, kann auf die Verwendung einer Gasflasche verzichtet werden. Der Versuch wurde mit Kolbenprobern und Spritzentechnik erprobt. Außerdem wurde das Experiment um die Untersuchung von Umgebungsluft erweitert.

Geräte: Stativmaterial, 2 Kolbenprober, Schlauchstücke, Parafilm, Gaswaschflasche, Pipette, 100 mL Messzylinder

Chemikalien: Natriumhydroxid-Lösung 5% , Natriumcarbonat-Lösung 5%, Kohlenstoffdioxid CO₂ (im Infusionsbeutel)

Versuchsaufbau:



Durchführung:

Messreihe A: verschiedene Absorptionsmittel mit reinem Kohlenstoffdioxidgas

1. Füllen Sie die Gaswaschflasche mit 50 mL der Natriumhydroxid- Lösung.
2. Bauen Sie die Apparatur auf, indem Sie die zwei Kolbenprober mit Stativmaterial befestigen (siehe Skizze). Achten Sie darauf, dass die Skalierung der Kolben so platziert ist, dass Sie später Messwerte ablesen können. Verbinden Sie nun die Kolbenprober über die Schlauchstücke mit der Gaswaschflasche. Dichten Sie die Übergangsstellen abschließend mit Parafilm ab.
3. Füllen Sie den linken Kolbenprober mit 100 mL Kohlenstoffdioxid aus dem Infusionsbeutel.
4. Leiten Sie das Gas mit Hilfe des linken Kolbenprobers *langsam* durch das Absorptionsmittel in der Gaswaschflasche.
5. Lesen Sie am rechten Kolbenprober das Gasvolumen ab.
6. Entleeren Sie den rechten Kolbenprober und spülen Sie die Gaswaschflasche.
7. Wiederholen Sie den Versuch mit 50 mL Natriumcarbonat-Lösung.

Messreihe B: verschiedene Absorptionsmittel mit Umgebungsluft

Ziehen Sie den linken Kolbenprober mit 100 mL Umgebungsluft auf und leiten Sie diese durch das jeweilige Lösungsmittel, indem Sie wie in Messreihe A vorgehen.

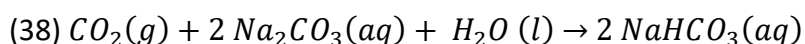
Entsorgung: Entsorgen Sie die Lösungen in dem bereitgestellten Abfallgefäß.

Beobachtung: Die angegebenen Messwerte sind Richtwerte und entsprechen den Mittelwerten aus Erprobungen.

	Absorptionsmittel: Natriumhydroxid-Lösung	Absorptionsmittel: Natriumcarbonat-Lösung
Messreihen	Volumen im Kolbenprober in [mL]	Volumen im Kolbenprober in [mL]
A reines CO ₂	22	73
B Umgebungsluft	88	90

Fachliche Auswertung:

Im Versuch finden chemische Absorptionsreaktionen statt. Natriumhydroxid-Lösung reagiert wie bereits in 4.4.2.3 beschrieben. Das Absorptionsmittel Natriumcarbonat reagiert mit Kohlenstoffdioxid und Wasser zu Natriumhydrogencarbonat (vgl. Reaktion (38)).



Liegt reines Kohlenstoffdioxid vor, werden Absorptionsraten von 65% bei Natriumhydroxid-Lösung und 12% bei Natriumcarbonat-Lösung erreicht. Folglich kann Natriumhydroxid-Lösung in Gasströmen mit hohen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen bei Standardbedingungen höhere Absorptionsraten als Natriumcarbonat-Lösung erreichen. In der Umgebungsluft sind nur ~0,04% Kohlenstoffdioxid enthalten, folglich kann auch weniger Kohlenstoffdioxid (~10%) absorbiert werden. In Gasumgebungen mit niedrigen Kohlenstoffdioxid-Konzentration erreichen beide Absorptionsmittel ähnliche Absorptionsraten.

Aus den Ergebnissen lässt sich vorsichtig ableiten, dass Abscheideraten bei Absorptionsprozessen aus der Luft wie dem *Direct Air Capture* Verfahren unter Standardbedingungen sehr gering sind. Im direkten Vergleich der beiden Lösungsmittel eignet sich Natriumhydroxid-Lösung besser als Absorptionsmittel von Kohlenstoffdioxid.

Didaktische Einordnung:

Im Versuch werden die Absorptionsvorgänge vereinfacht mit zwei alkalischen Lösungen als Absorptionsmittel modelliert. Nach dem Prinzip der Vernachlässigung wird nur Bezug auf den ersten Schritt des *liquid-DAC*-Verfahrens (vgl. 2.2.1.5) genommen und die Regeneration des Lösungsmittels und Desorption als energieintensivster Schritt ausgelassen. Als Lösungsmittel wurden Natriumhydroxid und Natriumcarbonat auf Grund der Bekanntheit der Verbindungen und des verfügbaren Zeitrahmens ausgewählt. Industriell werden auch Calciumhydroxid- und Kaliumhydroxid-Lösungen verwendet. Beide Lösemittel könnten auch im Rahmen der Versuchsdurchführung eingesetzt werden.

4.4.2.5 Adsorption von Kohlenstoffdioxid an Aktivkohle

Ziel des Versuchs: Modellexperiment zur geologischen, adsorptiven Speicherung von Kohlenstoffdioxid

Originalvorschrift: [242]

Vorgenommene Adaptionen für das Schülerlabor:

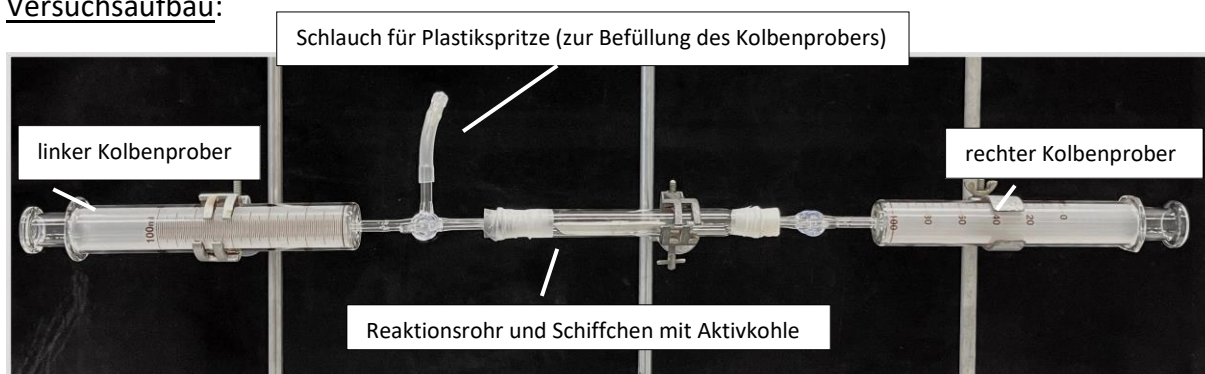
Zur Implementierung im Schülerlabor wurde die Versuchsdurchführung angepasst und die Nutzung von Infusionsbeuteln anstatt einer Gasflasche eingeführt. Darüber hinaus wurden der Versuchsteil B (Desorption) und Versuchsteil C (Nachweis von Kohlenstoffdioxid) ergänzt. Neben dem Aufbau mit Kolbenprobern wurde auch ein verkleinerter Aufbau mit Sprizentechnik erprobt. Dieser eignete sich auf Grund der anspruchsvollen Handhabbarkeit nur für den Einsatz als Demonstrationsversuch.

Versuchsteil A: Adsorption von Kohlenstoffdioxid

Geräte: Stativmaterial, 2 Kolbenprober, Reaktionsrohr, Porzellanschiffchen, 2 durchbohrte Stopfen, Parafilm, Waage, Spatel, 100 mL Plastikspritze mit Aufsatz

Chemikalien: Aktivkohle (gepulvert), Kohlenstoffdioxid CO₂ (im Infusionsbeutel)

Versuchsaufbau:



Durchführung:

1. Wiegen Sie 0,5 g Aktivkohle ab und verteilen Sie sie möglichst großflächig in einem Porzellanschiffchen.
2. Bauen Sie die Apparatur auf, indem Sie die zwei Kolbenprober mit Stativmaterial befestigen (siehe Versuchsaufbau). Achten Sie darauf, dass die Skalierung der Kolben so platziert ist, dass Sie später Messwerte ablesen können. Schieben Sie das Porzellanschiffchen in das Reaktionsrohr. Verbinden Sie nun die Kolbenprober über die Stopfen mit dem Reaktionsrohr. Dichten Sie die Übergangsstellen abschließend mit Parafilm ab.
3. Füllen Sie die Plastikspritze mit Hilfe des Infusionsbeutels mit 100 mL Kohlenstoffdioxid auf. Schließen Sie das Ventil der Spritze (siehe Abbildung 111). Nehmen Sie die nun gefüllte Spritze und verbinden Sie sie mit der Apparatur. Füllen Sie den linken Kolbenprober mit 100 mL Kohlenstoffdioxid, indem Sie die Plastikspritze vollständig entleeren. Notieren Sie die Volumina beider Kolbenprober.



Abbildung 111. Nutzung Zwei-Wege-Hähne

4. Leiten Sie aus dem befüllten Kolbenprober zunächst 20 mL Kohlenstoffdioxid langsam über die Aktivkohle, ohne diese zu verwirbeln. Warten Sie 30 Sekunden, bevor Sie erneut 20 mL Kohlenstoffdioxid über die Aktivkohle strömen lassen. Wiederholen Sie diesen Vorgang, bis der Kolbenprober leer ist. Notieren Sie die Volumina der Kolbenprober.
5. Verschließen Sie den nun leeren Kolbenprober. Üben Sie anschließend sanften Druck (um ca. 5 – 10 mL) auf den Stempel des gefüllten Kolbenprobers aus. Halten Sie den Druck für ca. 10 Sekunden konstant. Notieren Sie die Gasvolumina der Kolbenprober.

Beobachtung:

Die Messwerte sind Mittelwerte aus verschiedenen Erprobungen und können abweichen.

Kolben-prober	Volumen zu Beginn des Versuchs in [mL] (Schritt 2)	Volumen nach Überleitung in [mL] (Schritt 3)	Volumen nach Druckausübung in [mL] (Schritt 4)
links	100	0	0
rechts	0	80	78

Fachliche Auswertung:

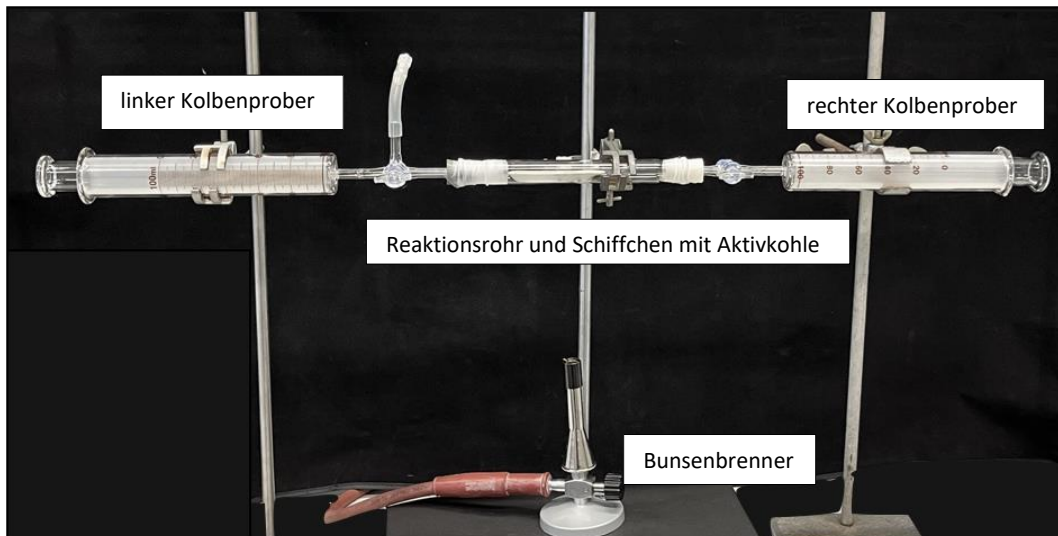
Aktivkohle ist eine feinkristalline Graphitform und verfügt über eine große Oberfläche (ca. 1000 m²/g) [33, S.280] und ein großes Porenvolumen mit hoher Adsorptionskapazität. Durch physikalische Adsorption (vgl. 2.2.2.2) können Kohlenstoffdioxid-Moleküle temporär an der Oberfläche der Aktivkohle haften. Durch den Einsatz von erhöhten Drücken kann die Adsorptionsfähigkeit noch gesteigert werden. Dies erklärt auch die Volumenveränderungen nach dem Überleiten über die Aktivkohle (Schritt 2 zu Schritt 3) und nach der Druckausübung (Schritt 4). Schon nach der einfachen Überleitung in Schritt 3 kann eine Abnahme der Gasvolumina von 100 auf 80 mL beobachtet werden. Die Druckerhöhung in Schritt 4 führt zu einer weiteren Reduzierung des Volumens auf 78 mL. Die Druckausübung simuliert in diesem Modellexperiment die Hochdruckverpressung von meist überkritischem Kohlenstoffdioxid in unterirdischen Kohleflözen. Durch den erhöhten Druck kann Kohlenstoffdioxid tiefer in die porösen Strukturen der Aktivkohle (Porenraum, Risse und Klüfte) eindringen und dort adsorbiert werden.

Versuchsteil B: Desorption von Kohlenstoffdioxid

Geräte: Stativmaterial, 2 Kolbenprober, Reaktionsrohr, Porzellanschiffchen, 2 durchbohrte Stopfen, Parafilm, Waage, Spatel, 100 mL Plastikspritze mit Aufsatz, Bunsenbrenner, Feuerzeug

Chemikalien: Aktivkohle (gepulvert)

Versuchsaufbau:



Durchführung:

1. Verschließen Sie das Ventil des rechten Kolbenprobers. Öffnen Sie das Ventil des linken Kolbenprobers.
2. Stellen Sie den Bunsenbrenner unter das Reaktionsrohr. Platzieren Sie den Brenner so, dass er direkt unter dem Porzellanschiffchen steht.
3. Erhitzen Sie das Schiffchen mit Hilfe eines Bunsenbrenners für 2-3 Minuten. Notieren Sie die Gasvolumina der Kolbenprober.
4. Lassen Sie die Apparatur 15 Minuten abkühlen.
5. Lesen Sie die Messwerte an den Kolbenprobern ab.

Beobachtung:

Die Messwerte sind Mittelwerte aus verschiedenen Erprobungen und können abweichen.

Kolben-prober	Volumen nach der Druckausübung in [mL] (siehe Modellversuch)	Volumen nach dem Erhitzen in [mL]	Volumen nach dem Abkühlungsprozess in [mL]
links	0	22	22
rechts	78	78	78

Fachliche Auswertung:

Durch Erwärmung erfolgt eine Desorption der Gasmoleküle von der Oberfläche der Aktivkohle. Dies ist auch ein Phänomen, welches bei Forschungsvorhaben zur Speicherung in Kohleflözen untersucht wird (vgl. 2.4.1). Die Adsorptionskapazität wird durch die Erwärmung vermindert. Ab Temperaturen von 300°C ist das adsorbierte Gas fast vollständig desorbiert [261]. Dies lässt sich auch an den entstehenden Volumina der Kolbenprober beobachten. Nach dem Abkühlen liegen in der Apparatur insgesamt wieder 100 mL Kohlenstoffdioxid vor, die zu Beginn von Versuchsteil A hineingegeben wurden.

Didaktische Einordnung:

Der Vorteil der geologischen Speicherung von CO₂ in Kohleflözen ist, dass das Kohlenstoffdioxid an die Kohlevorkommen adsorbiert und so fest gebunden werden kann. Dieser Prozess kann durch den Modellversuch A vereinfacht visualisiert werden. Als Modells substanz für Kohleflöze wird Aktivkohle verwendet. Die Verpressung von Kohlenstoffdioxid unter Druck wird mit Hilfe der Kolbenprober verdeutlicht. Dass der Prozess der Adsorption durch Erwärmung vermindert bzw. rückgängig gemacht werden kann, wird in Versuchsteil B gezeigt.

Die Vorgänge der Speicherung werden im Modellversuch stark didaktisch reduziert. In der industriellen Anwendung gibt es andere Reaktionsbedingungen und einige Hürden für die Umsetzung der geologischen Speicherung von Kohlenstoffdioxid in Kohleflözen. Damit diese Speicherform erfolgreich angewendet werden kann, müssen die Kohleflöze über eine gewisse Durchlässigkeit (Permeabilität) verfügen. Kommt es zu geringen Durchlässigkeiten, wird der Transport von Kohlenstoffdioxid und die anschließende Adsorption beeinträchtigt bzw. verhindert (vgl. 2.4.1). In Deutschland kommen diese Flöze nur an sehr wenigen Standorten mit geringer Permeabilität und in hohen Tiefen von 1500 m vor, weshalb eine Nutzung der Kohleflöze zur Speicherung von Kohlenstoffdioxid bisher nicht forciert wird. Neben sorptiven Speichern wie den Kohleflözen, gibt es auch Bestrebungen, gasförmiges Kohlenstoffdioxid in Porenspeichern wie salinaren Aquiferen oder ehemaligen Erdöl- und Erdgaslagerstätten zu speichern. Letztere werden auf Grund ihrer Erschließung und vorhandenen Infrastruktur für Speichervorhaben bevorzugt (vgl. 2.4.3).

Zusatzinformationen für Lehrkräfte: Damit die Versuche eine hohe Gelingwahrscheinlichkeit haben, sollten die Lernenden vor Beginn der Versuchsdurchführung in die Handhabung von Kolbenprobern und Parafilm eingeführt werden. Nur wenn die Apparatur mit Parafilm abgedichtet und alle Hähne geschlossen sind, können adäquate Messwerte erreicht werden. Wenn der Versuch als Schülerexperiment durchgeführt wird, sollte außerdem vor jedem Durchgang die Dichtigkeit und Funktionalität der Apparatur von der Lehrperson überprüft werden. Die Versuchsteile A und B können auch als Demonstrationsexperiment durchgeführt werden. Beispielhaft wird dies in einem deutsch- und einem englischsprachigen Versuchsvideo umgesetzt, das online zur Verfügung steht¹⁷⁸.


¹⁷⁸ Versuchsvideo: <https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/de/digitale-medien/lehr-/lernvideos-zu-versuchen-aus-unserer-fachdidaktischen-forschung/bne-bildung-fuer-nachhaltige-entwicklung/default-title/> (letzter Zugriff 06.01.24).

Für das bilinguale Lernsetting wurde eine Beschriftung des Versuchsaufbaus, eine bebilderte Versuchsanleitung, sowie eine vorstrukturierte Beobachtungstabelle in die Arbeitsmaterialien integriert. Zur fachlichen Auswertung des Versuchs stehen Informationskarten zur Verfügung. Die CCS-Technologie wird über die Infokarte „Questions answered“ (vgl. Abbildung 112) mit Kurzfragen und Antworten erläutert. Dabei wird ein Bezug zum Modellexperiment hergestellt. Zur sprachlichen Unterstützung stehen den Lernenden zur Auswertung des Versuchs Auswertungsfragen mit Formulierungshilfen für die Antworten und Annotationen von unbekannten Fachbegriffen zur Verfügung.

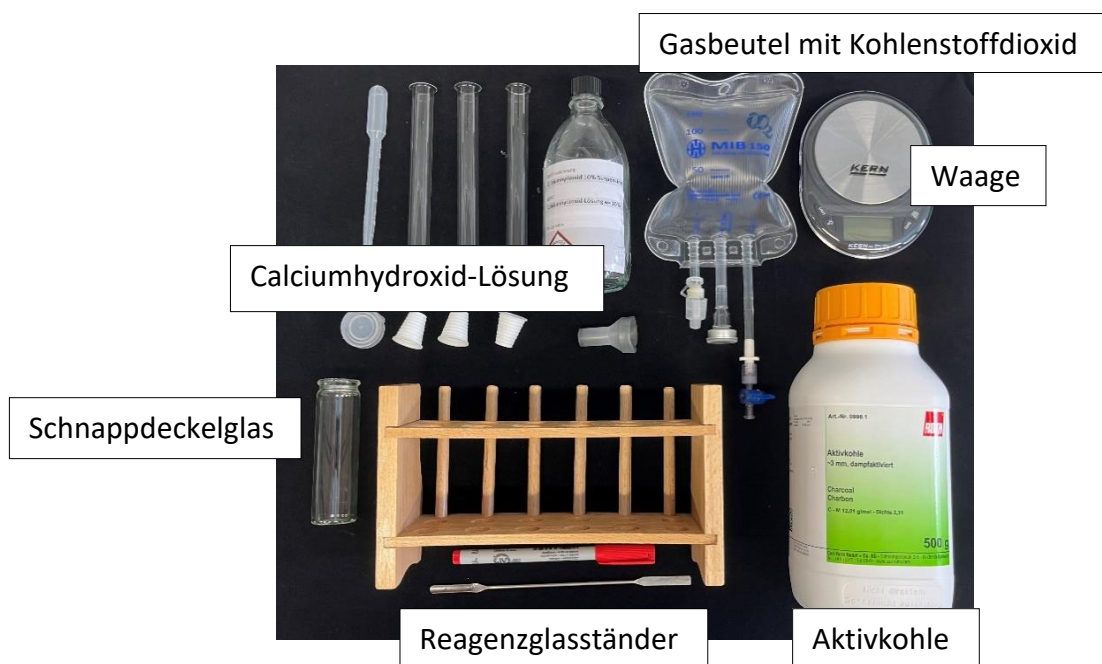
Abbildung 112. (links) Auswertungsfragen mit Formulierungshilfen, (rechts) „Questions answered“-Infokarte

Versuchsteil C: Nachweis von Kohlenstoffdioxid

Geräte: Schnappdeckelglas mit Deckel, Parafilm, Waage, Spatel, Reagenzglasständer, 3 Reagenzgläser, 3 Reagenzglasstopfen, Pipette, Folienstift, kleiner Trichter, kleines Becherglas,

Chemikalien: Aktivkohle C (gekörnt), Kohlenstoffdioxid CO_2 (im Infusionsbeutel), „Kalkwasser“ (Calciumhydroxid-Lösung, $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{aq})$) .

Versuchsaufbau:



Versuchsdurchführung:

1. Nummerieren Sie drei Reagenzgläser mit den römischen Zahlen I-III und geben Sie jeweils 4 mL Kalkwasser hinzu.
2. Wiegen Sie 0,25 g Aktivkohle ab, füllen Sie diese in Reagenzglas I und verschließen Sie es.
3. Wiegen Sie erneut 0,25 g Aktivkohle ab und geben Sie diese in ein Schnappdeckelglas. Leiten Sie ca. 100 mL Kohlenstoffdioxidgas aus dem Infusionsbeutel in das Schnappdeckelglas ein und verschließen Sie dieses anschließend mit einem Deckel.
4. Schütteln Sie das Schnappdeckelglas für eine Minute. Geben Sie die Aktivkohle aus dem Schnappdeckelglas mit einem Spatel in Reagenzglas II und verschließen Sie es mit einem Stopfen. Schütteln Sie Reagenzglas II.
5. Entleeren Sie das restliche Kohlenstoffdioxidgas aus dem Infusionsbeutel in Reagenzglas III. Verschließen Sie das Reagenzglas mit einem Stopfen und schütteln Sie.
6. Notieren Sie Ihre Beobachtungen in den Reagenzgläsern I-III und vergleichen Sie die Ergebnisse.

Beobachtung:

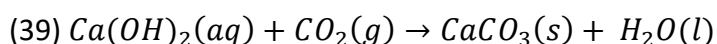
Reagenzglas	I) Kalkwasser und Aktivkohle	II) Kalkwasser und Aktivkohle (nach Vorbehandlung mit Kohlenstoffdioxid)	III) Kalkwasser und Kohlenstoffdioxid
Beobachtung	Keine Veränderung	milchig, weiße Trübung	milchig, weiße Trübung



Abbildung 113. (von links nach rechts) Versuchsbeobachtungen in Reagenzglas I-III

Fachliche Auswertung:

Kalkwasser besteht aus in Wasser gelöstem Calciumhydroxid. Die Kalkwasserprobe ist eine Nachweisreaktion für Kohlenstoffdioxid. Sie fällt positiv aus, wenn eine Trübung sichtbar ist. Beim Einleiten von Kohlenstoffdioxid in Kalkwasser entstehen für die Trübung verantwortliches festes Calciumcarbonat und Wasser (vgl. (39)).



Reagenzglas III fungiert als positive Vergleichsprobe. Ein Teil des Kohlenstoffdioxids aus Reagenzglas II kann an der großen Oberfläche der Aktivkohle adsorbieren und teilweise wieder desorbieren, der Nachweis ist folglich ebenfalls positiv. Da in Reagenzglas I kein Kohlenstoffdioxid vorliegt, ist der Nachweis hier negativ und die Lösung bleibt farblos und klar.

Didaktische Einordnung:

Mit diesem einfachen Hand-Experiment kann man zeigen, dass Kohlenstoffdioxid von Aktivkohle adsorbiert (und desorbiert) werden kann. Aktivkohle fungiert hierbei als Modellsubstanz für Kohleflöze. Die Nachweisreaktion ist den Lernenden aus dem Chemieunterricht bekannt und kann von ihnen auf das neue Beispiel angewandt werden.

Zusatzinformationen für Lehrkräfte: In diesem Versuch wurde Aktivkohlegranulat (~ 3 mm, dampfaktiviert, Firma Roth, Produktnummer 0988) verwendet. Andere Aktivkohlechargen können zu weniger eindeutigen Beobachtungen führen. Bei einigen gekörnten Aktivkohle-Sorten tritt bei der Zugabe von Kalkwasser eine Gasentwicklung auf. Dies ist auf Lufteinschlüsse in der Aktivkohle zurückzuführen und hat keinen Einfluss auf die Nachweisreaktion. Der Versuch ist auch unter Verwendung einer Gasflasche durchführbar, wenn keine Infusionsbeutel vorhanden sein sollten.

Modifikationen für den bilingualen Unterricht:

Das Experiment wurde für das bilinguale Lernsetting als Mediationsaufgabe mit Sprachwechsel gestaltet. Die Aufgabenstellung wurde angelehnt an ein Materialbeispiel zum Sprachwechsel im Chemieunterricht [172, S.169] erstellt. Der Sprachwechsel hat in dieser Aufgabe eine kognitive und kommunikative Funktion (vgl. 3.4.2). Die Lernenden erhalten eine deutsche Versuchsbeschreibung und müssen diese in die englische Sprache übertragen (vgl. Abbildung 114). Anschließend führen sie das Experiment durch und werten es auf Englisch aus. Die didaktische Ausgestaltung des Versuches ist in dieser Form möglich, weil den Lernenden die Nachweisreaktion bekannt ist und sie diese im Chemieunterricht schon in ähnlicher Form durchgeführt haben. Folglich liegt die Herausforderung für die Lernenden in diesem Experiment mehr auf der sprachlichen als auf der inhaltlichen Erschließung der Fachinhalte.

Station 2: Carbon Storage

MEDIATION

PROCEDURE
Model Experiment 3: Lime water test

Lime water is a solution of calcium hydroxide. It helps us to detect carbon dioxide. If carbon dioxide is present, the solution turns milky or cloudy white.

Aufgabe: 1. Lesen Sie die deutsche Versuchsvorschrift und besprechen Sie die einzelnen notwendigen Versuchsschritte.

- Nummerieren Sie drei Reagenzgläser mit den römischen Zahlen I-III und geben Sie jeweils 3 mL Kalkwasser hinzu.
- Entnehmen Sie 100 mL Kohlenstoffdioxidgas mit einer Plastikspritze aus dem Infusionsbeutel.
- Entleeren Sie die Spritze vollständig in Reagenzglas I. Verschließen Sie das Reagenzglas mit einem Stopfen und schütteln Sie.
- Wiegen Sie 0,25 g Aktivkohle ab und füllen Sie diese in Reagenzglas II. Notieren Sie Ihre Beobachtungen.
- Wiegen Sie erneut 0,25 g Aktivkohle ab und geben Sie diese in ein Schnappdeckelglas.
- Entnehmen Sie erneut 100 mL Kohlenstoffdioxidgas mit einer Plastikspritze aus dem Infusionsbeutel.
- Entleeren Sie die Spritze vollständig in das Schnappdeckelglas. Verschließen Sie das Schnappdeckelglas mit einem Deckel.
- Schütteln Sie das Schnappdeckelglas für eine Minute.
- Geben Sie den Inhalt des Schnappdeckelglases mit einem Spatel in Reagenzglas III und verschließen Sie es mit einem Stopfen.
- Schütteln Sie Reagenzglas III und notieren Ihre Beobachtungen.

Abbildung 114. Aufgabe zum Sprachwechsel im digitalen Lernbegleiter

4.4.2.6 Kohlenstoffdioxid als Einflussfaktor auf die Photosynthese

Ziel der Versuche: Untersuchung des Verbrauchs an Kohlenstoffdioxid durch Wasserpflanzen

Originalvorschriften: [260, S.105] und [259, S.12]

Vorgenommene Adaptionen für das Schülerlabor:

Die Versuchsdurchführung wurde als Schülerexperiment umgestaltet und für die Rahmenbedingungen des Schülerlaborsettings angepasst. Die in der fachdidaktischen Literatur als teilweise „papierbasierte“ Experimente (vgl. 4.4.1) dargestellten Versuche wurden für eine reale Experimentierumgebung adaptiert. Zur einfachen Vergleichbarkeit, im besonderen bei den Langzeitexperimenten, wurden Blindproben in den Versuchsoptionen 1 und 2 ergänzt. Insgesamt sind drei Versuchsoptionen entstanden, die im Schülerlabor erprobt wurden. Im finalen Angebot wird die Option 3 mit digitaler Messtechnik eingesetzt.

Option 1: verschiedene Wasserproben

Geräte:

3x 250 mL Erlenmeyerkolben, Pipette, ggf. Schere, Lampe, Parafilm, Stoppuhr

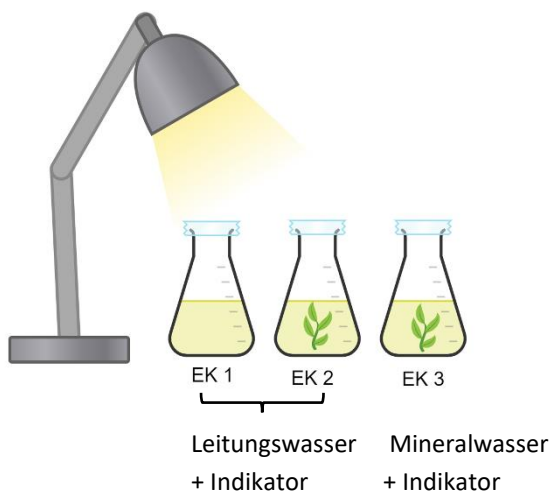
Chemikalien:

- Leitungswasser
- spritziges Mineralwasser
- Wasserpest (*Elodea canadensis*)
- Bromthymolblau-Lösung (w = 0,1 %) in Ethanol



Versuchsaufbau:

Erlenmeyerkolben unter einer Pflanzlampe



Durchführung:

1. Waschen Sie die Wasserpest mit Leitungswasser und zerteilen Sie sie mit einer Schere in ca. 10 cm lange Stränge. Geben Sie jeweils 4-5 Stränge Wasserpest in die Erlenmeyerkolben (EK) 2 und 3.
2. Füllen Sie anschließend alle EK mit 200 mL der verschiedenen Wasserproben auf: EK 1 und 2 mit Wasser und EK 3 mit Mineralwasser. Stellen Sie sicher, dass die Wasserproben in EK 2-3 die Wasserpest vollständig bedecken.
3. Geben Sie in jeden Erlenmeyerkolben 5-10 Tropfen der Indikatorlösung, bis ein deutlicher Farbeindruck sichtbar wird.
4. Verschließen Sie die Erlenmeyerkolben mit Parafilm oder einem Stopfen und stellen Sie sie unter eine starke Lichtquelle. Notieren Sie Ihre Beobachtungen und starten Sie anschließend Ihre Stoppuhr.
5. Notieren Sie weitere Beobachtungen nach 30 und nach 60 und 120 Minuten.

Entsorgung: Die Lösungen werden im Abguss entsorgt. Die Wasserpest kann im normalen Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtung:

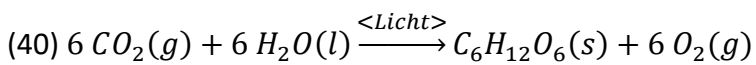
Kolben	Farbe des Indikators nach Zugabe	Farbe des Indikators nach 30 Minuten	Farbe des Indikators nach 60 Minuten	Farbe des Indikators nach 120 Minuten	Weitere Beobachtungen
EK 1	gelb-grün	gelb-grün	gelb-grün	gelb-grün	keine Veränderung
EK 2	gelb-grün	grün	blau	blau	kleine Gasbläschen bilden sich an der Pflanze nach ca. 30 Minuten
EK 3	gelb	gelb	gelb	gelb-grün	Gasbläschen sind in der Lösung vorhanden, nach ca. 30 Minuten Bildung starker Gasbläschen

Fachliche Auswertung:

Leitungswasser in EK 1 und 2 enthält gelöste Salze u.a. Hydrogencarbonate. Diese werden neben gelöstem Kohlenstoffdioxid von Wasserpflanzen als „Kohlenstoffquelle“ verwendet und mit Hilfe des in den Pflanzen vorhandenen Enzyms Carboanhydrase, zu Kohlenstoffdioxid umgesetzt und für die Photosynthese nutzbar gemacht. Die Carboanhydrase katalysiert die Prozesse und sorgt für eine schnellere Gleichgewichtseinstellung. Ebenso wird der Transport von Hydrogencarbonat-Ionen beschleunigt [262, S.41-42]. Diese Prozesse laufen in EK 2 ab (vgl. 2.2.2.3).

Mit Hilfe von Sonnenlicht können aquatische Pflanzen wie die Wasserpest Photosynthese betreiben und Sauerstoff und energiereiche Kohlenhydrate produzieren. Das entstehende Sauerstoffgas kann als kleine Gasbläschen an den Blattoberflächen und in der Lösung beobachtet werden.

Vereinfacht kann die Photosynthese mit folgender Gleichung (40) dargestellt werden:



Da sich während des Versuchs immer weniger Kohlenstoffdioxid in Lösung befindet, kann eine zunehmende Alkalinität beobachtet werden (vgl. Reaktionen in 4.4.2.1). Der Indikator zeigt dies in EK 2 mit einem Farbumschlag von gelb zu grün bzw. blau an. EK 1 dient im Versuch als Blind- bzw. Vergleichsprobe.

„Spritziges Mineralwasser“ enthält zugesetztes Kohlenstoffdioxid (vgl. 4.4.2.2). Der pH-Wert von Mineralwasser liegt je nach Produkt zwischen 5-6. In EK 3 findet auch der Prozess der Photosynthese statt, der Farbumschlag des Indikators und die damit verbundene pH-Wert-Erhöhung setzt jedoch deutlich verzögerter ein als in EK 2.

Option 2: Einfluss von Licht

Geräte:

4x 250 mL Erlenmeyerkolben (EK), Pipette, Schere, Pflanzlampe, Parafilm, Stoppuhr, Pinzette, Styroporbox oder andere Aufbewahrungsmöglichkeit im Dunkeln

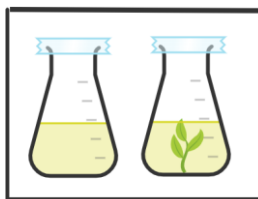
Chemikalien:

- Leitungswasser,
- Wasserpest (*Elodea canadensis*),
- Bromthymolblau-Lösung (w = 0,1 %) in Ethanol

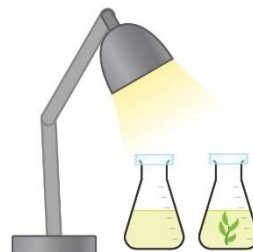


Versuchsskizze:

Erlenmeyerkolben 1 und 2 in Styroporbox



Erlenmeyerkolben 3 und 4 unter Pflanzlampe



Versuchsdurchführung:

1. Beschriften Sie die vier Erlenmeyerkolben (EK) mit den Zahlen 1-4 und füllen Sie jeden Kolben mit jeweils 200 mL Leitungswasser.
2. Geben Sie in jeden EK 5-10 Tropfen der Indikatorlösung, bis ein deutlicher grüner Farbeindruck sichtbar wird.
3. Waschen Sie die Wasserpest mit Leitungswasser und zerteilen Sie sie mit einer Schere in ca. 10 cm lange Stränge. Geben Sie jeweils 4-5 Stränge Wasserpest in die Erlenmeyerkolben 2 und 4. Stellen Sie sicher, dass die Wasserproben die Wasserpeststränge vollständig bedecken.
4. Verschließen Sie alle Erlenmeyerkolben mit Parafilm.
5. Stellen Sie EK 1 und 2 in eine Styroporbox (oder ins Dunkle) und verschließen Sie diese mit einem Deckel. Stellen Sie EK 3 und 4 unter eine Pflanzlampe.
6. Notieren Sie Ihre Beobachtungen und starten Sie anschließend ihre Stoppuhr.
7. Notieren Sie weitere Beobachtungen nach 30 und nach 60 und 90 Minuten.

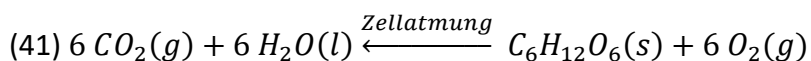
Beobachtungen:

Kolben	Farbe des Indikators nach Zugabe	Farbe des Indikators			Weitere Beobachtungen (Was passiert an der Blattoberfläche der Wasserpest?)
		nach 30 Minuten	nach 60 Minuten	nach 90 Minuten	
EK 1	gelb-grün	gelb-grün	gelb-grün	gelb-grün	Blindprobe, fungiert als Referenz
EK 2	gelb-grün	gelb-grün	gelb-grün	gelb-grün	keine
EK 3	gelb-grün	gelb-grün	gelb-grün	gelb-grün	Blindprobe, fungiert als Referenz
EK 4	gelb-grün	grün	blau	blau	kleine Gasbläschen bilden sich an der Pflanze nach ca. 30 Minuten

Fachliche Auswertung:

Mit Hilfe von Lichtenergie können Wasserpflanzen wie Wasserpest Photosynthese betreiben. Das in Wasser gelöste Kohlenstoffdioxid wird genutzt, um Nährstoffe und Sauerstoff zu produzieren (vgl. (40)). Das entstehende Sauerstoffgas kann in Form von kleinen Gasbläschen an den Blattoberflächen und in der Lösung beobachtet werden. Die Vorgänge in EK 4 laufen ähnlich ab wie die in EK 2 aus Option 1. Da sich während des Versuchs immer weniger Kohlenstoffdioxid in Lösung befindet, kann eine zunehmende Alkalinität beobachtet werden. Der Indikator zeigt dies in EK 4 mit einem Farbumschlag von gelb zu grün bzw. blau an.

Das Vorhandensein der Lichtenergie ist für den Prozess essentiell. Ist diese wie in EK 2 nicht vorhanden, kommt der Prozess zum Erliegen. Es werden keine Gasbläschen oder Farbumschläge beobachtet. Würden die Proben länger ohne Licht verbleiben, wird die Rückreaktion der Photosynthese, die Zellatmung, favorisiert (vgl. (41)).



Didaktische Einordnung:

In den Versuchen wird mit der Wasserpflanze Wasserpest vereinfacht gezeigt, wie Kohlenstoffdioxid mit Hilfe der Photosynthese zu anderen Reaktionsprodukten umgesetzt werden kann. Diese Umsetzung wird in verschiedenen wässrigen Medien (Option 1) bzw. durch den Einflussfaktor Licht (Option 2) untersucht. Als Beispielsubstanz wird in den Experimenten die Wasserpest gewählt, weil sie leicht verfügbar und kostengünstig ist.

Bei Option 1 ist die Beobachtung der Gasentwicklung in der spritzigen Mineralwasserprobe schwierig, weil diese von Anfang an im Versuchsansatz sichtbar ist. Dies erschwert die späteren Beobachtungen und macht eine seriöse Aussage über die Entstehung von Sauerstoff unmöglich. Obwohl sie in einigen biologiedidaktischen Publikationen als geeigneter Versuch beschrieben [259, S.150] wird, wurde Option 1 für den Einsatz im Schülerlabor verworfen.

Die Funktion der Wasserpflanzen und Ozeane als Kohlenstoffdioxidsenken ist von großer Bedeutung für den natürlichen Kohlenstoffkreislauf und den Klimaschutz. Diese Effekte macht man sich auch in Verfahren zur *Carbon Utilisation* zu Nutze, indem Wasserorganismen wie Mikroalgen mit Hilfe von Rauchgasströmen kultiviert und für andere Anwendungsbereiche weiterverwendet werden. Analog zu den geschilderten Schulversuchen müssen auch in den industriellen Verfahren der Kohlenstoffdioxidabscheidung (vgl. 2.2.2.3) die idealen Reaktionsbedingungen für die eingesetzten Pflanzen geschaffen werden, um hohe Biomasseerträge und Abscheidungsquoten zu erreichen.

Hinweise für Lehrkräfte:

Um optimale Ergebnisse zu erreichen, empfiehlt es sich vor der Versuchsdurchführung die Wasserpest für mindestens drei Stunden abgedunkelt in (destilliertes) Wasser einzulegen. Reihenuntersuchungen haben gezeigt, dass der Versuch sowohl mit Leitungswasser als auch mit destilliertem Wasser funktioniert. Je nach pH-Wert des Leitungswassers der jeweiligen Region, müssen die Leitungswasserproben auf einen pH-Wert von 6-7 (gelb-grüne Farbe bei Verwendung von Bromthymolblau) eingestellt werden.

Als Lampe kann ein OHP, eine Ultravitalux-Lampe (300W) oder eine handelsübliche Aquariumlampe/Tischlampe verwendet werden. Die Versuchsoption 2 kann auch als englischsprachiges- oder deutschsprachiges Video gezeigt werden¹⁷⁹.

Das generierte Sauerstoffvolumen ist in beiden Versuchsoptionen sehr gering und kann nur im Mikromaßstab mit der Glimmspanprobe nachgewiesen zu werden. Alternativ kann man dies über ein Versuchsvideo¹⁸⁰ zeigen.

Modifikationen für den bilingualen Unterricht:

Für das bilinguale Lernsetting werden Annotationen und eine vorstrukturierte Beobachtungstabelle bereitgestellt. Als inhaltliche Hilfestellung zur Auswertung des Versuchs erhalten die Lernenden Informationskarten, strukturierte Auswertungsfragen und Hintergrundinformationen zur Wiederholung des Prozesses der Photosynthese (vgl. Abbildung 115).

¹⁷⁹ Versuchsvideo Option 2: <https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/de/digitale-medien/lehr-/lernvideos-zu-versuchen-aus-unserer-fachdidaktischen-forschung/bne-bildung-fuer-nachhaltige-entwicklung/aufnahme-von-kohlenstoffdioxid-bei-der-photosynthese/> (letzter Zugriff 06.01.24).

¹⁸⁰ Versuchsvideo Sauerstoffnachweis: <https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/index.php?id=5359&L=0> (letzter Zugriff 06.01.24).

Station 3: Biological Carbon Utilisation

CONCLUSION

1. Describe how flasks 2 and 4 differ at the end of the experiment. Use Info Card 1 to explain the colour change.

2. Use Info Card 1-3 to explain the colour change in flask 4.

THINK FURTHER...

In our experiment flasks 1 and 3 function as blank samples (Blindproben). They do not take part in the reaction and remain unchanged for comparison.

Info Cards 1-3

Click on the question mark for background information on the process of photosynthesis.

Abbildung 115. Auszug aus dem Lernbegleiter zur Auswertung des Versuchs

Option 3: Einsatz digitaler Messtechnik

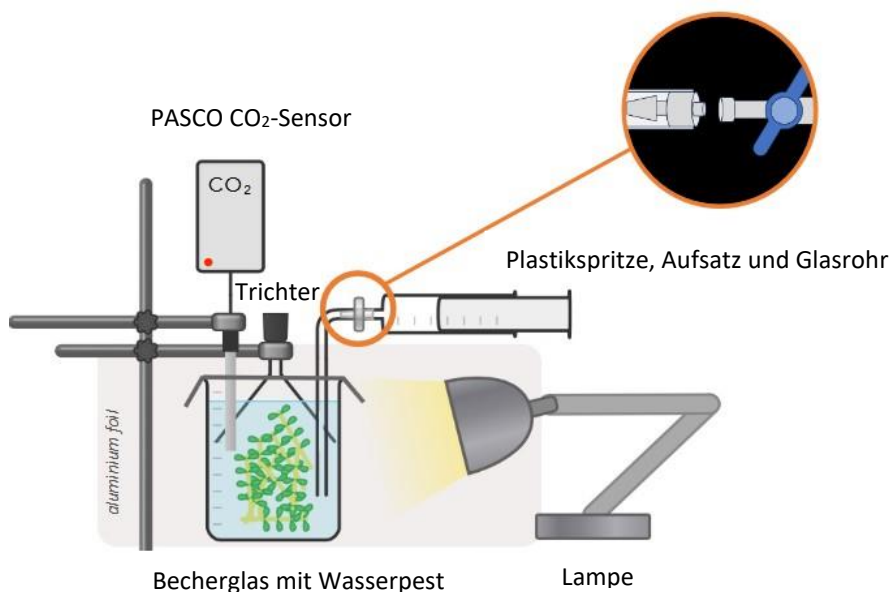
Geräte:

2 Stative mit Fuß, 2 Muffen, 2 Klemmen, PASCO CO₂-Sensor mit Wasserschutz, Frischhaltefolie, 1000 mL Becherglas, 100 mL Plastikspritze mit Aufsatz, Glasrohr mit Spritzenaufsatz, Schere, Pinzette, Pflanzlampe, Ipad

Chemikalien:

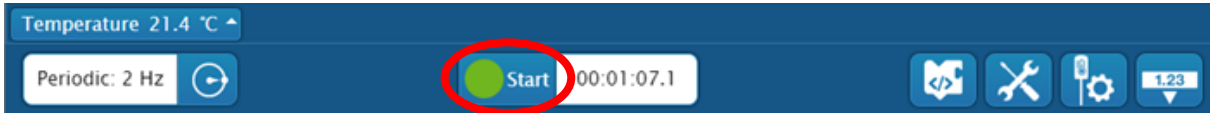
Wasserpest (Elodea Densa), Leitungswasser, 100 mL Kohlenstoffdioxid im Gasbeutel

Versuchsaufbau:

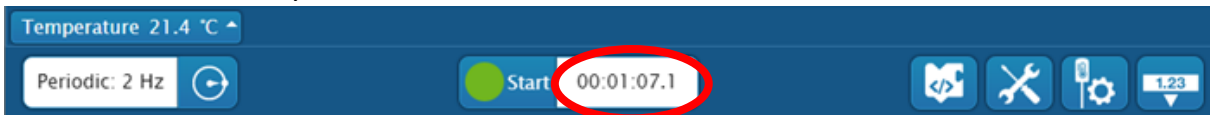


Versuchsdurchführung:

1. Platzieren Sie das Becherglas in der Mitte des Versuchsaufbaus (siehe Skizze).
2. Tauchen Sie den Trichter 6-8 cm tief in das Becherglas, indem Sie die Höhe der Stativklemme passend einstellen.
3. Versehen Sie den PASCO-CO₂-Sensor mit einem Wasserschutz und befestigen Sie ihn mit Hilfe des Stativmaterials. Tauchen Sie den Sensor 3-4 cm in das Becherglas, indem Sie die Höhe der Stativklemme einstellen.
4. Platzieren Sie das Glasrohr vorsichtig in der Lösung.
5. Decken Sie die Öffnung des Becherglases mit Frischhaltefolie ab.
6. Schalten Sie die Lampe an und starten Sie die Messung in der App.



7. Lassen Sie die Messung 25 Minuten laufen. Die Zeit können Sie in der App verfolgen oder einen Timer auf Ihrem Handy stellen.



8. Nach dem Ablauf der 25 Minuten, füllen Sie mit Hilfe einer Plastikspritze, 100 mL Kohlenstoffdioxid aus einem Gasbeutel ab.
9. Bringen Sie die gefüllte Plastikspritze vorsichtig am Glasrohr an.
10. Leiten Sie das Kohlenstoffdioxid in 20 mL-Schritten durch das Glasrohr in die Lösung. Warten Sie nach jeder Zugabe 10 Sekunden, bevor Sie weitere Zugaben vornehmen. Verfahren Sie so weiter, bis die Spritze entleert ist.
11. Nehmen Sie die Spritze ab und entfernen Sie vorsichtig das Glasrohr. Decken Sie die Apparatur erneut mit Frischhaltefolie ab und lassen Sie die Messung 15 Minuten laufen.
12. Stoppen Sie die Messung nach Ablauf der 15 Minuten.





13. Speichern Sie Ihre Messdaten, indem Sie links oben den „Main Menu“-Knopf und anschließend „Save“ auswählen.



14. Entfernen Sie den CO₂-Sensor aus der Lösung und schalten Sie diesen aus.

Beobachtungen:

Die dargestellten Werte in der Messwerttabelle und im Graphen sind beispielhaft und können je nach Versuchsdurchführung und eingesetzter Pflanze variieren.

	Kohlenstoffdioxid-Konzentration im Wasser [ppm]	andere Beobachtungen <i>(Was passiert an der Oberfläche der Wasserpest? Was beobachten Sie im Trichter?)</i>
Beginn des Experiments	968	-
Nach 25 Minuten	798	geringe Bläschenbildung an der Pflanze und im Trichter 
Nach der Zugabe von Kohlenstoffdioxid	100020	
Ende des Experiments	1138	sehr starke Bläschenbildung an der Pflanze und im Trichter 

Der Graph in Abbildung 116 zeigt die aufgenommene Messkurve während des ersten Versuchsteils. Die Kohlenstoffdioxid-Konzentration in ppm wird über einen Zeitraum von 25 Minuten Bestrahlung abgebildet. Die Messwerte werden grafisch durch eine orangene Kurve dargestellt. Als Referenz ist eine Messreihe ohne Elodea (blaue Kurve) angegeben.

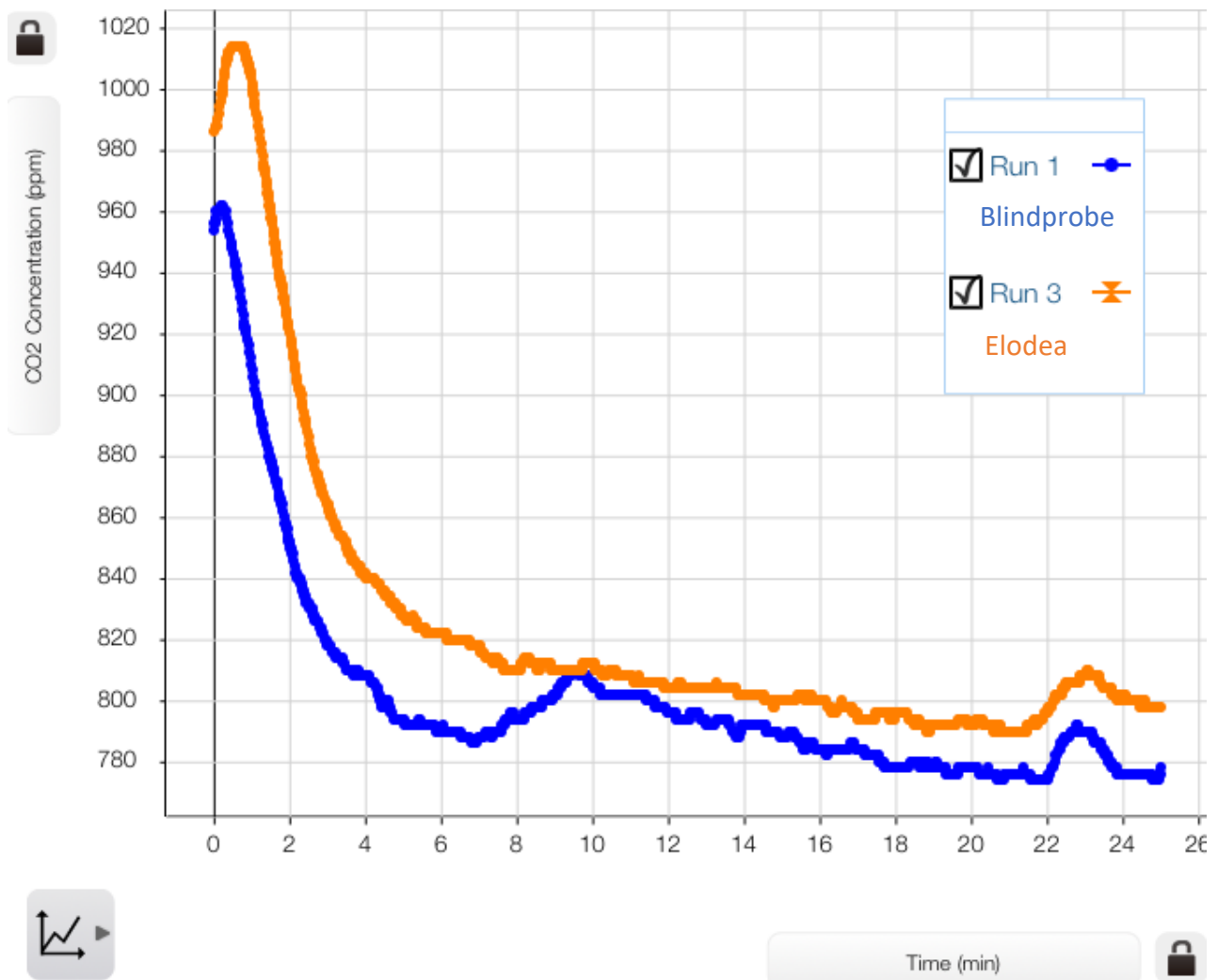


Abbildung 116. CO₂-Konzentration [ppm] im Wasser pro Zeit [min]-Diagramm bei 25 Minuten Bestrahlung

Der Graph in Abbildung 117 zeigt die Kohlenstoffdioxid-Konzentration nach Zugabe von 100 mL Kohlenstoffdioxid im zweiten Versuchsteil des Experimentes. Die Werte wurden über einen Zeitraum von 15 Minuten aufgenommen. Neben den Messwerten mit der Elodea (dunkelblau- violette Kurve) wurde als Vergleich eine Blindprobe ohne Wasserpflanze (türkise Kurve) aufgenommen.

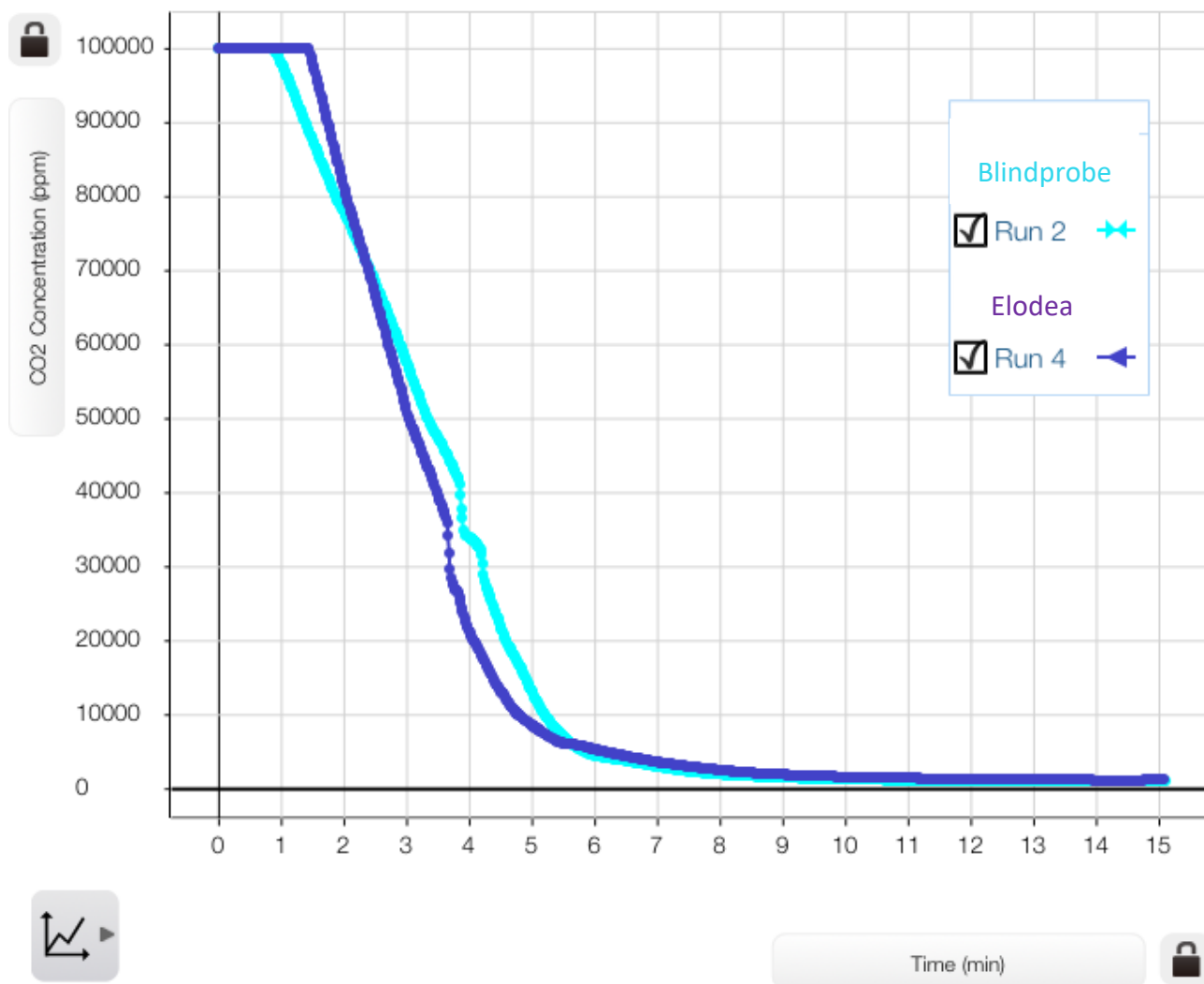
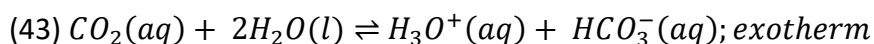
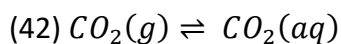


Abbildung 117. CO₂-Konzentration [ppm] im Wasser pro Zeit [min]-Diagramm nach Zugabe von 100 mL Kohlenstoffdioxid

Fachliche Auswertung:

Wasserpflanzen wie z.B. Wasserpest können Lichtenergie in chemische Energie mit Hilfe des grünen Blattfarbstoffs (Chlorophyll) durch den Prozess der Photosynthese (vgl. (40)) umwandeln. Kohlenstoffdioxid und Wasser werden dabei zu Kohlenhydraten und Sauerstoff umgesetzt. Im Wasser liegt Kohlenstoffdioxid in gekoppelten Gleichgewichten vor (vgl. (42) und (43)).



Der im Experiment eingesetzte Sensor misst die Konzentration des gelösten Kohlenstoffdioxidgases. Diese Konzentration nimmt über die Zeit ab, weil immer mehr gelöstes Kohlenstoffdioxid umgesetzt wird (vgl. Abbildung 116). Das entstandene Reaktionsprodukt Sauerstoff kann durch die Gasbläschen an der Wasserpflanze und im Trichter beobachtet werden.

Die Zugabe von 100 mL Kohlenstoffdioxid führt zu einer Erhöhung der Konzentration des Edukts Kohlenstoffdioxid. Das Gleichgewicht weicht diesem Zwang aus und verlagert sich. Dabei wird die eingeführte Substanz verbraucht und ihre Konzentration verringert sich (vgl. Abbildung 117).

Die Hinreaktion aus Gleichung (43) wird favorisiert. Als Reaktionsprodukte liegen in der Lösung Hydrogencarbonat- und Oxonium-Ionen vor. Der höhere Anteil an Hydrogencarbonat-Ionen führt zu einer höheren Photosyntheserate in der Wasserpflanze und einer damit zusammenhängenden gesteigerten Sauerstoffproduktion.

Didaktische Einordnung:

Im Versuch wird mit einer Wasserpflanze vereinfacht gezeigt, wie aufgereinigtes Kohlenstoffdioxid z.B. aus Industrieprozessen mit Hilfe der Photosynthese zu anderen Reaktionsprodukten umgesetzt werden kann. Im industriellen Maßstab werden hierfür grüne Mikroalgen in Photobioreaktoren eingesetzt (vgl. 2.2.2.3)¹⁸¹. Das Gas wird je nach Anlage als Reinstoff oder mit Luft vermischt in die Photobioreaktoren injiziert [56, S.1167-1168].

In diesem Schülerexperiment wird zur Verdeutlichung der ablaufenden Prozesse vereinfacht die Modellpflanze Wasserpest eingesetzt. Dazu wird digitale Messtechnik zur Erfassung der Kohlenstoffdioxid-Konzentration mit dem klassischen Trichterexperiment¹⁸² kombiniert, um den Verbrauch von Kohlenstoffdioxid im Prozess der Photosynthese zu visualisieren. Die Gasentwicklung wird stark vereinfacht auf das Vorhandensein von Sauerstoff reduziert. In der Lösung können jedoch je nach Temperatur- und Druckbedingungen auch noch andere Stoffe wie z.B. Kohlenstoffdioxid zur beobachteten Bläschenbildung beitragen. Es legt die Vermutung nahe, dass es sich bei der verstärkten Gasentwicklung nach der Einleitung von Kohlenstoffdioxid auch z.T. um Kohlenstoffdioxid handeln könnte. Auf genaue Nachweise der entstehenden Gase musste jedoch verzichtet werden, weil diese im Messzeitraum keine eindeutigen Ergebnisse lieferten.

Das Modellexperiment soll die Prozesse bei der Anreicherung von Algenanlagen mit Kohlenstoffdioxid verdeutlichen. Dies hat jedoch gewisse Grenzen. Durch die Graphen in Abbildung 116 und 117 wird deutlich, dass sich die Effekte, die die Pflanze ausübt, nicht durch die zur Verfügung stehende Messtechnik detektieren lassen. Der Verlauf des Graphens der Blindprobe (ohne Elodea) und mit Elodea ist beinahe identisch. Dieser Effekt war auch bei geringeren Volumina von eingesetztem Kohlenstoffdioxid (50 mL oder 10 mL) beobachtbar. Folglich ist die Aussagekraft des Versuches diskutierbar.

Zusatzinformationen für Lehrkräfte:

Damit aufschlussreiche Ergebnisse erzielt werden, sollten 8-9 Stränge Wasserpest mit Hilfe einer Pinzette entnommen und diese in ein 1000 mL Becherglas mit Leitungswasser gegeben werden. Um die zu beobachtende Gasentwicklung zu erhöhen, kann man die Pflanze an den Zweigen in kleinere Abschnitte unterteilen. Je frischer die Pflanze ist, desto bessere Versuchsbeobachtungen können erreicht werden.

Der Umgang mit der digitalen Messtechnik erfordert einige Voreinstellungen, damit die Lernenden damit reibungslos arbeiten können.

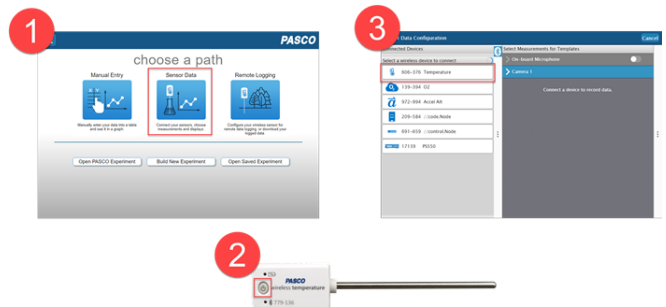
¹⁸¹ Eine andere Möglichkeit besteht darin, aufgereinigtes Kohlenstoffdioxid aus Industrieanlagen in Gewächshäuser einzuleiten.

¹⁸² Exemplarische Versuchsanleitung: www.unterrichtsmaterialien-chemie.uni-goettingen.de/material/5-6/V5-128.pdf (letzter Zugriff 16.05.25).

Die folgend beschriebene Vorbereitung des Messwerterfassung sollte vor der Durchführung des Versuches entweder gemeinsam mit den Lernenden oder durch die Lehrkraft durchgeführt werden. Um eine gleichzeitige Arbeit mit dem E-Book zu gewährleisten, sollte für die Messwerterfassung ein separates Ipad verwendet werden. Die PASCO App erlaubt es nicht während der Messung auf andere Anwendungen zuzugreifen, weshalb es sinnvoll ist für die Messwerterfassung ein eigenes Gerät z.B. Ipad oder Smartphone zu verwenden.

Einstellungen der PASCO App

1. Öffnen Sie die PASCO App¹⁸³ und wählen Sie den Bereich „Sensor Data“ aus.
2. Schalten Sie den Sensor an.
3. Koppeln Sie den Sensor mit der App.
4. Wählen Sie ein Template „Table und Graph“ aus.
5. Stellen Sie auf der linken Seite die Wertetabelle passend ein, indem Sie auf time [min] und CO₂ Conc [ppm] und diese als Spalten anlegen (siehe Beispieltabelle unten).



Time [min]	CO ₂ Conc [ppm]

6. Stellen Sie auf der rechten Seite die grafische Darstellung ein.
7. Stellen Sie sicher, dass die richtigen Einheiten eingestellt sind und nehmen Sie ggf. Änderungen vor, indem Sie auf die entsprechenden Schaltflächen klicken.
8. Warten Sie nach dem Koppeln und Platzieren des Sensors ca. 3 Minuten, bevor Sie die Messung starten, damit sich der Sensor auf die Messumgebung einstellen kann.

4.4.3 Zwischenfazit

Durch die gewonnenen Erkenntnisse aus den Kapiteln 4.4.1 bis 4.4.2, können die aufgestellten konzeptionellen Fragestellungen (F) nun wie folgt beantwortet (A) werden

(F12) Welche Versuche zu CCS existieren bereits?

(A12) Zu Beginn des Projekts wurden bereits bestehende englischsprachige und deutschsprachige didaktisierte Quellen in Bezug auf schulnahe Experimente gesichtet. Die Mehrheit der beschriebenen englischsprachigen Experimente waren für die intendierte Zielgruppe im Schülerlabor zu einfach oder zu schwer und damit nicht altersgerecht. In den untersuchten deutschsprachigen Quellen wurde CCS als Thematik für die Sekundarstufe II sporadisch behandelt, jedoch meist ohne die Verwendung von Experimenten. In deutschen, chemiedidaktischen Veröffentlichungen fanden sich Experimentiervorschläge, die auch später für das Laborangebot ausgewählt und adaptiert wurden. Bilingual-englische Versuchsanleitungen oder Lernmodule zu CCS existierten nach den Ergebnissen der Recherchebemühungen nicht.

¹⁸³ Abbildung PASCO App: https://cdn.pasco.com/product_document/Wireless-CO2-Sensor-PS-3208-Manual.pdf (letzter Zugriff 03.07.25).

(F13) Welche Versuche eignen sich für das geplante Setting?

(A13) Auf Grund der Komplexität der Inhalte, eignen sich besonders alltagsnahe, einfache Handversuche und Modellexperimente, um die Lernenden an die Thematik heranzuführen sowie die grundlegenden Abläufe und chemischen Prozesse zu erläutern. Die ausgewählten fünf Experimente (vgl. Tabelle 30) wurden auf Grund ihrer Altersangemessenheit, ihrer Gelingwahrscheinlichkeit, ihres zeitlichen Umfangs, ihrer deutlichen, reproduzierbaren Effekte und ihrer Durchführbarkeit als Schülerversuche ausgesucht.

Tabelle 30. Übersicht der ausgewählten Versuche für den Schülerlabor-Kurs „What to do with CO₂?“

Experiment	Ziel des Versuchs	Station im Schülerlabor-Kurs
Einfluss der Temperatur auf das Kohlensäure-Kohlenstoffdioxid-Gleichgewicht (vgl. 4.4.2.2)	Visualisierung des Einflusses der Temperatur auf das Kohlensäure-Kohlenstoffdioxid-Gleichgewicht	Optional 4
Absorption von Kohlenstoffdioxid in basischen Lösungsmitteln (vgl. 4.4.2.3)	Absorption von Kohlenstoffdioxid in einem basischen Lösungsmittel visualisieren	Station 1: Carbon Capture
Absorption von Kohlenstoffdioxid in verschiedenen alkalischen Lösemitteln (vgl. 4.4.2.4)	Absorptionsrate von Kohlenstoffdioxid in zwei alkalischen Lösemitteln	Station 1: Carbon Capture
Adsorption von Kohlenstoffdioxid an Aktivkohle (vgl. 4.4.2.5)	Modellexperiment zur geologischen, adsorptiven Speicherung von Kohlenstoffdioxid	Station 2: Carbon Storage
Kohlenstoffdioxid als Einflussfaktor auf die Photosynthese: Option 3 Einsatz digitaler Messtechnik (vgl. 4.4.2.6)	Untersuchung des Verbrauchs an Kohlenstoffdioxid durch Wasserpflanzen	Station 3: Carbon Utilisation

(F14) Welche Adaptionen müssen vorgenommen werden?

(A14) Grundlegend mussten bei vielen der ausgewählten Experimente Anpassungen der Versuchsdurchführung zur besseren Verständlichkeit vorgenommen werden. Oft war auch eine kleinschrittigere Beschreibung der Vorgehensweise nötig, um die Versuchsschritte klarer voneinander zu trennen. In einigen Fällen wurden Gerätschaften und Chemikalien ausgetauscht oder ersetzt, so wurden z.B. in allen Versuchen Infusionsbeutel verwendet, um die Nutzung einer Gasflasche zu umgehen. Einige Versuchsvorschriften wurden um weitere Versuchsteile ergänzt, um z.B. bekannte Nachweisreaktionen zu inkludieren. Als experimentelle Hilfestellungen erhielten die Lernenden bei apparativ anspruchsvollen Versuchen bebilderte Versuchsanleitungen oder z.B. eine Anleitung zur Handhabung von Parafilm.

Inhaltlich wurden gestufte Hilfekarten, vorstrukturierte Beobachtungstabellen, Auswertungsfragen und Infokarten mit Abbildungen als Unterstützung integriert. Als sprachliche Hilfestellungen wurden Beschriftungen des Versuchsaufbaus Annotationen, Formulierungshilfen, Word Banks und ein Lab Equipment Poster zur Verfügung gestellt.

4.5 Materialentwicklung

In diesem Teilkapitel wird die Vorgehensweise der Materialentwicklung für das bilinguale Lernsetting erläutert. Zu Beginn wird eine ausführliche Untersuchung von bestehenden Arbeitsmaterialien und Unterrichtssequenzen zu CCS (vgl. 4.5.1) vorgestellt. Daran schließt sich die Schilderung zur eigenen Konzeption der Materialien (vgl. 4.5.2) an, die schließlich in die Entwicklung eines digitalen E-Books (vgl. 4.5.3) mündete. Dabei werden folgende Fragestellungen adressiert:

(F15) Welche Materialien zu CCS existieren bereits?

(F16) Eignen sich diese Materialien für das geplante Setting oder müssen Adaptionen vorgenommen werden?

(F17) Nach welchen Kriterien wurde das Material gestaltet?

(F18) Welchen Mehrwert bietet die digitale Lernumgebung?

4.5.1 Untersuchung von bestehenden Arbeitsmaterialien

Zu Beginn des Projekts im Jahr 2019 wurden bestehende bilinguale, deutsch- und englischsprachige Arbeitsmaterialien für Lernende recherchiert.

Die Recherche zu bilingual-englischsprachigen Sequenzen und Materialien zu CCS verlief erfolglos. Es konnten keine bestehenden bilingualen Arbeitsmaterialien gefunden werden. Dies lässt sich wahrscheinlich auch mit der generellen geringen Verfügbarkeit von bilingual-chemischen Unterrichtsmaterialien (vgl. 3.6.3) begründen.

Im deutschsprachigen Raum existierten einige Publikationen mit thematischen Schwerpunkten wie den Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid, dem Klimawandel, dem Kalkkreislauf oder der Versauerung der Meere. Die Prozesskette *Carbon Capture and Storage* nahm dabei jedoch meist einen geringen Stellenwert ein. Die Mehrheit der bereits bestehenden Arbeitsmaterialien zu CCS wurden für die Sekundarstufe II konzipiert. Meist handelte es sich um didaktisierte Erläuterungen der Prozesskette, die mit Hilfe von Informationstexten und der Auswertung von Diagrammen vermittelt wurden [263]. Durch die zunehmende Popularität von BNE und der zunehmenden Bekanntheit von CCS im politischen Diskurs (vgl. 2.5.3), konnte eine Zunahme der verfügbaren Materialien festgestellt werden. Exemplarisch seien hier ein CCS-Unterrichtsmaterial aus dem BNE- Forum Sachsen [264] und ein Arbeitsmaterial aus der Klett Nachhaltigkeitsreihe [265] genannt. Die Arbeitsmaterialien integrieren mehrdimensionale Betrachtungsweisen und adressieren die Bewertungskompetenz im Sinne der BNE (vgl. 4.1.4).

Die Thematik hat außerdem Einzug in die Lernaufgaben der Bildungsstandards für die allgemeine Hochschulreife in den Naturwissenschaften gefunden. Mit Hilfe des Einsatzes von Videos, Diagrammen, sowie eines Papierexperiments zur Kohlenstoffdioxidsequestrierung mit Olivin wird die CCS-Prozesskette vermittelt [266].

In dieser Lernaufgabe werden verschiedenste Materialien zur Verfügung gestellt, die dann von den Lernenden bearbeitet und ausgewertet werden. Eine ähnliche Vorgehensweise wurde später auch in der Konzeption der Schülerlabormaterialien umgesetzt (vgl. 4.5.2). Eine experimentbasierte Vermittlung der Lerninhalte in Form von Demonstration- bzw. Schülerexperimenten wird in den Materialien nicht angesprochen.

Im englischsprachigen Raum fanden sich eine Vielzahl an didaktisierten Materialien für Lernende. Die intendierte Zielgruppe war im Gegensatz zu den deutschsprachigen Arbeitsmaterialien eher die Sekundarstufe I. Exemplarisch sei hier Catherine Morgans Unterrichtsreihe zu CCS genannt, die sie in Schottland in einer 7. Klasse durchgeführt hat [243]. Weiterhin fiel bei der Recherche von bestehenden Materialien auf, dass im englischsprachigen Raum oft industrielle Interessenverbände bei der Konzeption beteiligt waren. Exemplarisch sei hier ein Projekt aus Australien, *CarbonKids* genannt, welches u.a. von der Firma Bayer finanziert wird und Material zur Umwelterziehung und CCS an Schulen anbietet. Das Angebot richtet sich besonders an Regionen und Gemeinden, wo CCS-Projekte implementiert werden sollen. Schulen können sich für das Programm *CarbonKids* für die Jahrgangsstufen 4-6 anmelden und werden mit Unterrichtsmaterialien versorgt. Als Betreuende stehen Forschende und Vertretende der Industrie für die Schulen zur Verfügung [267, S.7295-7299]. Auf universitärer Ebene lassen sich z.B. auch Projekte für Studierende der Ingenieurwissenschaften in den USA finden [268], die sich mit CCS beschäftigen. Die Modellierungen und dort eingesetzten Experimente sind jedoch zu umfangreich für einen schulischen Kontext.

Diese Rechercheeindrücke bestätigt auch eine Studie aus dem Jahr 2011 von Colliver, Dowd und Rodriguez. In der Studie wurden 500 internationale, didaktisierte Materialien mit Bezug auf CCS untersucht. Der Schwerpunkt der Untersuchung wurde auf analoges und digitales schulisches Material für die Primar- und Sekundarstufe gelegt. Der Großteil der Materialien war in englischer Sprache verfasst [269, S.8]. Von den 500 Materialien wurden nur 45 Ressourcen identifiziert, die für die intendierte Zielgruppe geeignet waren. Ungefähr 66,7% der Materialien waren zusätzliche Ressourcen wie z.B. Videos, Animationen und Fact Sheets [269, S.9]. Die Studie stellte fest, dass konkrete Unterrichtsmaterialien mit hilfreichen Informationen für Lehrkräfte die Minderheit der verfügbaren Materialien darstellten. Die Forschenden bilanzierten in ihrer Studie, dass nur wenige der Materialien direkt im Unterricht eingesetzt werden könnten [269, S.17f]. Viele der untersuchten Ressourcen stammten aus Ländern mit starker CCS-Industrie, wie z.B. Australien, Großbritannien und den USA. Dies beeinflusst die Objektivität der Angebote, die je nach Geldgeber bzw. Technologieunternehmen als sehr eingeschränkt angesehen werden kann [269, S.24]. Diese Mängel werden auch in einem Paper der Autoren aus dem Jahr 2013 erneut aufgegriffen. Sie plädieren für die Notwendigkeit der Entwicklung qualitativ hochwertiger, objektiver und für Lernende angemessener Materialien, sowie deren Erprobung im schulischen Kontext [270, S.7253-7255].

4.5.2 Eigene Konzeption

Im Rahmen des Dissertationsprojekts wurden verschiedene Materialien zu CCS entwickelt. Eine Übersicht ist Tabelle 31 zu entnehmen.

Tabelle 31. Übersicht der entwickelten Materialien im Verlauf des Dissertationsprojekts

Entwickeltes Material	deutsch	bilingual englisch	Beschreibung	Publikationen
BNE-Unterrichtssequenz <i>Klimawirksamkeit von Kohlenstoffdioxid und Ansätze zur Emissionsreduktion</i>	x		<ul style="list-style-type: none"> Experimentelle Unterrichtseinheit mit sieben Unterrichtmodulen Lernmaterial Arbeitsblätter 	[218,223]
BNE-Schülerlabor <i>Block 3: Carbon Capture and Storage - Wohin mit den Kohlenstoffdioxid - Emissionen?</i>	x		<ul style="list-style-type: none"> Experimentierblock für das Labotheksangebot „Wege aus der Klimakrise“ Lernmaterial: Digitaler Lernbegleiter 	[271]
Bilinguale Schülerlaboreinheit <i>What to do with CO₂?</i>		x	<ul style="list-style-type: none"> Ganztägige Bilinguale Schülerlaboreinheit mit drei Experimentierstationen und vier optionalen Stationen Lernmaterial: digitale Lernbegleiter, Vorbereitungsmodul, Versuchsvideos in deutscher und englischer Sprache 	[272]
SommerUni Kurs <i>Bilingual Chemistry – Experiments with Carbon Dioxide</i>		x	<ul style="list-style-type: none"> 90-minütiger Experimentierkurs Lernmaterial: digitale Lernbegleiter mit Lernlandkarte 	Posterbeitrag für die VCÖ-Tagung in Graz, April 2025
Mitarbeit Materialsammlung <i>Bilingual Chemistry</i>		x	<ul style="list-style-type: none"> Mitarbeit bei Sichtung, Adaption und Neuentwicklung von Materialien für den bilingualen Anfangsunterricht im Fach Chemie Lernmaterial: Arbeitsblätter mit Handreichung für Lehrkräfte 	[181]

Im Folgenden werden nur die bilingual-englischen Materialien beschrieben, die später auch im Schülerlaborangebot Verwendung finden. Die entwickelten deutschen Materialien sind im Anhang 7 einsehbar.

Kriterien zur Konzeption von bilingualen Materialien

Die unzureichende Verfügbarkeit von bilingualen Materialien und die Notwendigkeit der eigenständigen Konzeption wurde bereits in 4.5.1. erörtert. Diese Situation wird auch in der Literatur erwähnt und als große Herausforderung beschrieben, die viel Eigeninitiative der Lehrkräfte bedarf [273, S.224]. Darüber hinaus wird die fehlende Verfügbarkeit von klaren Vorgaben bezüglich der Materialgestaltung als weitere Schwierigkeit beschrieben [120, S.174]. Diese machen einen „DIY [Do it yourself] Approach“ [273, S.224] von Lehrkräften notwendig.

In der Literatur finden sich verschiedene Kriterien zur Gestaltung und Entwicklung von bilingualen Lernmaterialien. Eine Übersicht aus vier ausgewählten Quellen ist in Tabelle 32 dargestellt. Bei detaillierter Analyse können zwischen den Veröffentlichungen einige Gemeinsamkeiten, aber auch viele Unterschiede festgestellt werden. Um einen einheitlichen Kriterienkatalog zu erstellen, wurden ähnliche Konzepte farbleich markiert.

Tabelle 32. Kriterien zur Materialentwicklung in bilingualen Lernsettings¹⁸⁴

Criteria for producing CLIL learning material [274, S.17f]	Factors influencing materials [109, S. 87-93]	Seven principles for CLIL materials design [120, S.176]	8 Deeper Learning Strategies [115, S.167-178]	Eigener Kriterienkatalog Die Materialien...
Criteria 1: make the learning intentions (language, content, learning skills) & process visible to students	Meeting input (text selection/text types, language familiarity and novelty)	Principle 1: The primacy of task (the text-task relationship)	Deepening textual understanding (e.g. concepts, lexis, linguistic elements, text structure, purpose, genre)	Kriterium 1: enthalten eine wohlüberlegte Aufgabengestaltung
Criteria 2: Systematically foster academic language proficiency	Processing input (task design and task types)	Principle 2: Prioritizing the three dimensions of content	Increasing content relevance	Kriterium 2: zeichnen sich durch passende und authentische Textauswahl aus.
Criteria 3: foster learning skills development and learner autonomy	4 Cs-Modell (Content, Cognition, Communication, Culture)	Principle 3: Guiding input and supporting output	Developing cultural consciousness (e.g. analytical tools, transcultural learning)	Kriterium 3: fördern verschiedene Lernwege durch gezieltes Scaffolding
Criteria 4: include self, peer and other types of formative assessment	Support frames/Scaffolding	Principle 4: Scaffolding and embedding	Increasing learner agency and accountability	Kriterium 4: fördern eigenständige Lernprozesse und Skillentwicklung
Criteria 5: help create a safe learning environment		Principle 5: Making key language salient	Differentiating learner pathways	Kriterium 5: integrieren Formen der Selbstevaluation und machen Lernprozesse und -ziele für Lernende sichtbar
Criteria 6: foster cooperative learning		Principle 6: The concept of "difficulty" in didactic materials	Individualising learning pathways	Kriterium 6: stellen Alltags- und Lebensweltbezüge her, die für Lernende relevant sind
Criteria 7: seek ways of incorporating authentic language and authentic language use		Principle 7: thinking in sequences	Providing opportunities for deep practice	Kriterium 7: beziehen eine interkulturelle Perspektive mit ein
Criteria 8: foster critical thinking			Scaffolding Development	Kriterium 8: fördern kritisches Denken

¹⁸⁴ Anmerkungen zu Tabelle Kriterien Materialentwicklung: ähnliche Konzepte sind in der gleichen Farbe markiert, dabei sind nicht alle Aspekte der einzelnen Kategorien immer passgenau, vermitteln aber grundlegend ähnliche Ansätze.

Criteria for producing CLIL learning material [274, S.17f]	Factors influencing materials [109, S. 87-93]	Seven principles for CLIL materials design [120, S.176]	8 Deeper Learning Strategies [115, S.167-178]	Eigener Kriterienkatalog Die Materialien...
Criteria 9: foster cognitive fluency through scaffolding of a) content, b) language, c) learning skills development helping students to reach well beyond what they could do on their own				Kriterium 9: ermöglichen Formen des kooperativen Lernens
Criteria 10: help to make learning meaningful				Kriterium 10: helfen eine sichere Lernumgebung und -atmosphäre zu kreieren
				Kriterium 11: enthalten funktionale Sprachwechsel.

Basierend auf den in Tabelle 32 erwähnten vier Literaturquellen, wurden elf eigene Kriterien für die CLIL-Materialentwicklung formuliert. Viele der Aspekte überschneiden sich inhaltlich und haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es ist ein Versuch, die verschiedenen Impulse aus der Sprachwissenschaft aufzunehmen und für die praktische Materialentwicklung umzusetzen. Dabei wurden thematische Ähnlichkeiten geclustert und eigene Kriterien herausgearbeitet. Keine der Veröffentlichungen ging auf explizite Sprachwechsel ein, weshalb dies als Kriterium 11 ergänzt wurde. Die elf finalen Kriterien sind der letzten rechten Tabellenspalte der Tabelle 32 zu entnehmen und werden mit Bezug auf ihre Anwendung für die Materialien im Schülerlabor im Folgetext ausgeführt.

Kriterium 1: Die Materialien enthalten eine wohlüberlegte Aufgabengestaltung

Neben der Auswahl passender Texte (vgl. Kriterium 2) ist die Grundlage zur Gestaltung von lernreichen Lernumgebungen eine lerngruppengerechte Aufgabengestaltung. Aufgaben für bilinguale Lernsettings sollten motivierend gestaltet sein und kollaboratives Arbeiten ermöglichen [109, 99-100]. Der Einsatz der L2 ergibt sich dann aus den zu erlernenden Fachinhalten, der Gestaltung der Aufgabe und den Fähigkeiten der Lernenden, die sie für die Arbeit an diesen Aufgaben benötigen. Diese drei CLIL-Dimensionen¹⁸⁵, wie sie von Ball, Kelly und Clegg in ihrem Buch *Putting CLIL into Practice* benannt werden, können von den Lehrkräften je nach Lernziel und Lerngruppe passend justiert werden [120, S.36-38].

¹⁸⁵ Three Dimensions of CLIL: (1) *conceptual content* – science content, (2) *procedural choices* – cognitive skills used to work on the concepts, (3) *using specific language* – specific language items associated with the conceptual content [120, S.52f].

Um diese Vorgaben umzusetzen, wurde für das Schülerlaborangebot angelehnt an das aufgabenbasierte Lernen [engl. *task-based learning*]¹⁸⁶ ein komplexerer Task entworfen, der den Versuch unternimmt, die authentische Verwendung der englischen Sprache für eine Aktivität in der Lebenswelt der Lernenden umzusetzen. Zu Beginn des Laborangebots werden die Schülerinnen und Schülern mit der Situation konfrontiert, dass sie Teilnehmende einer internationalen Konferenz *What to do with CO₂?* sind.

Als Forschende haben sie nun die Aufgabe, Expertise für diesen Austausch innerhalb des Schülerlabors zu sammeln und im Anschluss auf Englisch zu realisieren. Der Kontext einer internationalen, wissenschaftlichen Konferenz schafft einen authentischen Sprachanlass für die Verwendung der L2 und bestimmt gleichzeitig die schwerpunktmäßige Verwendung von Bildungs- und Fachsprache innerhalb des etablierten Sprachsettings. Bei der Aufgabenstellung wird neben den zu erarbeiteten Fachinhalten auch das zu produzierende Lernprodukt genannt, welches die Schülerinnen und Schüler im fremdsprachlichen Austausch unterstützen soll [132, S.146-147]. Im Schülerlaborangebot bündeln die Lernenden Informationen aus verschiedenen Quellen (Videos, Informationstexten, Diagrammen, Experimenten) und fassen diese mit Hilfe einer Expert Card zusammen, die einen strukturierten Überblick über das eigene Forschungsfeld ermöglichen soll (vgl. Abbildung 118). Dabei müssen die Lernenden relevante Informationen aus den ihnen zur Verfügung gestellten Materialien entnehmen und in der Expert Card zusammentragen. Diese Expertenkarte fasst die in den Modulen vorgestellte Technologieoption kriterienorientiert zusammen und ermöglicht eine Vorstrukturierung und Verschriftlichung der erarbeiteten Erkenntnisse der Gruppenarbeit. Für Lernende, die Schwierigkeiten mit der Bündelung ihrer Ideen haben, steht am Ende jedes Moduls eine kurze inhaltliche Zusammenfassung zur Verfügung, die gelesen oder angehört werden kann. Außerdem enthält die Expert Card Hinweise, wo die entsprechenden Inhalte innerhalb des E-Books zu finden sind. Die finalen Ergebnisse der Expert Card präsentieren die Lernenden abschließend adressatengerecht den Gruppenmitgliedern der anderen Stationen.

¹⁸⁶ *Task-based language teaching* (TBLT): Ansatz aus dem Fremdsprachenunterricht, bei dem die Anwendung der L2 in authentischen Kommunikationssituationen durch kontextualisierte Aufgaben realisiert wird [113, S.296-297].

EXPERT CARD

CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS)

Methods: Geological storage of CO₂ in coal seams

Mechanism:
How does it work? Complete the flow chart to explain the process in your own words.

CARBON CAPTURE

CARBON TRANSPORT

CARBON STORAGE

Prospects/Possibilities:

Limitations:

Unanswered Questions:

Technology Status

Complete the scale below to determine the development status of your technology.

research

demonstration with pilot plants

commercial application

Potential for the future

Evaluate the future potential of the technology and colour the traffic light with a suitable colour.

Red – low potential

Yellow – limited potential

Green – high potential

Abbildung 118. Expert Card für Station 2 – Carbon Storage

Kriterium 2: Die Materialien zeichnen sich durch passende und authentische Textauswahl aus

Die Auswahl von geeigneten Texten ist die Grundlage für eine erfolgreiche Inhalts- und Sprachvermittlung. Die gewählten Materialien müssen dem sprachlichen Niveau der Lernenden entsprechen, sollen aber auch eine authentische Sprache und sprachliche Strukturen vermitteln [122, S. 227-228]. Dabei sind im Zeitalter der Digitalisierung nicht nur „multimodale analoge Texte“ wie Abbildungen und Tabellen, sondern auch „multiple vernetzte multimodale digitale Texte“ [275, S.4-5] wie z.B. Wikipedia-Einträge und YouTube Videos relevant. Folglich müssen Lernende befähigt werden, sowohl analog und als auch digital zu lesen und mit den verschiedenen Textformaten umzugehen. Im Schülerlaborangebot werden die Lernenden mit einer Vielzahl von Texten konfrontiert (vgl. Tabelle 33).

Tabelle 33. Auswahl einiger analoger und digitaler Texte im Schülerlaborangebot

	Station 1. Carbon Capture	Station 2: Carbon Storage	Station 3: Carbon Utilisation	Optionale Stationen
Multimodale analoge Texte				
Grafische Darstellungsformen (z.B. Tabellen, Diagramme, Schemata)	x	x	x	x
Didaktisierte deutsche Fachtexte	x	x	x	x
Multiple vernetzte multimodale digitale Texte				
Englische Lernvideos der Plattform YouTube	x	x	x	
Audiotexte (z.B. Zusammenfassung, Glossar)	x	x	x	
Interaktive Anwendungen (z.B. Karten, Sprachspiele, Quiz)	x		x	x

Um die kognitive und linguistische Belastung der Lernenden zu reduzieren, können Visualisierungen von Fachinhalten mit Hilfe von grafischen Darstellungsformen wie Mind Maps und Fließdiagrammen für die Materialgestaltung einbezogen werden. Die genannten Aspekte können Lernenden helfen, die Verknüpfungen zwischen den eingeführten Fachinhalten besser zu verstehen und Impulse für die Sprachproduktion bieten [273, S.226-227].

In den Materialien für das Schülerlabor werden grafische Darstellungsformen zur Verdeutlichung von Fachinhalten oder zur Sicherung des Verständnisses verwendet. In Abbildung 119 sind zwei Formate aus dem Arbeitsmaterial dargestellt. Im ersten Beispiel wird ein Schema genutzt, um die in einem Informationstext vermittelten Informationen zum Verfahren der *Post-Combustion Capture* zu visualisieren. Das zweite Beispiel zeigt eine Übersicht der CCS-Prozesskette. Die Lernenden erhalten am Ende der Einheit die Aufgabe, ihre erarbeitete Technologieoption in das Fließschema einzuordnen. Das Fließschema hilft bei der inhaltlichen Orientierung und Verortung der eigenen Arbeitsergebnisse und ermöglicht einen abschließenden Überblick über den gesamten Themenbereich.

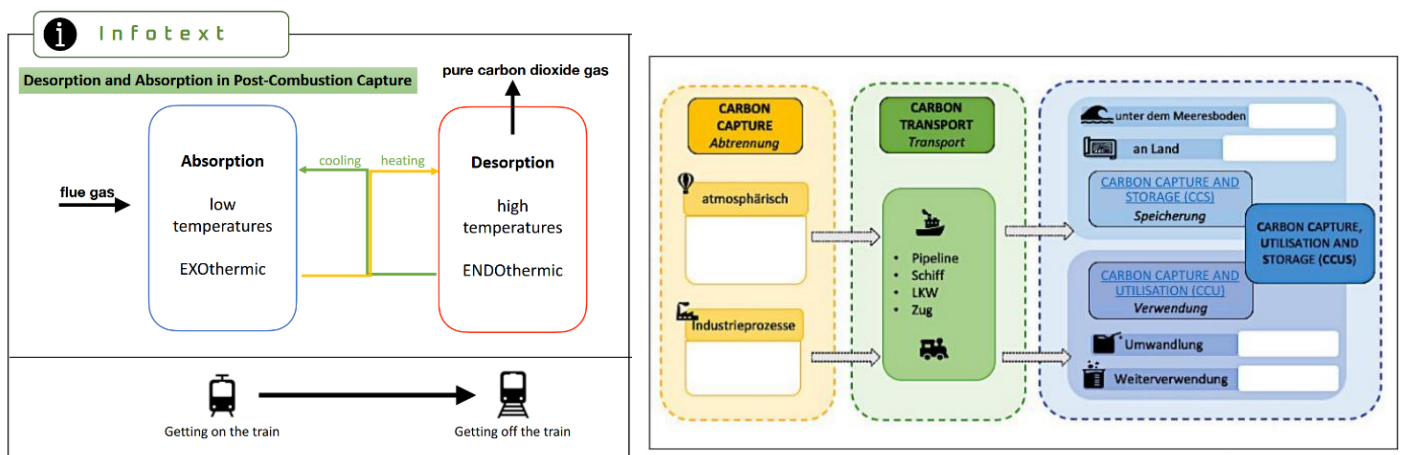


Abbildung 119. Exemplarische grafische Darstellungsformen aus den Lernmaterialien

Neben grafischen Darstellungsformen finden auch analoge Texte in Form von didaktisierten, deutschsprachigen Fachtexten in den Materialien Verwendung. Die Entscheidung für deutschsprachige Fachtexte wurde auf Grund der einfacheren Zugänglichkeit für die Lernenden getroffen, die meist keine bilingualen Vorerfahrungen im Fach Chemie haben (vgl. 3.6). Darüber hinaus ermöglicht die Verwendung von deutschsprachigen Materialien die Anbahnung von geplanten Sprachwechseln. Als Textgrundlage wurden chemische Fachtexte verwendet, die für das Lernendenniveau sprachlich angepasst, im Umfang gekürzt und mit Abbildungen versehen wurden. Dies ist eine Methode, um sprachliche Inhalte zugänglicher für Lernende zu gestalten [274, S.24]. Um Sprachwechsel in die L2 zu initiieren, wurden die deutschen Texte in eine Mediationsaufgabe eingebunden. Dies wird in Kriterium 11 genauer geschildert.

Digitale Textformate werden im Lernangebot hauptsächlich in Form von englischsprachigen Lernvideos, Audiotexten und interaktiven Anwendungen eingesetzt. Durch die Verwendung von englischsprachigen Lernvideos wird der Einsatz von sprachlich authentischen Lernmaterialien ermöglicht. Die optionale Einbettung von Untertiteln kann das Sprachverständnis noch zusätzlich entlasten. Alle Hauptstationen nutzen ein Lernvideo zur Einführung in die technische Umsetzung der vermittelten Emissionsreduktionsstrategie (vgl. Abbildung 120).

Zur Schulung des Hör-/Sehverstehens werden die Videos durch Arbeitsaufträge zum Globalverstehen (*listening for gist*) und Detailverstehen (*listening for detail*) erschlossen [276, S.78-79]. Eine vertiefte inhaltliche Auseinandersetzung erfolgt durch Arbeitsaufträge zum Weiterdenken und Transfer.

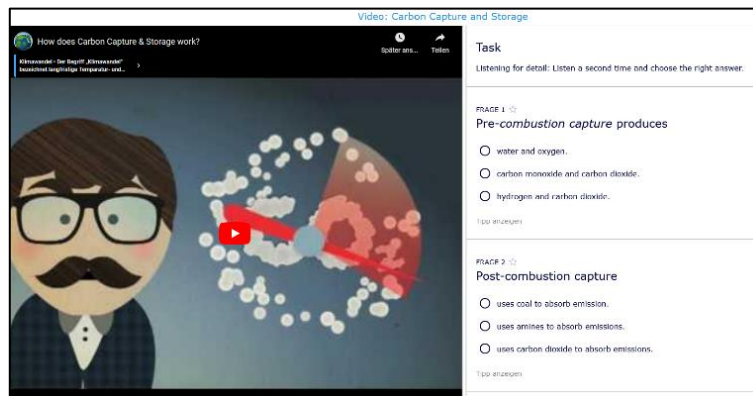


Abbildung 120. Lernvideo aus Station 2 mit Aufgaben zum Detailverstehen

Als weiteres digitales Textformat wurden Audiotexte für den Einsatz im Schülerlabor ausgewählt. Diese ermöglichen zusätzlichen sprachlichen Input, da sich die Lernenden neben Fachinhalten auch über die Aussprache der verwendeten Worte informieren können. Im Schülerlabor wird dies mit Hilfe von Stationszusammenfassungen und einem Glossar [189, S.18-19] realisiert.

Am Ende jeder Station des Lernangebots werden die vermittelten Inhalte in einem Audiotext zusammengefasst (vgl. Abbildung 121). Die Lernenden können den Text lesen oder anhören. Zentrale Fachbegriffe sind zu einem Glossar verlinkt und werden dort erläutert. Jeder Glossareintrag enthält den englischen und deutschen Fachbegriff, sowie eine englischsprachige, vertonte Definition. Alle verwendeten Audiotexte wurden von englischen Muttersprachlerinnen eingesprochen und ermöglichen eine authentische Spracherfahrung in der L2.

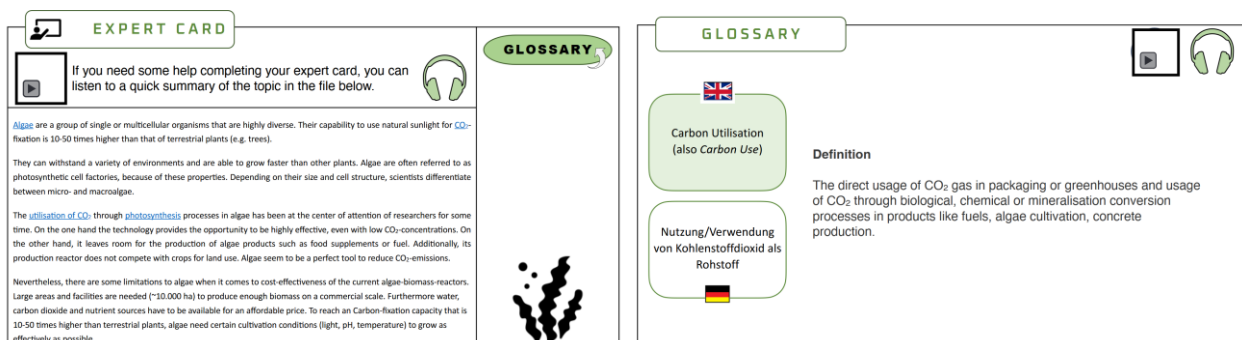


Abbildung 121. Beispiele für Audiotexte: (links) Stationszusammenfassung, (rechts) Glossareintrag

Interaktiven Anwendungen sind Teil der digitalen Texte. Deren Umsetzung wurde mit dem Tool BookWidgets realisiert, welches unter 4.5.3 genauer beschrieben wird.

Kriterium 3: Die Materialien fördern verschiedene Lernwege durch gezieltes Scaffolding

Die Förderung von verschiedenen Lernwegen und die damit einhergehende individuelle Förderung und Forderung von Lernenden kann nur durch gezieltes Scaffolding erreicht werden (vgl. 3.4.1). Da viele Lernende keine Vorerfahrungen mit bilingualen Chemieunterricht haben und im Schülerlabor sehr kurze Interventionen stattfinden, müssen sowohl stärkere als auch schwächere Lernende durch verschiedene Formen der Differenzierung unterstützt werden. Für das Fach Chemie gibt es innerhalb des *Pluriliteracies Approach* (vgl. 3.3) Vorschläge, wie Arbeitsmaterialien für den bilingualen Unterricht gestaltet werden sollen [178]. Grafisch-visuelle Unterstützungen wie der Einsatz von Bildern und beschrifteten Versuchsskizzen sind ebenso möglich, wie der Einsatz von sprachlichen Hilfen bei der Formulierung der Auswertung von Versuchen oder inhaltliche Unterstützungen in Form einer tabellarischen Strukturierung der Versuchsbeobachtungen [277]. Für das Schülerlaborangebot sind ausgewählte Maßnahmen des inhaltlichen, sprachlichen und grafisch-visuellen Scaffolding in Tabelle 34 dargestellt. Bei der Übersicht sei darauf hingewiesen, dass die Grenzen zwischen den Formen des Scaffoldings oft fließend sind, da sprachliches und fachliches Lernen parallel stattfindet.¹⁸⁷

Tabelle 34. Ausgewählte Scaffolding-Maßnahmen des Schülerlabors¹⁸⁸

	Station 1. Carbon Capture	Station 2: Carbon Storage	Station 3: Carbon Utilisation	Optionale Stationen
Inhaltliches Scaffolding				
Einführungstexte, -folien oder Arbeitsaufträge	x	x	x	x
Informationskarten	x	x	x	
(gestufte) Hilfekarten	x	x	x	x
Sprinter Aufgaben (Early finisher, Thinking further)	x	x	x	
Sprachliches Scaffolding				
Annotationen von englischen Begrifflichkeiten am rechten Textrand	x	x	x	
Glossar mit zentralen Fachbegriffen	x	x	x	
Sprachsensible Methodenwerkzeuge nach Leisen [131, S.49] (z.B. Kreuzworträtsel)	x		x	x
Bereitstellung von Fachwortschatz und Redemitteln (z.B. WordBank, Satzanfänge, Formulierungshilfen, Audiodateien)	x	x	x	
Grafisch-visuelles Scaffolding				
Bereitstellung von vorstrukturierten (Beobachtungs-)Tabellen, Schaubildern	x	x	x	x
Illustrierung von fachlichen Sachverhalten durch Abbildungen, Versuchsaapparaturen, Piktogramme, grafische Darstellungsformen	x	x	x	x

¹⁸⁷ In der Literatur wird in diesem Zusammenhang auch zwischen *Output* – und *Input-Scaffolding* unterschieden. *Input-Scaffolding* bezeichnet alle Maßnahmen, die das Textverständnis erleichtern, *Output-Scaffolding* unterstützt die mündliche und schriftliche Textproduktion [278, S.4].

¹⁸⁸ Tabelle Scaffolding-Maßnahmen: orientiert an [278, S.5] und [274, S.24].

Inhaltliches Scaffolding ist auf Grund der geringen Vorkenntnisse der Lernenden zu dem Themenbereich (vgl. 4.2.1) essentiell, um Lerninhalte verständlich zu vermitteln. Deswegen gibt es zu jeder Station Informationskarten (vgl. Abbildung 122 links), die den Lernenden zusätzliche Informationen zu den Technologien der CCS-Prozesskette liefern. Für schwächere Lernende werden Hilfekarten mit Bezügen zum Vorwissen zur Verfügung gestellt, Einführungs- und Abschlusstexte der Einheit fassen Fachinhalte zusammen. Leistungsstärkere Lernende können auf weiterführende Sprinteraufgaben (vgl. Abbildung 122 rechts) zurückgreifen, die anwendungsbezogene Arbeitsaufträge im Anforderungsbereich III enthalten.


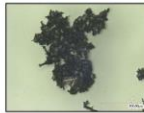
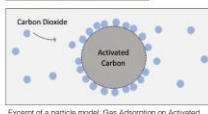

<p>i INFO CARD 1</p>  <p>Activated carbon in a sagger</p>  <p>Activated carbon under the microscope</p>  <p>Excerpt of a particle model: Gas Adsorption on Activated Carbon Surface</p>	<p>Activated Carbon</p> <p>Activated carbon consists of 90% carbon. It has a porous structure, like a sponge. This phenomenon leads to it having a large surface. The surface of one gram activated carbon can be up to 2000 m² large which is about the size of a football field.</p> <p>Activated carbon exists in different forms: powder, pellets or it is applied to fabric. It is mainly used as an adsorbent. Substances like flavourings and dyes can adsorb as liquids and gases on its surface. Through heating activated carbon on can reactivate it, releasing the adsorbed compounds. Activated carbon is used for a variety of application e.g., in water purification, as an air filter or in medicine.</p> <p>porous: porös</p> <p>fabric: Gewebe</p> <p>dyes: Farbstoffe</p> <p>adsorbent: Adsorptionsmittel</p>	<p>?i QUESTIONS ANSWERED</p> <p>EARLY FINISHER</p> <p>In 2010, citizens in Brandenburg and Schleswig-Holstein protested against a CCS Pilot plant in their neighborhood. Name possible reasons they might have had for their concerns.</p>  <p>CCS Pilot Plant [1]</p> <p>concern: Bedenken</p> <p>Pilot plant: Pilotanlage, Demonstrationsanlage</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Abbildung 122. Beispiele für inhaltliches Scaffolding: (links) Informationskarte, (rechts) Sprinteraufgabe

Basierend auf den antizipierten sprachlichen Anforderungen (vgl. 4.2.2) des Schülerlaborangebots, wurden zahlreiche sprachliche Scaffoldingmaßnahmen in die Lernmaterialien integriert. Im Bereich der Wortschatzarbeit wurden Wort- und Übersetzungshilfen (vgl. Abbildung 123) am rechten Textrand [274, S.24] und spielerische Worträtsel [176] in Form von einem Kreuzworträtsel, einem Wortsuchrätsel und einem Taboo-Spiel integriert. Die spielerischen Worträtsel werden unter dem Kriterium 11 zu funktionalen Sprachwechseln genauer erläutert.


Station 2: Carbon Storage	
<p>Model Experiment 1: Geological Storage of Carbon Dioxide in Coal Seams</p> <p>This experiment shows the potential of geologically storing carbon dioxide underground e.g., in coal seams. A coal seam (Kohleflöz) is a dark brown or black banded deposit of coal that is visible within layers of rock.</p>	
<p>MATERIAL</p> <p>Lab Equipment</p> <ul style="list-style-type: none"> 2 gas syringes glass reaction tube sagger 2 pierced rubber stoppers parafilm 1 plastic syringe rubber tubing <p>Chemicals</p> <ul style="list-style-type: none"> carbon dioxide gas, CO₂ (g), in an infusion bag activated carbon, C (s), powder 	<p>[1]</p>  <p>gas syringes: Kolbenprober plunger: Stempel des Kolbenprobers</p> <p>glass reaction tube: Reaktionsrohr</p> <p>sagger: Porzellanschiffchen</p> <p>rubber stoppers: Gummistopfen</p> <p>rubber tubing: Gummischläuche</p> <p>activated carbon: Aktivkohle</p>

Abbildung 123. Beispielseite mit sprachlichen Hilfen am rechten Textrand

Um den Umgang mit den integrierten Fachtexten zu erleichtern, wurden vereinzelte Lesetechniken integriert. Dazu zählen z.B. die Wort- und Inhaltserschließung durch die Verwendung von Abbildungen, Zeichnungen oder Audiodateien sowie die Visualisierung von Leseinhalten durch grafische Darstellungen [279, S.162-163].

Darüber hinaus wurde eine Lesetechnik der Randmarkierungen¹⁸⁹ und des Impuls-Lesens¹⁹⁰ kombiniert, um das aktive Lesen zu unterstützen und eine strukturierte Texterarbeitung zu ermöglichen (vgl. Abbildung 124). Alle Lesetexte enthalten außerdem zur besseren Orientierung strukturierte Sinnabschnitte und Zeilennummern.

Mediation Task:
 Sustainability of the
 Direct Air Capture Technology

(...) I knew this already.
 | This is an important message/fact in the text.
 ?? I do not understand this aspect.
 ? I would like to ask a question about that.

Informationstext Direct Air Capture

10	Allerdings berücksichtigt diese Übersichtsrechnung nicht, dass zusätzliche Fläche und Infrastruktur für die Bereitstellung der elektrischen und thermischen Energie sowie von Wasser und für den Abtransport des gebundenen Kohlenstoffdioxids benötigt werden.	
15	DAC ist eine kommerzielle Emissionsreduktionstechnologie. Das Schweizer Unternehmen „Climeworks“ beansprucht für sich, in Zürich die „erste kommerzielle Anlage zur Abtrennung von CO ₂ aus der Luft“ gebaut zu haben (siehe Abb.2). Diese 23 Millionen US-Dollar teure Anlage liefert jährlich 900 Tonnen CO ₂ an ein nahegelegenes Treibhaus, um den Gemüseanbau zu unterstützen. Man hat sich mit der isländischen Firma „Reykjavik Energy“ zusammengeschlossen, um nach eigenen Angaben, eine Luftaufbereitungsanlage mit einer Kapazität von 4.000 Tonnen CO ₂ pro Jahr zu betreiben und CO ₂ in Basaltformationen zu injizieren. „Reykjavik Energy“, insbesondere die dazu gehörige Geothermieanlage in Hellisheidi, stand im Mittelpunkt großer Umweltproteste in Island, da in einer der letzten verbleibenden Wildnisregionen Europas schwerste Schäden durch geänderte Flächennutzung verursacht wurden.	
20		
25	Abb. 2: Climeworks Filteranlage in der Schweiz [6]	

Abbildung 124. Beispielseite mit Fachtext und Lesetechniken

Neben dem Verständnis von Fachvokabular und Fachtexten, müssen die Lernenden auch bei der schriftlichen Textproduktion unterstützt werden. Sprachliche Unterstützungen in Form von Word Banks [281, S.12] und Formulierungshilfen sind in Abbildung 125 dargestellt. Sie erleichtern das Formulieren von fachlichen Beobachtungen und Auswertungen und helfen dabei, ein schriftliches Lernprodukt in der englischen Sprache zu verfassen. Die Lernenden können bei Bedarf darauf zurückgreifen.

OBSERVATION

Fill in the table.

BEFORE	DURING	AFTER THE EXPERIMENT
Bottle 1 with air		
Bottle 2 with carbon dioxide	Touch the bottle. Can you observe something else?	

WORD BANK

- a substance is colourless/has a ... colour
- (to) contract: zusammenziehen
- (to) expand: ausdehnen
- the bottles cool down/heat up/ remain unchanged

CONCLUSION

2. Determine which of the solvents is better suited for the absorption of carbon dioxide. Explain your choice in detail.

The experiment showed/revealed that ...

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

The results imply that the solvents best suited for the absorption is ...

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

measured values: Messwerte
 amount of: Anteile von ...

Abbildung 125. Beispiele zur Unterstützung der schriftlichen Textproduktion: (links) Einsatz einer WordBank, (rechts) Einsatz von Formulierungshilfen

Im Rahmen des Laborangebots werden die Schülerinnen und Schüler außerdem aufgefordert, ihre Ergebnisse vorzustellen. Dies erfolgt unter Verwendung von grafisch-visuellen Hilfs- und Redemitteln [279, S.164-166].

¹⁸⁹ **Methode Randmarkierungen:** während des Leseprozesses markieren Lernende den Lesetext mit vorgegebenen Symbolen [280, S.77].

¹⁹⁰ **Methode Impuls-Lesen:** während des Leseprozesses nehmen Lernende Markierungen im Lesetext vor, die bestimmte Reaktionen auf den Text wiedergeben [280, S.76].

Zur Unterstützung des zusammenhängenden Sprechens in der Muttersprache werden sowohl inhaltliche als auch sprachliche Scaffolds zur Verfügung gestellt (vgl. Abbildung 126). Solche Hilfestellungen sind für einige Lernende notwendig, da die Erarbeitung der Fachinhalte an den Stationen primär in der englischen Sprache erfolgt. Am Ende des Labortages werden die Lernenden abschließend gebeten, ihre Kenntnisse auf Deutsch zu diskutieren.

Task: During the conference you also meet colleagues from Germany. You would like to discuss your findings with them as well. Your task is it to present your expert card to your German colleagues in German. Tell them how your topic might help to reduce carbon dioxide emissions.

Aufgabe:
a) Stellen Sie sich gegenseitig Ihre Expert Cards vor.

Redemittel für die Präsentation in der Gruppe:

Meine Emissionsreduktionstechnologie heißt...

Dabei wird.../Die Technologie funktioniert, indem...

Die Vorteile/Nachteile sind...

Unklar ist noch/Offene Fragen bleiben noch bezüglich...

Die Technologie befindet sich... im Forschungsstadium | in der Entwicklung mit Pilotprojekten | in der kommerziellen Anwendung.

Das Potential der Technologie für die Zukunft ist meiner Meinung nach... hoch | begrenzt | niedrig.

Hier finden Sie NÜTZLICHE FACHINHALTE

Nützliche Fachinhalte:

Block 1: Carbon Capture
Abtrennung von Kohlenstoffdioxid

- Absorption mit Lösungsmitteln wie Natriumhydroxid-Lösung NaOH(aq)
- Abtrennung aus der Luft
- Abtrennung aus Industrieabgasen
- Umweltfolgen
- Energiebedarf

Block 2: Carbon Storage
Speicherung von Kohlenstoffdioxid

- Adsorption in Kohleflözen
- Andere Speicherstätten: saline Aquifere, erschöpfte Erdöl- und Erdgaslagerstätten
- Gefahr von Leckagen
- Kosten
- Emissionsreduktionspotential

Station 3: Carbon Utilisation
Nutzung bzw. Wertschöpfungskette von Kohlenstoffdioxid

- Kultivierung von Mikroalgen
- Photosynthese
- Vielseitige Produkte
- Umweltfolgen
- Entwicklungsstand
- Kosten

Abbildung 126. Beispiele zur Unterstützung der Kompetenz des zusammenhängenden Sprechens: (links) mit Redemitteln, (rechts) mit Fachinhalten für die Präsentation

In allen Materialien werden neben inhaltlichen und sprachlichen Scaffolds auch grafisch-visuelle Unterstützungsmaßnahmen integriert, um die vermittelten Fachinhalte visuell zu strukturieren oder zu illustrieren. In Abbildung 127 sind zwei Beispiele für solche Umsetzungen dargestellt.

OBSERVATION

Fill in the table.

Solvent	Sodium hydroxide solution NaOH(aq)	Sodium carbonate solution Na ₂ CO ₃ (aq)
Test	Volume in right gas syringe in [mL]	Volume in right gas syringe in [mL]
A Pure CO ₂		
B Ambient air		

RETURN TO TEST A - STEP 6

RETURN TO TEST B - STEP 3

Background Information: Photosynthesis

Task: Listen and read along.

Photosynthesis

The process of photosynthesis is one of the most important biosynthetic processes in nature and in the carbon cycle on our planet. Organisms, particularly green plants that contain chlorophyll, can use sunlight to produce nutrients (sugars e.g., glucose) from carbon dioxide and water. The reverse reaction of photosynthesis is called respiration.

Photosynthesis and its reverse reaction respiration react in the following simplified equation:

$$6 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 6 \text{CO}_2(\text{g}) \xrightarrow{\text{Photosynthesis with Solar energy}} \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6(\text{g}) + 6 \text{O}_2(\text{g})$$

...water and carbon dioxide

...nutrients (sugars) and oxygen...

...living organisms produce...

Respiration: Energy is released

Abbildung 127. Beispiele für grafisch-visuelles Scaffolding: (links) mit vorstrukturierter Beobachtungstabelle, (rechts) mit grafischen Darstellungsformen zur Illustration von Fachinhalten

Kriterium 4: Die Materialien fördern eigenständige Lernprozesse und Skillentwicklung

Die Förderung der Beteiligung aller Lernenden und die Realisierung von eigenständigen Lernprozessen konnte im Schülerlaborangebot durch die Arbeit in Kleingruppen und die Einbindung von Schülerexperimenten realisiert werden. Die Durchführung von Experimenten fördert die Handlungsorientierung und den Prozess der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung. Als Kernstück einer jeden Station wurde deshalb ein Modellexperiment (vgl. 4.4.2) implementiert, welches den Schülerinnen und Schülern die grundlegende Funktionsweise ihres Teils der Prozesskette modelliert. Im Sinne der Handlungsorientierung führen die Lernenden diese Versuche selbstständig, mit Hilfe von strukturierten Experimentieranleitungen durch.

Die Auswertung des jeweiligen Versuches erfolgt inhaltlich angeleitet durch vorformulierte Auswertungsfragen, die mit Hilfekarten und Infotexten als Scaffolding (vgl. Kriterium 3) angereichert sind. Um die Lernenden beim Experimentieren zu unterstützen, sind neben der schriftlichen Versuchsdurchführung auch bebilderte Versuchsschritte integriert (siehe Abbildung 128). Darüber hinaus enthalten viele der Arbeitsaufträge Sprinter-Aufgaben mit integrierten Lösungsvorschlägen für leistungsstärkere Lernende. Unabhängig von ihrem Leistungsniveau sind somit alle Schülerinnen und Schüler in der Lage, ihren Lernprozess nach ihren eigenen Bedürfnissen zu gestalten. Der kommunikative Austausch in der Kleingruppe ermöglicht den Lernenden mündliche Interaktion und ebnet den Weg für das spätere gemeinsame Aushandeln von Entscheidungs- und Handlungsoptionen und deren Begründung.

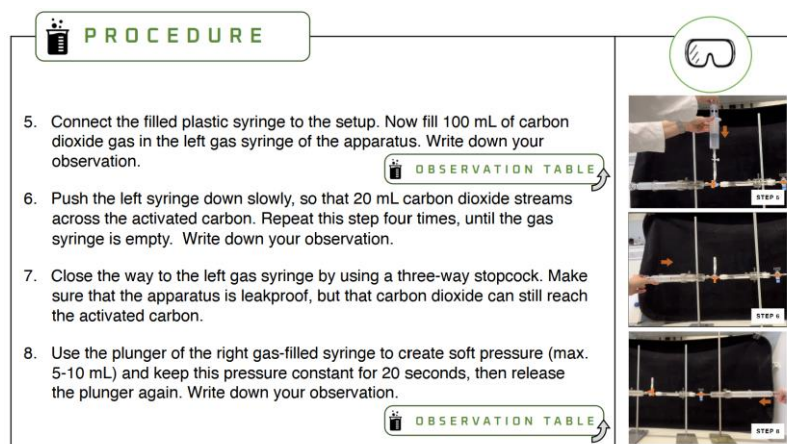


Abbildung 128. Beispiel für eine bebilderte Versuchsanleitung

Kriterium 5: Die Materialien integrieren Formen der Selbstevaluation und machen Lernprozesse und -ziele für Lernende sichtbar

Da im Schülerlabor Kohorten mit unterschiedlichem Vorwissen erwartbar sind, wurde ein optionales Vorbereitungsmodul (vgl. 4.2.3) mit einer Aufgabe zur Selbstevaluation für die teilnehmenden Lernenden entwickelt. In einem Teil des Moduls befragen sich die Schülerinnen und Schüler gegenseitig zu ihrem fachlichen Vorwissen mit Hilfe eines Tandembogens. Jede Aufgabe ist einem bestimmten Themenbereich des Regelunterrichts zugeordnet. Am Ende der Partneraufgabe sollen die Lernenden ihren Lernprozess einschätzen, indem sie ihre Kenntnisse zu den einzelnen Themenbereichen evaluieren (vgl. Abbildung 129 links). Auf einer Zielscheibe vermerken sie, ob sie zu den Inhalten „viele Unklarheiten“, „kleinere Fragen“ oder „alles verstanden“ haben. Diese Form der Selbstevaluation ermöglicht es den Lernenden und der betreuenden Lehrperson, mögliche Lücken im Vorwissen zu identifizieren und gegebenenfalls vor dem Besuch des Schülerlabors aufzuarbeiten.

Während der arbeitsteiligen Gruppenarbeit im Schülerlabor, wird der Lernprozess durch einen *Research Plan* strukturiert und begleitet (vgl. Abbildung 129 rechts). Der *Research Plan* wurde als Visualisierungs- und Strukturierungshilfe der Lerninhalte im Laborangebot etabliert.

Er fungiert als eine Art Gliederung des Lernangebots und liefert einen Überblick über die zu bearbeitenden Aufgabenstellungen und Materialien. Nach Fertigstellung einer Aufgabeneinheit werden diese im *Research Plan* abgehakt und ermöglichen so eine Übersicht über den Fortschritt des Bearbeitungsprozesses.

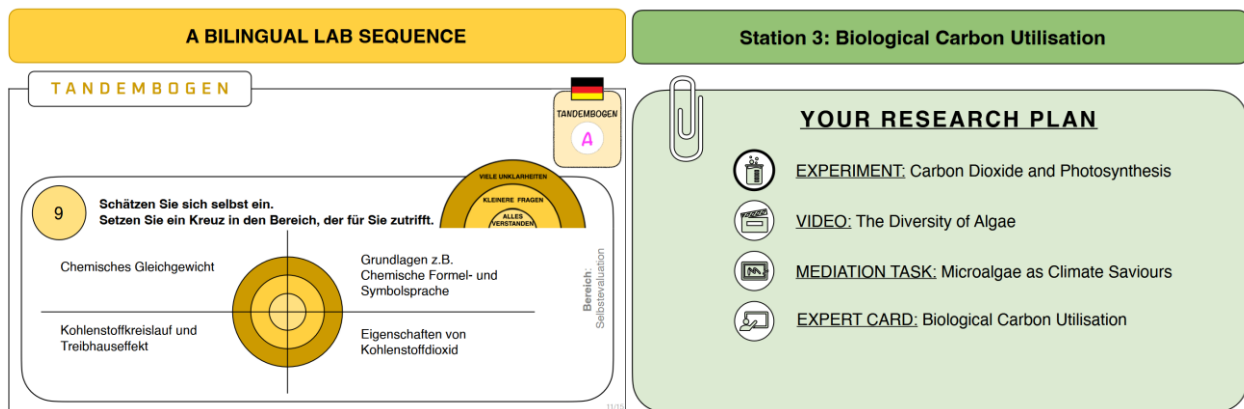


Abbildung 129. (links) Selbsteinschätzung Vorbereitungsmodul, (rechts) Research Plan für Station 3

Kriterium 6: Die Materialien stellen Alltags- und Lebensweltbezüge her, die für Lernende relevant sind

Carbon Capture and Storage ist eine aktuelle Thematik aus dem naturwissenschaftlichen und politischen Diskurs (vgl. 4.3.2). Sie hat einen Einfluss auf den Alltag und die Lebenswelt der Lernenden. Diese Bezüge werden zum einen durch den thematischen Einstieg und der darin enthaltenen Problematisierung zu steigenden Kohlenstoffdioxid-Emissionen und der Frage nach deren Reduktion hergestellt. Zum anderen wird die Leitfrage *What to do with CO₂?* am Ende der Intervention erneut aufgegriffen. Die Lernenden werden gebeten, begründet ein Vortragsthema aus den erarbeiteten Technologien für einen BNE-Zukunftstag an ihrer Schule auszuwählen (vgl. Abbildung 130). Die Schülerinnen und Schüler sollen mit Hilfe ihrer erworbenen Kenntnisse aus dem Schülerlabor eine Technologieoption wählen, die ihrer Meinung nach als zukunftssträftig angesehen werden kann. Der Handlungsrahmen eines BNE-Zukunftstages an der eigenen Schule, reduziert die Hemmnisse bei der Entscheidungsfindung und ermöglicht eine Übertragbarkeit der Inhalte auf die eigene Lebensrealität. Daran anschließend werden die Lernenden gebeten, konkrete Handlungsoptionen zur Leitfrage zu formulieren (vgl. Kriterium 8), was einen weiteren Bezug zum Alltag der Schülerinnen und Schüler ermöglicht.

c) Wählen Sie eine der Technologien als Vortragsthema für einen BNE-Zukunftstag an Ihrer Schule aus. Tragen Sie Ihre Wahl in das Poster rechts ein und begründen Sie.

Abbildung 130. Aufgabenstellung mit Alltagsbezug am Ende der Intervention

Kriterium 7: Die Materialien beziehen eine interkulturelle Perspektive mit ein

Bei diesem Kriterium orientiert sich das Schülerlaborangebot an dem Verständnis von interkulturellem Lernen im bilingualen Chemieunterricht nach Bohrmann-Linde [126, S.184], bei dem die Verzahnung von Sprache und Fach im Vordergrund steht und die Lernenden die „fremde“ Wissenschaft Chemie als Kultur kennenlernen. Vor diesem Hintergrund wird im Schülerlaborangebot versucht, authentische Materialien zu verwenden, die diesem Anspruch gerecht werden. Die Lernenden erleben Sprachbewusstheit durch die Vermittlung von L1 und L2 mit Hilfe von geplanten Sprachwechseln (vgl. Kriterium 11) und können Arbeitsweisen der Chemie durch eigens durchgeführte Schülerexperimente (vgl. 4.4.2) erproben. Durch die Vertonung von Texten und Begriffsdefinitionen durch Muttersprachler kann eine authentische Sprachverwendung in der L2 abgebildet und durch die Verwendung von authentische Textgrundlagen gestärkt werden.

Kriterium 8: Die Materialien fördern kritisches Denken

Die Förderung von *higher-order thinking skills* (vgl. 3.4.1) wie z.B. dem Anwenden, Analysieren, Bewerten und Evaluieren von Informationen und Wissen [122, S.155-165] ist zentraler Bestandteil des kritischen Denkens. Im Schülerlaborangebot werden die Lerngelegenheiten zum kritischen Denken mit Hilfe der Bewertungskompetenz im Sinne einer BNE (vgl. 4.1.4) realisiert. Die Lernenden erhalten Materialien, in denen die Fachinhalte mit Bezug auf die politische, ökonomische und ökologische Dimension didaktisch aufbereitet sind. Durch diese Material- und Aufgabenvielfalt soll eine mehrdimensionale Betrachtung des Themas ermöglicht werden. Die angesprochenen Dimensionen sind in den Materialien farblich am rechten oberen Rand kodiert (vgl. Abbildung 131).

Science
Biology

Station 2: Carbon Storage

CONCLUSION

3. Evaluate the potential of geological carbon storage in coal seams with the help of your experimental data and the Info Cards on the right.

An advantage of geological carbon storage in coal seams is that...

A disadvantage of this form of storage is that...

Other storage options are...

INFO CARD 2

INFO CARD 3

Abbildung 131. Arbeitsmaterial mit Kodierung zur ökologischen und ökonomischen Dimension

Die gewonnenen Erkenntnisse werden abschließend in einer „Expert Card“ zusammengefasst. Darüber hinaus werden die Schülerinnen und Schüler gebeten, das Entwicklungsstadium und das Zukunftspotential ihrer Technologieoption einzuschätzen. Daran schließt sich eine Präsentation der Ergebnisse unter den Forschenden an. Abschließend sollen die Lernenden für die drei etablierten Dimensionen (ökologisch, ökonomisch, politisch) Handlungsoptionen für die Leitfrage *What to do with CO₂?/Wohin mit den CO₂-Emissionen* formulieren und diese mit Hilfe ihres erworbenen Wissens begründen (vgl. Abbildung 132).

d) Formulieren Sie politische, ökologische und ökonomische Handlungsoptionen zur Leitfrage „What to do with CO₂?/ Wohin mit den CO₂-Emissionen?“.

Ökonomie

Die Wirtschaft könnte...

Beispiel: Die Wirtschaft könnte Carbon Capture and Storage für Industrien mit hoher vermeidbaren Emissionen einsetzen. Dies wäre eine Möglichkeit, um z.B. in der Stahl- und Zementproduktion CO₂-Emissionen zu reduzieren.

Politik

Die Politik könnte...

Ökologie

Im Bereich Umwelt könnte man...

WEITERGEDACHT

Abbildung 132. Arbeitsauftrag zur Formulierung der Handlungsoptionen

Kriterium 9: Die Materialien ermöglichen Formen des kooperativen Lernens

Im Schülerangebot wird versucht, zahlreiche Formen des kooperativen Lernens zu ermöglichen. Den Hauptteil des Angebots bildet die arbeitsteilige Gruppenarbeit im Labor und der anschließende Austausch der Gruppen. Nur zu Beginn des Lernangebots werden die Lernprozesse durch eine Lehrperson initiiert und zum Ende hin zusammengeführt. Die Erarbeitung der Lerninhalte mit Hilfe des digitalen Lernbegleiters erfolgt eigenverantwortlich durch die Lernenden.

Kriterium 10: Die Materialien helfen eine sichere Lernumgebung und -atmosphäre zu kreieren

Eine umfassend sichere Lernatmosphäre zu schaffen ist in einer so kurzzeitigen Intervention schwer umsetzbar. Dennoch ist die zentrale Zielsetzung des Laborangebots, durch den Einsatz von Betreuenden an den Stationen und den zahlreichen Hilfesystemen, eine angenehme Lernatmosphäre zu schaffen. Darüber hinaus hat die Sicherheit der an dem Angebot beteiligten Personen oberste Priorität. Die Lernenden erhalten eine Sicherheitsunterweisung und sind im Labor verpflichtet eine Schutzbrille zu tragen. Alle in den Experimenten verwendeten Chemikalien sind mit englisch- und deutschsprachigen Fachbegriffen etikettiert und wenn nötig mit Gefährdungssymbolen versehen. Jeder Versuch ist mit einer Gefährdungsbeurteilung dokumentiert (siehe Anhang 2) und die Betreuenden erhalten vor Beginn der Intervention ein Training zum Laborangebot, um eine möglichst sichere Lernumgebung für alle besuchenden Gruppen zu realisieren.

Kriterium 11: Die Materialien enthalten funktionale Sprachwechsel

Um die sachfachliche Diskurskompetenz in zwei Sprachen umzusetzen, wurden im gesamten Schülerlaborangebot funktionale Sprachwechsel etabliert (siehe Tabelle 35). Diese Sprachwechsel haben unterschiedliche Funktionen. Die Mehrheit dient dem Erwerb von Fachbegriffen und Fachkonzepten in beiden Sprachen. Manchmal wird ein Sprachwechsel eingesetzt, um das Verständnis der Fachinhalte sicherzustellen und mögliche inhaltliche Herausforderungen zu überwinden.

Tabelle 35. Übersicht der funktionalen Sprachwechsel im Schülerlaborangebot

Phase	verwendete Sprache(n)	Inhalte und Materialien	Geplante, funktionale Sprachwechsel nach [140, S.91f]
Vorbereitungsmodul	deutsch	Tandembogen	<i>Zeitökonomische Funktion:</i> Unterrichtsorganisation (Vorentlastung des externen Lernorts, Wiederholung)
	englisch	Focus on Language I+II	<i>Kommunikative Funktion:</i> Erwerb (Wiederholung) von Fachbegriffen in zwei Sprachen
Einstieg	deutsch	Einführung in die Lernumgebung	<i>Zeitökonomische Funktion:</i> Unterrichtsorganisation (Ankommen im Lernort, Einführung, Sicherheitsbelehrung)
	englisch	Themeneinstieg	<i>Affektive Funktion:</i> ermöglichen emotionalen Zugang zu einem Thema
Station 1 Carbon Capture	deutsch → englisch	Mediation Task: Sustainability of the Direct Air Capture Technology	<i>Kognitive Funktion:</i> Erwerb von Fachkonzepten, Überwindung von inhaltlichen Herausforderungen <i>Kommunikative Funktion:</i> Erwerb von Fachbegriffen in zwei Sprachen, zur Verständnissicherung
Station 2 Carbon Capture and Storage	deutsch → englisch	Mediation Task: Experiment Lime Water Test	<i>Kognitive Funktion:</i> Erwerb von Fachkonzepten, Überwindung von inhaltlichen Herausforderungen <i>Kommunikative Funktion:</i> Erwerb (Wiederholung) von Fachbegriffen in zwei Sprachen

Phase	verwendete Sprache(n)	Inhalte und Materialien	Geplante, funktionale Sprachwechsel nach [140, S.91f]
Station 3 Biological Carbon Utilisation	deutsch → englisch	Mediation Task: Microalgae as Climate Saviours	<i>Kognitive Funktion:</i> Erwerb von Fachkonzepten, Überwindung von inhaltlichen Herausforderungen <i>Kommunikative Funktion:</i> Erwerb von Fachbegriffen in zwei Sprachen, zur Verständnissicherung
Optional 3: Taboo Game	deutsch und englisch	Taboo Cards mit deutschen und englischen Begriffen	<i>Kommunikative Funktion:</i> Erwerb (Wiederholung) von Fachbegriffen in zwei Sprachen
Präsentation und Abschlussdiskussion	deutsch	Vervollständigen einer Grafik, Präsentation der Ergebnisse, Formulierung von Handlungsoptionen	<i>Kognitive Funktion:</i> Überwindung von inhaltlichen Herausforderungen <i>Kommunikative Funktion:</i> Überwindung fremdsprachlicher Herausforderungen zur Verständnissicherung

Bei den ausgewählten Aufgabenformaten wurde darauf geachtet, auf bekannte Methoden des Fremdsprachenunterrichts und sprachsensiblen Fachunterrichts zurückzugreifen.

Den Lernenden sollte so ein einfacherer Einstieg in das Lernangebot ermöglicht werden, indem sie mit Methoden und Aufgabenformaten konfrontiert werden, die sie bereits aus ihrem Unterrichtsalltag kennen können. Ein zentraler Baustein war dabei die Integration von Mediationsaufgaben: ein Aufgabenformat, das auch im Zentralabitur in NRW für das Fach Englisch gefordert wird und den Lernenden seit der Sekundarstufe I aus dem Englischunterricht bekannt sein sollte. In den Stationen 1-3 ist jeweils eine Mediationsaufgabe integriert. Als Richtung des Sprachwechsels wurde sich gezielt für die klassische Form einer deutschen Fachtextvorlage entschieden, die kriterienorientiert in die englische Sprache übertragen werden muss. Ein Auszug eines solchen deutschen Fachtextes ist in Abbildung 133 dargestellt. Für das bilinguale Angebot wurden zusätzliche sprachliche Hilfestellungen für englische Fachbegriffe am Rand des Textes etabliert, sowie inhaltliche Hilfen bereitgestellt, um die Übertragung von der deutschen in die englische Sprache zu erleichtern. Zusätzlich sind Abbildungen in den Texten integriert, um die Fachinhalte besser zu visualisieren. Als Leseaufträge erhalten die Lernenden Aufgabenstellungen, die sie durch gezieltes *Scanning*¹⁹¹ der Textvorlage beantworten können. Anschließend werden sie gebeten, die deutschen Fachinhalte in die englische Sprache zu übertragen. Dazu stehen ihnen vorstrukturierte Tabellen zur einfacheren Zuordnung der Inhalte und Übersetzungshilfen von zentralen Fachbegriffen zur einfacheren Mediation zwischen den Sprachen zur Verfügung (vgl. Abbildung 133 rechts).

¹⁹¹ **scanning** (selektives Lesen): ein Text wird gezielt nach bestimmten Informationen durchsucht [279, S.159-160].

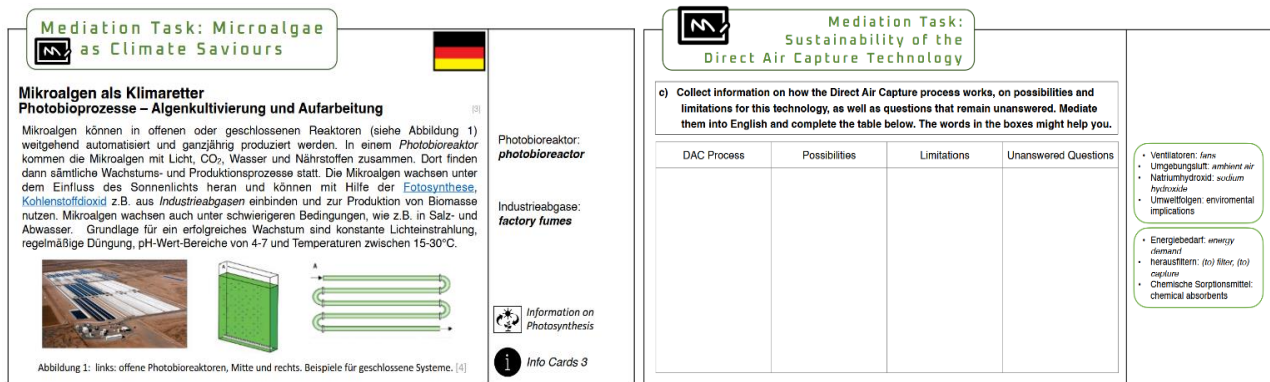


Abbildung 133. (links) Auszug aus Mediationstext, (rechts) Aufgabenstellung für Mediationsaufgabe

Zur Unterstützung der Wortschatzarbeit werden spielerische Worträtsel im Schülerlabor eingesetzt. Der Sprachwechsel erfolgt innerhalb des Rätsels. So wird beispielsweise ein Wortsuchrätsel eingesetzt, indem die Lernenden das deutsche Äquivalent zu einem englischen Fachbegriff finden müssen (Abbildung 134 links). In einer optionalen Stationen erhalten die Schülerinnen und Schüler Spielkarten für ein Taboo Spiel [174, S.34]. Deutsche Begriffe sind auf roten Karten, englische Begriffe auf blauen Karten abgebildet. Im Gegensatz zu einem traditionellen Taboo-Spiel, können die Lernenden die englischen Begriffe mit Hilfe der vorgegebenen Begriffe auf der Karte erklären. Die deutschen Wörter müssen erläutert werden, ohne die vorgegebenen Begriffe auf der Karte zu verwenden. Diese Abwandlung ermöglicht die Festigung von Fachbegriffen in beiden Sprachen.

Dabei nutzen die Lernenden im Englischen bewusst die vorgegebenen Fachbegriffe, die ihnen als Hilfestellung dienen können. Bei der Erläuterung der deutschen Fachbegriffe müssen die Lernenden zu Erläuterung auf alltags- und bildungssprachliche Formulierungen zurückgreifen.

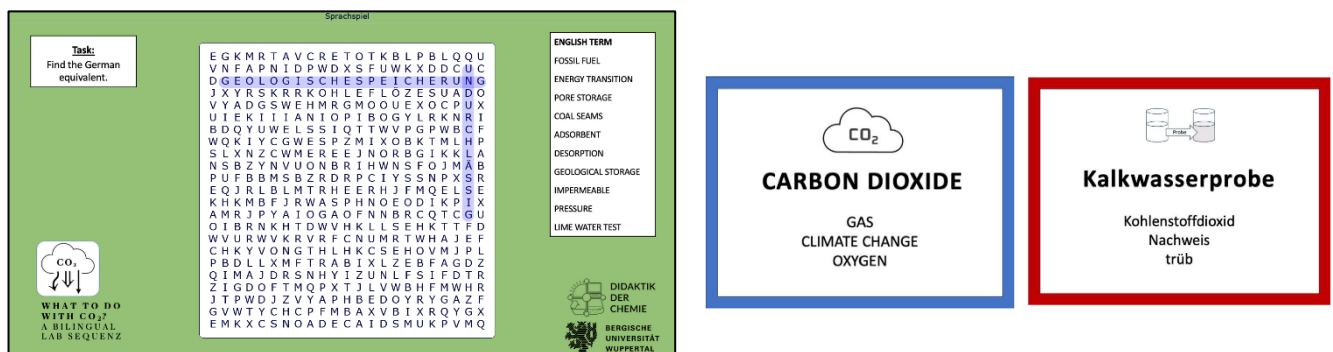


Abbildung 134. spielerische Worträtsel: (links) Wordsearch, (rechts) exemplarische Taboo-Spielkarten

Zum Abschluss des Lernangebots wird angelehnt an die Methode der *Bilingual Poster Production* nach Heimes (vgl. 3.4.2) die erarbeitete englischsprachige Expert Card auf Deutsch präsentiert. Diese methodische Ausgestaltung ermöglicht eine schwerpunktmäßige Erarbeitung der Lerninhalte in der englischen Sprache und eine Verständnissicherung in der deutschen Sprache, da die Aspekte übertragen und erläutert werden müssen. Überdies schließt sich daran die Phase der kritischen Bewertung an (vgl. Kriterium 8), weshalb der Sprachwechsel inhaltliche Herausforderungen aufzeigen kann, die vor dem Beginn der Bewertungsphase thematisiert werden können.

4.5.3 Entwicklung eines digitalen E-Books

In den Erprobungen der ersten und zweiten Iterationsschleife (vgl. 5.2 und 5.3) wurde deutlich, dass die Lernumgebung für die Lernenden einfacher und intuitiver zu bearbeiten wäre, wenn alle Materialien und Medien ohne Medienbruch verfügbar wären. Außerdem zeigte sich, dass bestimmte Methoden wie z.B. der Tandembogen oder Aufgabenformate mit Korrekturoptionen, einfacher und weniger materialintensiv in einem digitalen Format umgesetzt werden könnten. Ab Juni 2023 wurde das Projekt vom Fonds der chemischen Industrie im Rahmen der Mentoring Förderung unterstützt. Daraufhin erfolgte eine Überführung der konzipierten analogen Materialien in ein digitales Format durch eine wissenschaftliche Hilfskraft. In den Jahren 2023-2024 entstanden Lernbegleiter für zwei verschiedene Lernsettings. Zum einen ein E-Book für den Experimentierkurs der *SommerUni* und E-Books für das Schülerlaborangebot *What to do with CO₂?*. In der Literatur wird in diesem Zusammenhang in manchen Publikationen der Begriff des Multitouch Learning Book[s] (MLB) [282, S.9] eingeführt, welches die Lernenden während ihres Lernprozesses begleitet und interaktive Inhalte enthält. Die folgenden Beschreibungen beziehen sich auf das entwickelte E-Book für das Schülerlaborangebot *What to do with CO₂?*.

Zielsetzung und Vorteile der digitalen Lernumgebung

Das Ziel des Einsatzes eines digitalen E-Books war die Förderung des selbstständigen Arbeitens der Lernenden, die Möglichkeit der Integration von Differenzierungsangeboten (vgl. 4.5.2) und der damit einhergehenden Gestaltung von individuellen Lernwegen für Schülerinnen und Schüler [282, S.7].

Das E-Book sollte die Lernenden bei ihrem Lernprozess begleiten, als Werkzeug beim Experimentieren unterstützen und die Lerninhalte durch verschiedene Medienangebote und interaktive Aufgabenformate anreichern [282, S.8]. Das E-Book bot das Potential, Audio- und Videodateien, ein Glossar und Aufgaben zur Selbstkorrektur zu integrieren. Darüber hinaus eröffnete sich die Möglichkeit, zusätzliche Inhalte der optionalen Stationen einzufügen und diese bei Bedarf abzurufen.

Durch die Bündelung aller Inhalte und der individuellen Gestaltbarkeit der Lernwege, bestand zudem die Möglichkeit, das Ablenkungspotential für die Schülerinnen und Schüler zu minimieren [282, S.9]. Darüber hinaus ermöglichte die Gestaltung eines E-Books als Lernbegleiter, einen Überblick über die vermittelten Inhalte und die Lernsituation zu erhalten.

Angebahnte Medienkompetenzen

Neben den unter 4.3.1 intendierten Kompetenzen, können durch die Verwendung eines digitalen E-Books weitere Kompetenzen der Lernenden geschult werden. Diese medienbezogenen Kompetenzen sind in Nordrhein-Westfalen im Medienkompetenzrahmen festgehalten [283].

Im Schülerlaborangebot werden die digitalen E-Books auf Tablets mit Stift bereitgestellt. Innerhalb der Kompetenz „Bedienen und Anwenden“ sollen die Lernenden im verantwortungsvollen Umgang mit Hardware, sowie der Kenntnis und dem Einsatz von digitalen Werkzeugen geschult werden.

Innerhalb des Labortages können die Schülerinnen und Schüler digitale Werkzeuge in Form von verschiedenen Apps (Safari-Browser, BookWidgets, digitale Wörterbücher) und vereinzelt digitale Messtechnik verwenden.

Darüber hinaus werden die Lernenden aufgefordert, relevante Informationen aus den Materialien zu entnehmen und in einer Expert Card (vgl. 4.5.2) zusammentragen. Dies entspricht den Anforderungen der Kompetenz „Informationsauswertung“.

Zum Abschluss des Laborangebots präsentieren die Lernenden die Inhalte ihrer Expert Card, im Sinne der Kompetenz Medienproduktion und Präsentation adressatengerecht den Gruppenmitgliedern der anderen Stationen. Anschließend werden die finalen Ergebnisse werden mit Hilfe der Ipad's dem Plenum präsentiert.

Soft- und Hardware

Als Hardware standen im Schülerlabor Tablets der Firma Apple mit einem Stift zur Verfügung. Die Suche nach einer geeigneten Software zur Umsetzung des E-Books stellte sich anfänglich herausfordernd dar. Drei populäre Anwendungen für die Erstellung von digitalen E-Books (*BookCreator*, *Pages*, *Keynote*) wurden zu Beginn des Projektes in Erwägung gezogen.

Book Creator ist eine Anwendung von Google. Sie kann unabhängig von verschiedenen Betriebssystemen mit einem Google-Konto online verwendet werden. Problematisch bei der Software sind ihre begrenzten Funktions- und Layoutmöglichkeiten (vgl. Abbildung 135 links).

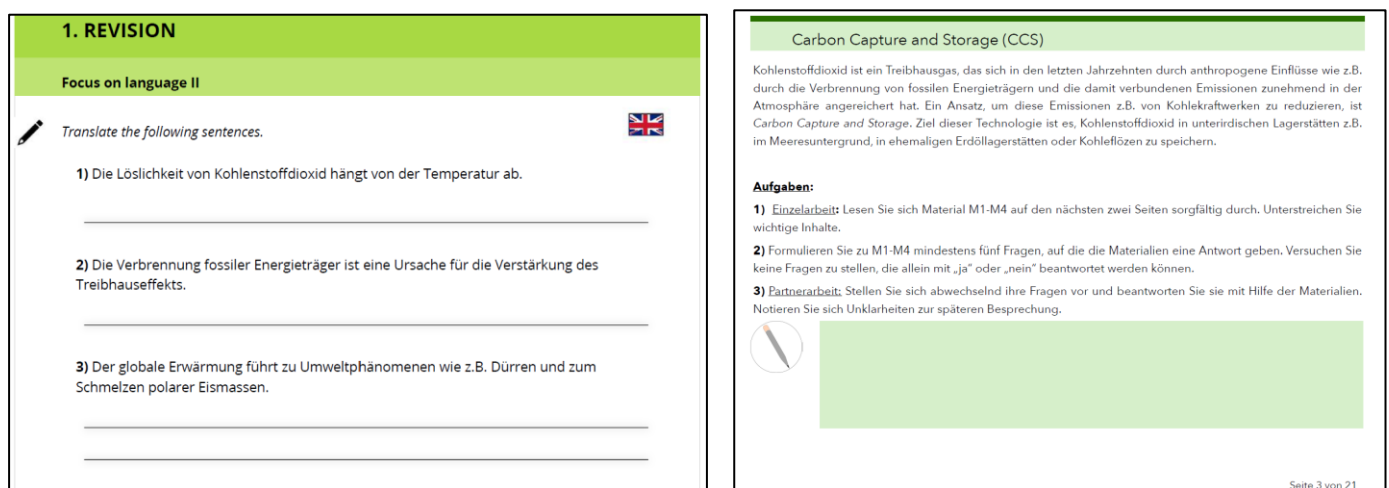


Abbildung 135. E-Book Entwurf (links) in Book Creator und (rechts) in Pages

Da im Schülerlabor Geräte der Firma Apple zur Verfügung standen, war es naheliegend auch Software aus dem iOS-Betriebssystem zu testen. Dazu wurden die Anwendungen *Pages* und *Keynote* für ein mögliches E-Book in Erwägung gezogen. Erste Erfahrungen wurden bei der digitalen Umsetzung zum Laborangebot *Wege aus der Klimakrise* [271] gesammelt, bei dem die deutschsprachigen Materialien in ein digitales Pages-Format überführt (vgl. Abbildung 135 rechts) werden sollten. Die Inhalte ließen sich in ein digitales Format übertragen. Einschränkungen traten bei der Verlinkung von Inhalten bzw. beim Einfügen von Fotos durch die Lernenden auf.

In einer Masterthesis, die sich mit der Anwendung *pages* zur Konzeption eines E-Books auseinandersetzte (vgl. Abbildung 136 links), wurden weitere Einschränkungen in Bezug auf die Navigation über Verlinkungen und die Integration von interaktiven Elementen beschrieben [227, S. 34, 51].

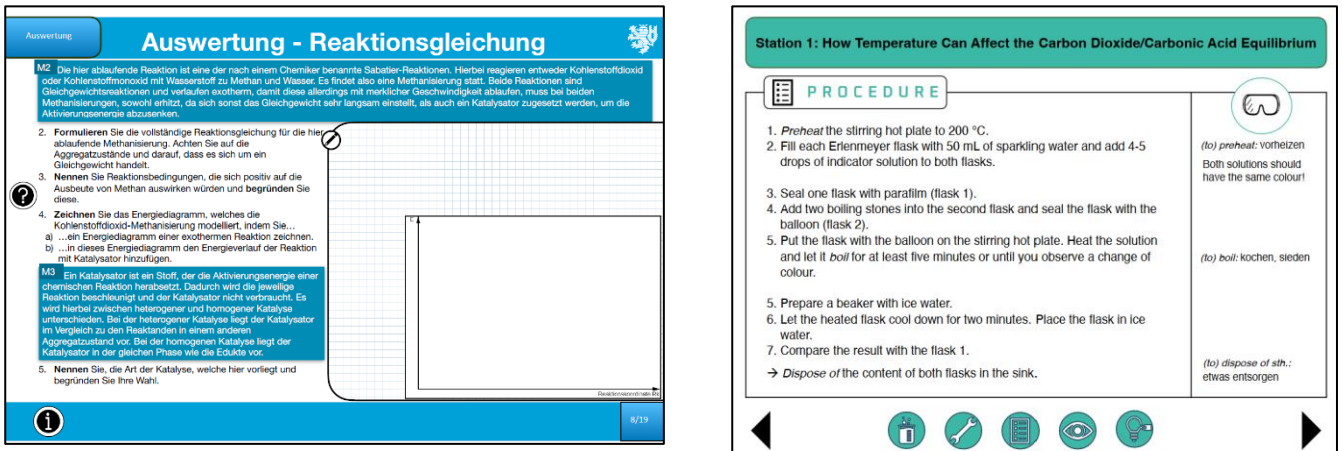


Abbildung 136. E-Book Entwurf (links) in Pages¹⁹² und (rechts) in Keynote

Auf Grundlage dieser Erfahrungen wurde das E-Book in der Anwendung *Keynote* (vgl. Abbildung 136 rechts) gesetzt. Dies ermöglichte eine freie Gestaltung des Layouts, eine umfassende Einbindung aller medialen Inhalte, sowie die Integration von Verlinkungen und Verweisen innerhalb des E-Books. Eine allumfassende Interaktivität konnte mit Hilfe der App *Documents* erreicht werden, die E-Books als interaktive pdf-Datei zugänglich macht (vgl. Abbildung 137). Neben dem problemlosen Abspielen von Video- und Audiodateien und einer umfassenden Navigations- und Notizfunktion, können die Lernenden auf alle integrierten interaktiven Elemente zugreifen. Außerdem werden die Arbeitsergebnisse und Notizen der Lernenden während des Arbeitsprozesses in der App gespeichert.

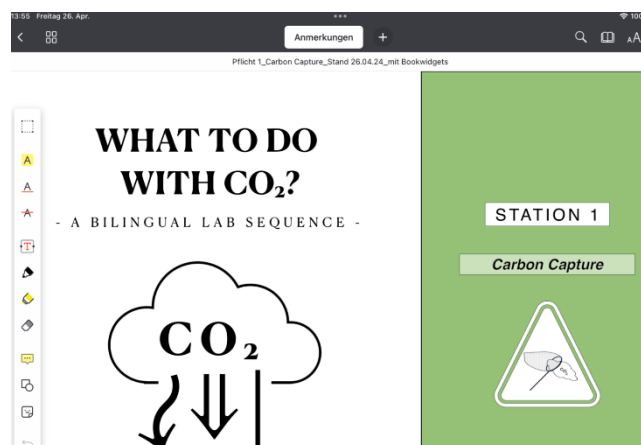


Abbildung 137. E-Book geöffnet auf dem Ipad in der App Documents

Durch das pdf-Dateiformat können die E-Books über alle gängigen E-Reader-Programme auf dem Tablet und dem Laptop geöffnet und von Lernenden mit einem Stift oder der Kommentarfunktion bearbeitet werden. Die E-Books sind folglich nicht nur für Ipad's nutzbar, sondern können auch auf anderen Geräten und Betriebssystemen mit vollem Funktionsumfang verwendet werden.

¹⁹² Abbildung E-Book-Entwurf in Pages: [227].

Layout

Die Gestaltung des Lernbegleiters sollte seine Funktionalität unterstützen und eine gewisse Strukturierung vermitteln. Für den Einsatz mit dem Tablet lag ein Querformat als grundlegende Formatierung nahe. Neben der Einführung einer Navigationsleiste zur Orientierung zwischen den Aufgabenformaten, sollten auch spezielle Icons für Aufgabentypen und interaktive Elemente eingeführt werden, die den Lernenden eine einfachere Handhabung des E-Books ermöglichen sollten (vgl. Abbildung 138).



Abbildung 138. Erste Iconvorschläge

Farblich sollten sich die E-Books an der Farbgebung der Bergischen Universität orientieren. Einige Layoutoptionen mit Navigationsleiste, Icons und Farbgebung sind in Abbildung 139 dargestellt. Nach ersten Entwürfen wurde sehr schnell klar, dass das Tablet-Format eine klare grafische Gestaltung ohne visuelle und inhaltliche Überfrachtung notwendig machte.

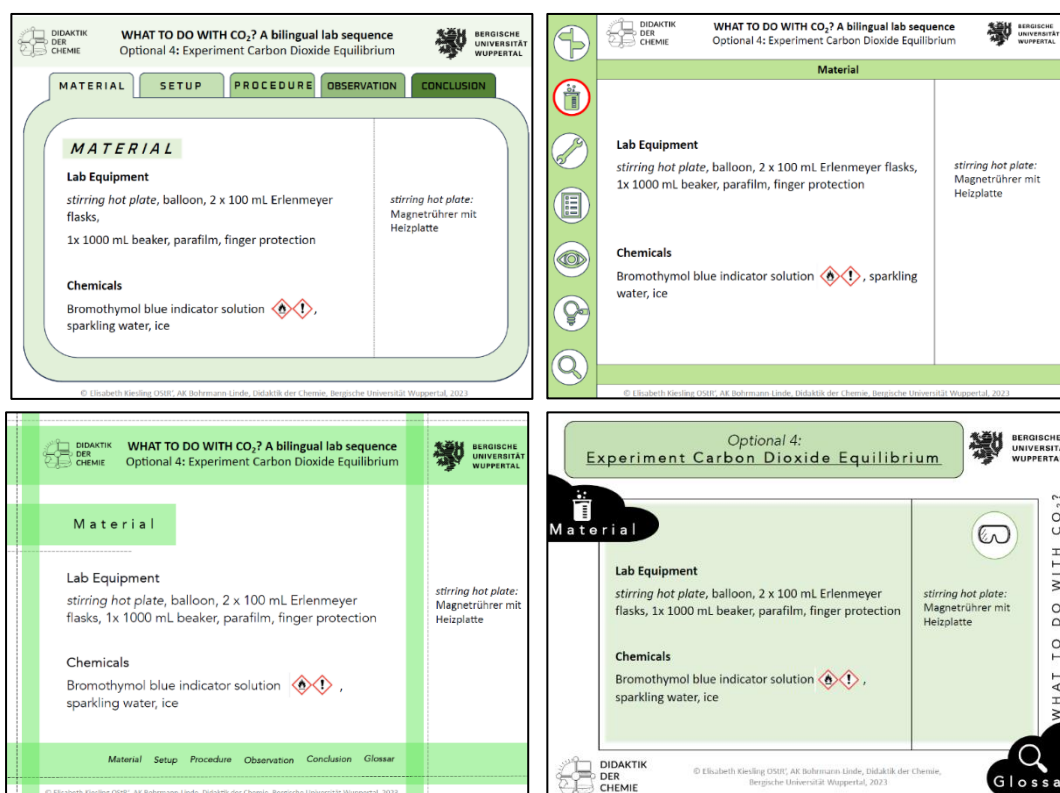


Abbildung 139. Verschiedene Layoutideen für das E-Book

Folglich wurde ein klar strukturiertes E-Book erstellt (vgl. Abbildung 140). In der Kopfzeile wurde die Überschrift integriert, die Fußzeile wurde als Navigationsleiste genutzt. Die Navigation durch die Materialien erfolgt mit Hilfe der Menüleiste und Pfeiltasten am unteren Rand oder über eine Swipe- Bewegung. Im Mittelteil des Lernbegleiters wurde eine Teilüberschrift ergänzt und der Aufgabenbereich zweigeteilt. Die linke Spalte enthält meist Aufgabenstellungen und Versuchsbeschreibungen, die rechte Spalte enthält zusätzliche Informationen wie z.B. Annotationen, Hinweise, Abbildungen, Links zu Hilfekarten und dem Glossar.

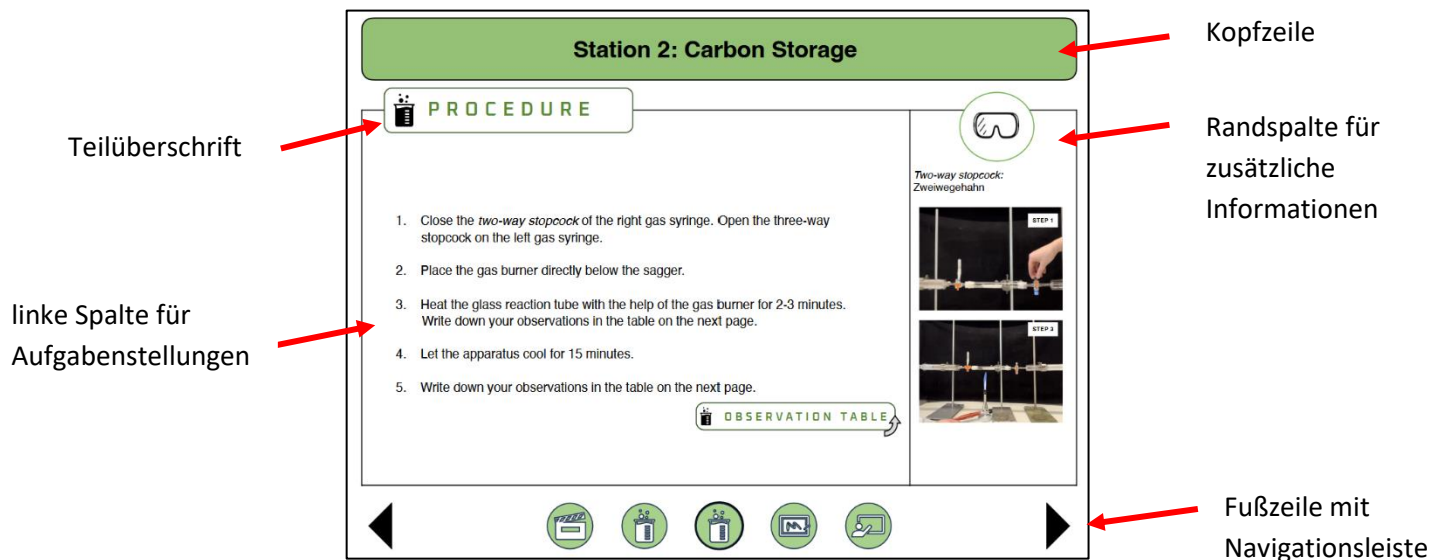


Abbildung 140. Finales Layout des E-Books

Funktionen

Mit der Entscheidung für die Umsetzung des E-Books mit den Apps *Keynote* und *Documents* konnten fast alle intendierten Funktionen im Lernbegleiter umgesetzt werden. Die Anwendung *Keynote* wurde hauptsächlich zur Konzeption der E-Books genutzt. Die App *Documents* wird primär bei der Verwendung der E-Books im Schülerlabor eingesetzt. In den Lernbegleitern können mit Hilfe dieser Applikation vielfältige Notiz- und Navigationsoptionen, sowie das Abspielen von Audiodateien und Videodateien realisiert werden. Das E-Book sollte die Lernenden bei ihrem Lernprozess begleiten und zum selbstständigen Arbeiten anregen. Dazu wurde über Verlinkungen ein Zugriff auf alle Infotexte, Hilfekarten, gestufte Hilfen, Sprinteraufgaben und optionale Inhalte realisiert. Der Research Plan dient als Übersicht und Orientierungshilfe für die zu bearbeitenden Aufgaben. Nach jeder bearbeitenden Aufgabe wird diese im Research Plan abgehakt und ermöglicht eine Dokumentation des Lernfortschritts (vgl. Abbildung 141)

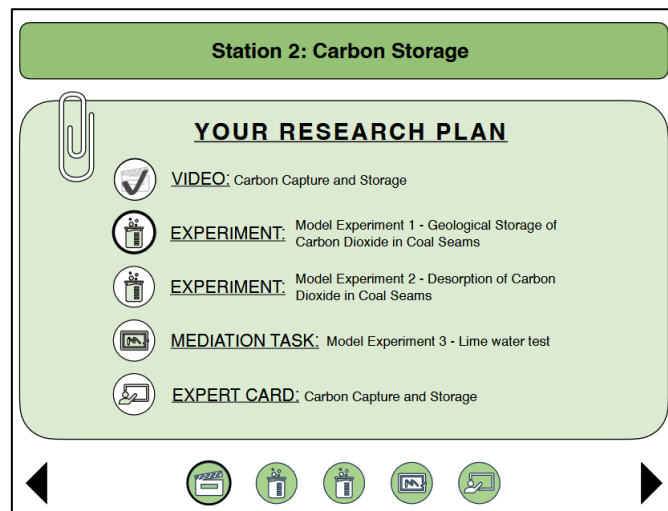


Abbildung 141. Research Plan der Station 2

Beim Experimentieren unterstützt das E-Book die Lernenden durch bebilderte Versuchsanleitungen und eine Notiz-, Zeichen- und Fotofunktion. Die Schülerinnen und Schüler können ihre Beobachtungen und Auswertungen wie in einem Laborjournal schriftlich festhalten.

Die Lerninhalte werden durch verschiedene Medienangebote und interaktive Aufgabenformate angereichert. Die Lernenden haben z.B. Zugriff auf Videodateien. Außerdem wurden von Muttersprachlern eingesprochene Kapitelzusammenfassungen und Glossareinträge als Audiodateien hinterlegt. Darüber hinaus stehen ihnen interaktive Übungen wie z.B. ein Kreuzworträtsel (vgl. Abbildung 142) oder Aufgaben mit Selbstkorrektur zur Verfügung. Diese Anwendungen wurden mit dem Tool *BookWidgets* erstellt, welches über Verlinkungen im Lernbegleiter aufgerufen werden kann.

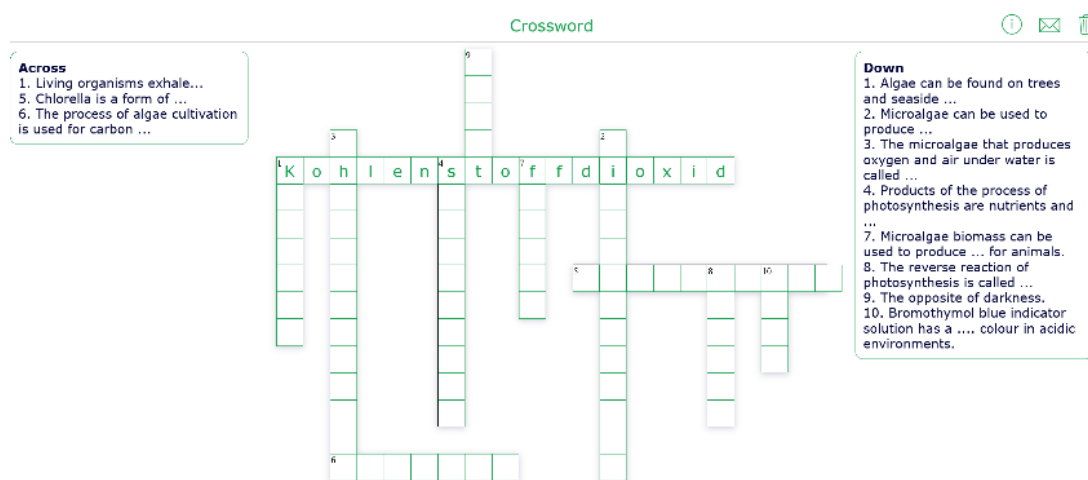


Abbildung 142. BookWidgets Anwendung Kreuzworträtsel

Die erarbeiteten Inhalte des E-Books können gesichert und im Anschluss an das Lernsetting mit den Lernenden geteilt und in deren eigenen, digitalen Aufzeichnungen weiterverwendet werden. So lassen sich die Materialien mühelos an den Regelunterricht anbinden.

4.5.4 Zwischenfazit

Durch die gewonnenen Erkenntnisse aus den Kapiteln 4.5.1 bis 4.5.3, können die aufgestellten konzeptionellen Fragestellungen (F) nun wie folgt beantwortet (A) werden:

(F15) *Welche Materialien zu CCS existieren bereits?*

(A15) Sowohl im deutschsprachigen als auch im englischsprachigen Bereich existieren, nach den Erkenntnissen aus eigenen Recherchebemühungen, bereits didaktisierte Materialien zu CCS. Die deutschsprachigen Lernangebote fokussieren sich schwerpunktmäßig auf die Sekundarstufe II, während sich die englischsprachigen eher auf die Sekundarstufe I konzentrieren. In beiden Bereichen lässt sich eine theoretisierte Vermittlung der Prozesskette feststellen. Der Einsatz von Experimenten ist rar oder entspricht nicht dem angestrebten Zielgruppenniveau (vgl. 4.4.1). In den Materialien kann ein verstärkter Einsatz von Videos, Diagrammen und Informationstexten festgestellt werden. Bilinguale Materialien zu CCS existieren nach den Recherchen nicht.

(F16) *Eignen sich diese Materialien für das geplante Setting oder müssen Adaptionen vorgenommen werden?*

(A16) Da noch keine bilingualen Materialien existieren, können die bestehenden Arbeitsmaterialien für das geplante Lernsetting nicht verwendet werden. Auf Grund der schwankenden Qualität, Objektivität und Verschiedenheit der Zielgruppen in den deutsch- und englischsprachigen Vorlagen, müssen grundlegende Adaptionen bzw. eine Neukonzeptionen von Materialien vorgenommen werden.

(F17) *Nach welchen Kriterien wurde das Material gestaltet?*

(A17) Um die intendierten konzeptionellen Schwerpunkte (vgl. 4.3.2) umzusetzen, müssen die Materialien den Kriterien für Materialkonzeption in einem bilingualen Lernsetting entsprechen. Dabei muss bedacht werden, dass die entwickelten Materialien auf Grund der organisatorischen Rahmenbedingungen nicht alle Kriterien gleichsam umfassend umsetzen können. Dennoch wurde der Versuch unternommen, so viele Kriterien wie möglich zu realisieren. Dies wurde durch die Gestaltung von wohlüberlegten Aufgaben, passender und authentischer Textauswahl, der Integration von gezieltem Scaffolding, sowie von Formen des kooperativen Lernens und funktionaler Sprachwechsel angebahnt. Darüber hinaus enthalten die Materialien Formen der Selbstevaluation und machen Lernprozesse und -ziele für Lernende sichtbar. Sie streben die Förderung der eigenständigen Lernprozesse und Skillentwicklung der Schülerinnen und Schüler an. Die Intention der Materialien ist es außerdem, Alltags- und Lebensweltbezüge für die Lernenden herzustellen und diese mit der Integration einer interkulturellen Perspektive und der Förderung des kritischen Denkens anzureichern. Die Anbahnung all dieser Kriterien und einer damit einhergehenden Kreierung einer sicheren Lernumgebung und -atmosphäre bilden den Rahmen für die Materialgestaltung für das Schülerlaborangebot.

(F18) *Welchen Mehrwert bietet die digitale Lernumgebung?*

(A18) Mit Hilfe der digitalen Lernumgebung können die Kriterien für die Materialgestaltung (vgl. F17) noch zielgerechter umgesetzt werden. Durch den Einsatz des E-Books kann die Förderung des selbstständigen Arbeitens der Lernenden, die Möglichkeit der Integration von Differenzierungsangeboten und die Gestaltung von individuellen Lernwegen für Schülerinnen und Schüler ohne Medienbruch realisiert werden. Das E-Book begleitet die Lernenden bei ihrem Lernprozess, unterstützt sie als Werkzeug beim Experimentieren ermöglicht eine Anreicherung der Lerninhalte durch verschiedene Medienangebote und interaktive Aufgabenformate. Das E-Book gestattet die Integration von Audio- und Videodateien, einem Glossar und Aufgaben zur Selbstkorrektur in einen einzigen Lerngegenstand. Durch das digitale, interaktive E-Book erhalten die Lernenden ein umfassendes Lernpaket, welches sie zur Begleitung ihres Lernprozesses nutzen können und das zusätzlich die Schulung von medienbezogenen Kompetenzen ermöglicht.

Abschnitt C - Erprobung der konzipierten Materialien und Laboreinheit

5. Erprobungen

Die Entwicklung, Erprobung, Evaluation und Optimierung einer bilingualen Laboreinheit und der darin verwendeten Lernmaterialien war zentrale Zielsetzung des vorliegenden Dissertationsprojektes. Angelehnt an die Forschungsansätze der *Praktiker-orientierten Aktionsforschung* [284] und der *Partizipativen Fachdidaktischen Aktionsforschung* [285] sollte die Evaluation, Dokumentation und Implementation von einem neuen didaktischen Konzept zu *Carbon Capture and Storage* realisiert werden.

Wird die zentrale Entwicklungsperspektive der Ansätze verfolgt, können bereits während des Forschungsprozesses Veränderungen in der Praxis angeregt [23, S.44], eigene Kompetenzen weiterentwickelt sowie die Situation in der Praxis verbessert werden [284, S.48]. Im Praktiker-orientierten Ansatz sind die Lehrkräfte die Forschenden, in der partizipativen fachdidaktischen Aktionsforschung arbeiten externe Forschende und Lehrkräfte eng zusammen [285, S.4]. In beiden Ansätzen steht die Beforschung einer Lernumgebung im Zentrum des Forschungsinteresses. Die Umsetzung von Aktionsforschungsprojekten erfolgt typischerweise in mehreren Zyklen (vgl. Abbildung 143).

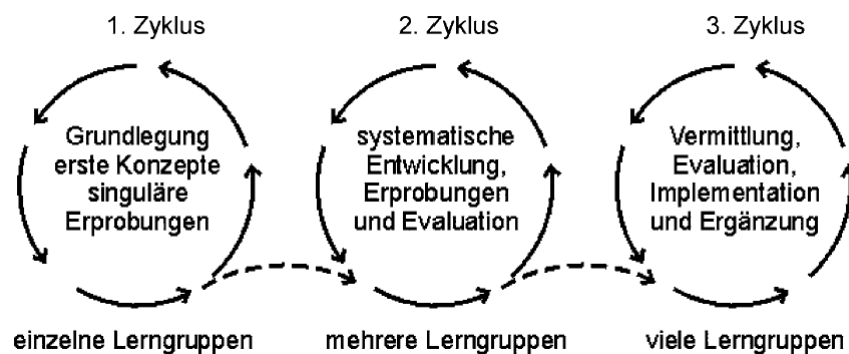


Abbildung 143. Zyklen der partizipativen Aktionsforschung¹⁹³

Die stattfindenden Interventionen in der Praxis werden sukzessive evaluiert, reflektiert und stetig optimiert [23, S.46]. Zielsetzung ist dabei die Weiterentwicklung der konzipierten Lernmaterialien und Lehrkonzepte (vgl. Abbildung 144), sowie die Weiterbildung von Lehrkräften und Weiterentwicklung der Unterrichtspraxis.

Die Umsetzung eines solchen Forschungsvorhabens ist wenig standardisier- und formalisierbar. Die eingesetzten Forschungsinstrumente können die komplexen Abläufe und Ergebnisse meist nicht angemessen widerspiegeln [23, S.48]. Folglich müssen bei der Evaluation eines solchen Vorhabens Kriterien befolgt und klare Einordnungen sowie ggf. Anpassungen oder Einschränkungen vorgenommen werden. Damit der Forschungsprozess nachvollziehbar gestaltet wird, sollten alle Vorgänge und Untersuchungen dokumentiert werden. Dies kann z.B. durch Beobachtungsprotokolle oder Fragebögen realisiert werden.

¹⁹³ Abbildung Zyklen: [23, S.47].

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist mit Limitationen verbunden, diese sollten klar kommuniziert werden. Darüber hinaus sollten sich die Forschenden bewusst sein, dass die Auswertung der Daten teilweise interpretativ erfolgt, z.B. bei den Zuordnungen zu Kategorien bzw. Items, was entsprechend reflektiert werden muss [23, S.48-50].

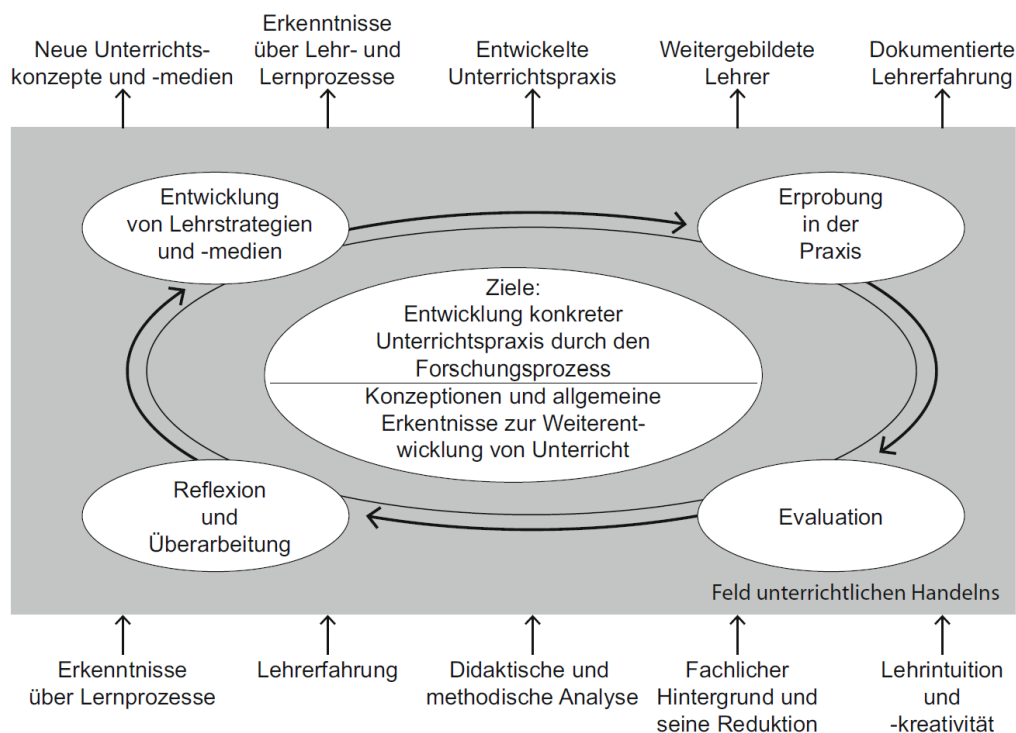


Abbildung 144. Forschungsmodell der partizipativen Aktionsforschung¹⁹⁴

Die in diesem Forschungsprojekt intendierte Entwicklung und Erprobung eines bilingualen Schülerlaborkonzepts mit gezielten Sprachwechseln weist eine hohe Komplexität auf. Neben der Gestaltung von innovativem Material, der Erprobung von geeigneten Experimenten und Lernsettings für den bilingualen Chemieunterricht, macht die Beforschung dieses Angebots die Überwindung von zahlreichen Herausforderungen notwendig. Die Forschung im Schülerlabor gilt im Allgemeinen als komplex [19, S.14]. Das Schülerlaborsetting ist auf Grund seiner kurzzeitigen Interventionen und vielfältigen Kohorten schwer beforschbar, da geeignete Messinstrumente nicht verfügbar oder passend sind. Oft müssen eigenständig Messinstrumente konstruiert werden [191, S.190-191]. Zusätzlich geht die Implementierung von bilingual-chemischen Lernangeboten (vgl. 3.6) und im Besonderen bilingual-chemischen Schülerlaborangeboten (vgl. 3.6.4) mit zahlreichen Herausforderungen einher. Exemplarisch seien hier die Verfügbarkeit von qualifizierten Lehrkräften, ein geringes Vorwissen, geringe Vorerfahrungen der Lernenden und der Mangel an außerschulischen bilingual-chemischen Lernangeboten genannt. Folglich kann das vorliegende Forschungsprojekt auf begrenzt vorhandene Instrumente zurückgreifen und einen Beitrag leisten, diese Herausforderungen zu bewältigen.

¹⁹⁴ Abbildung Forschungsmodell: [23, S.47].

Diese Ausgangssituation berücksichtigend, wurde die entwickelte Schülerlaboreinheit in Anlehnung an den Forschungsansatz der partizipativen fachdidaktischen Aktionsforschung, in einem explorativen Forschungsdesign in drei Iterationszyklen seit 2020 erprobt, evaluiert und weiterentwickelt (vgl. Abbildung 145).

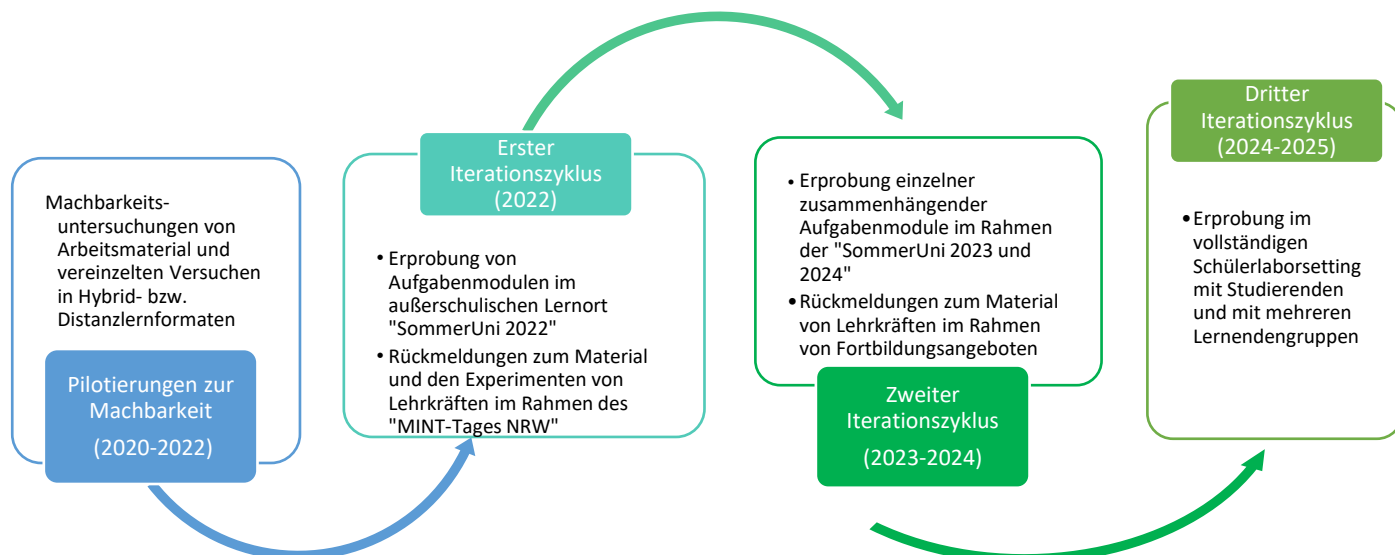


Abbildung 145. Übersicht der Iterationszyklen des Dissertationsprojektes

Im Verlauf des Dissertationsprojektes wurden eine Vielzahl von deutschen und englischsprachigen Materialien entwickelt (vgl. 4.5). In Tabelle 36 findet sich eine Übersicht, welche Erprobungen zu diesen entwickelten Inhalten und Materialien durchgeführt wurden.

Tabelle 36. Überblick aller Erprobungen innerhalb des Dissertationsprojektes

Iterationszyklus	deutsch	bilingual	Kohorte	Erprobung
Pilotierungen zur Machbarkeit (2021-2022)				
Dezember 2020- Mai 2021	x	x	EF-Lernende (n= 20)	Materialien der BNE- Unterrichtssequenz „Klimawirksamkeit von Kohlenstoffdioxid und Ansätze zur Emissionsreduktion“
Februar 2021		x	Q2-Lernende (n= 34)	erste bilinguale Materialien erprobt im Rahmen eines betreuten Praxissemesterbericht- Projekts [286]
Mai 2022	x		Studierende (n= 8)	Experimente und digitale E-Books im Rahmen einer betreuten Masterthesis [227]

Iterationszyklus	deutsch	bilingual	Kohorte	Erprobung
Iterationszyklus I (2022)				
31.05.22		x	Oberstufen Schülerinnen (n= 17)	Kurs „Bilingual Chemistry – Experiments with Carbon Dioxide“ in der SommerUni 2022
26.08.22	x	x	Lehrkräfte (n= 8, bili n=1)	Lehrkräftefortbildung „ <i>BNE und Chemieunterricht – Von der Leitlinie BNE zur exemplarischen Unterrichtseinbindung</i> “ am MINT Tag NRW in Bottrop
Iterationszyklus II (2023-2024)				
30.01.23	x		Studierende (n= 2)	Schülerlaborangebot „ <i>Wege aus der Klimakrise</i> “
13.02.23	x		EF-Lernende (n= 4)	Schülerlaborangebot „ <i>Wege aus der Klimakrise</i> “
14. und 15.06.23		x	Oberstufen Schülerinnen (n= 34)	Zwei Kurse „Bilingual Chemistry – Experiments with Carbon Dioxide“ in der SommerUni 2023
25.10.23	x		Lehrkräfte (n= 5)	Lehrkräftefortbildung „ <i>Wege aus der Klimakrise</i> “
15.11.23	x	x	Lehrkräfte (n= 6)	Lehrkräftefortbildung „ <i>Carbon Capture Utilisation and Storage</i> “
26. und 27.06.24		x	Oberstufen Schülerinnen (n= 42)	zwei Kurse „Bilingual Chemistry – Experiments with Carbon Dioxide“ in der SommerUni 2024
Iterationszyklus III (2024-2025)				
19.04.24		x	Studierende (n =10)	Schülerlaborangebot „ <i>What to do with CO₂?</i> “
29.01.25		x	Q2-Lernende (n = 11)	Schülerlaborangebot „ <i>What to do with CO₂?</i> “
April-Mai 2025		x	EF-Lernende (n= 60)	Schülerlaborangebot „ <i>What to do with CO₂?</i> “

Da sich die Arbeit schwerpunktmäßig auf die Konzeption und Erprobung des bilingualen Schülerlaborangebots bezieht, werden im Folgenden nur Erprobungen beschrieben, die mehrheitlich bilinguale Inhalte zum Gegenstand hatten.

5.1 Pilotierungen zur Machbarkeit (2020-2022)

Da zu Beginn des Projekts zum Themenbereich CCS wenig deutsch- und englischsprachiges Material existierte (vgl. 4.5.1), lag der Ansatz nahe, zunächst deutschsprachige Materialien mit BNE-Bezug zu entwickeln und dieses dann für ein bilinguales Lernsetting aufzubereiten. Aus diesem Grund wurde zunächst hauptsächlich deutschsprachiges Lernmaterial entwickelt und im Regelunterricht der Jahrgangsstufe Einführungsphase (EF) (G8 Gymnasium) erprobt. Die ersten Pilotierungen der Arbeitsmaterialien und Experimente mit Schülerinnen und Schülern gestalteten sich jedoch sehr schwierig, da diese in die Anfangszeit der Corona-Pandemie durchgeführt werden mussten. Regelunterricht befand sich in dieser Zeit in einem ständigen Wechsel zwischen Präsenz-, Hybrid- und Digitalformaten. Dies ist auch der Übersicht zu den durchgeführten Erprobungen zu entnehmen (siehe Tabelle 37). Die Rückmeldungen der Lernenden wurden neben Beobachtungen der Lehrperson zu den Stundenverläufen, schriftlich in einem Forschungstagebuch [284, S.31] fixiert.

Die Schülerinnen und Schüler gaben grundsätzlich positive mündliche Rückmeldungen zu den Materialien und Aufgabenstellungen und kamen gut damit zurecht. Durch die Auswertung einzelner schriftlicher Arbeitsergebnisse konnten auch Rückschlüsse zum inhaltlichen Bearbeitungsumfang und Verständnis der Aufgaben gezogen werden. Dies führte zu ersten Anpassungen des Arbeitsmaterials (z.B. Umformulierung von Arbeitsaufträgen, inhaltliche Erweiterung von Materialien, Erläuterung von vereinzelt Fachbegriffen). Einige englischsprachige Materialien wurden in der Jahrgangsstufe EF ebenfalls erprobt. Obwohl die Kohorte über keinerlei bilinguale Vorerfahrung verfügte, war die Bearbeitung der Aufgaben für die Lernenden unproblematisch. Parallel dazu wurden auch bereits entwickelte bilinguale Materialien mit Sprachwechseln in der Jahrgangsstufe Q2 im Rahmen eines betreuten Praxissemesterprojekts einer Masterstudentin erprobt. Sie unterrichtete zwei Probandengruppen. In ihrem Praxissemesterbericht beschreibt sie, dass die Materialien eine Schwerpunktsetzung für ihre Stundenplanung ermöglichten und sie damit einen abwechslungsreichen Unterricht gestalten konnte. Die eingesetzten Sprachwechsel beschreibt sie als positiv und gewinnbringend für die Lernenden [286, S.12].

Tabelle 37. Übersicht der Pilotierungen zur Machbarkeit

Datum	Kohorte	Umfang	Durchführende Person	Verwendete Sprache(n)	Erprobte Materialien und Versuche
11.12.20	EF Che Gk (n =20)	90 Min	Elisabeth Kiesling	Deutsch	Versuch Temperaturabhängigkeit mit Ballon
01.02.21	EF Che Gk (n =20)	90 Min	Elisabeth Kiesling	Deutsch	Tandembogen und Modul 1 (ohne Versuch)
10.03.21	EF Che Gk (n =20)	45 Min	Elisabeth Kiesling	Deutsch	Modul 2 (ohne Versuch)
26.03.21	EF Che Gk (n =18)	45 Min	Elisabeth Kiesling	Englisch	Video CCS
26.03.21	EF Che Gk (n =18)	45 Min	Elisabeth Kiesling	Deutsch	Modul 4 CCS (ohne Versuch)
Februar 2021	2x Q2 Che Gk (n = 34)	je 135 Min	Isabell Meyer	Englisch, Deutsch	<ul style="list-style-type: none"> • Versuch Temperaturabhängigkeit mit Ballon (Video) • Tandembogen • Focus on Language (MindMap), • Brainstorming CCS
16.04.21	EF Che Gk (n =20)	90 Min	Elisabeth Kiesling	Deutsch	Modul 6 DAC (ohne Versuch)
23.04.21	EF Che Gk (n =20)	90 Min	Elisabeth Kiesling	Deutsch	Modul 5 Algen (ohne Versuch)
30.04.21	EF Che Gk (n =19)	90 Min	Elisabeth Kiesling	Deutsch	Modul 7 AB 1
05.05.21	EF Che Gk (n =20)	45 Min	Elisabeth Kiesling	Deutsch	Modul 7 AB 2
07.05.21	EF Che Gk (n =19)	90 Min	Elisabeth Kiesling	Deutsch	Modul 7 AB 3





5.2 Erster Iterationszyklus (2022)

An die ersten Pilotierungen schlossen sich Erprobungen im Rahmen der ersten Iterationsschleife an. Um die Praktikabilität der entwickelten Lernmaterialien zu untersuchen, wurden die bilingualen Materialien in einem Experimentierkurs im Rahmen des außerschulischen Angebots „SommerUni“ mit Lernenden erprobt (vgl. 5.2.1) und Lehrkräften deutsche und bilinguale Inhalte im Rahmen eines Fortbildungstages (vgl. 5.2.2) vorgestellt.

5.2.1 SommerUni 2022

Die erste Erprobung von zusammenhängenden bilingualen Aufgabenmodulen wurde am 31.05.22 im Rahmen der jährlich stattfindenden SommerUni durchgeführt. Die SommerUni ist eine Veranstaltungsreihe der Bergischen Universität Wuppertal, die sich an MINT-interessierte Schülerinnen ab Klasse 10 richtet. Die Schülerinnen erhalten eine Woche lang die Möglichkeit, einen Einblick in alle naturwissenschaftlichen Fachbereiche zu bekommen, sowie an regulären Lehrveranstaltungen und eigens für diesen Anlass konzipierten Kursen teilzunehmen. Die Didaktik der Chemie bot in diesem Zusammenhang einen zweistündigen Experimentierkurs mit dem Titel „Bilingual Chemistry- Experiments with Carbon Dioxide“ an. In dem Kurs hatten die Schülerinnen die Gelegenheit an verschiedenen Stationen Experimente durchzuführen und digitale Materialien zum Thema Kohlenstoffdioxid zu nutzen. Der Ablaufplan des Kursangebots ist in Tabelle 38 dargestellt.

Tabelle 38. Ablauf des SommerUni-Kurses 2022

SommerUni-Kurs 2022 „Bilingual Chemistry- Experiments with Carbon Dioxide“			
Kursleitung: Elisabeth Kiesling			
Phase	Inhalte	Sozialform, Methode	Medien und Experimente
Warm-up (20 min)  	Ankommen im Bili-Sprachraum - Begrüßung - Schilderung des Ablaufs	LV	Powerpoint-Präsentation, Laufzettel, Masken, Schutzbrillen
	Prä-Erhebung	EA	Fragebogen
	Demo-Experiment mit US-Austauschstudentin Olivia Hartley	LV	Leitungswasser mit unterschiedlichen Indikatoren, Zugabe von Trockeneis
Stationsarbeit  (60 min)	Stationsarbeit mit Laufzettel der Gruppe A o. B mit zwei Pflicht- und zwei Wahlstationen	GA (3er/4er)	Ipads, Kopfhörer, Laufzettel, Experimentieranleitungen, Lösungskarten, Hilfekarten, Materialien für die Experimente
Cool-down  (15 min)	Besprechung der Laufzettel und Klärung von Fragen	Plenum	Powerpoint-Präsentation, Laufzettel,
	Post-Erhebung	EA	Fragebogen

Um einen möglichst authentischen Einstieg in die bilinguale Sprachumgebung zu schaffen, wurde ein Demonstrationsexperiment mit Trockeneis ausgewählt, welches durch eine US-amerikanische Muttersprachlerin vorgestellt wurde. In zwei großen Bechergläsern wurde Leitungswasser mit Universalindikator bzw. mit Bromthymolblau-Lösung versetzt.

In beide Bechergläser wurde Trockeneis gegeben und die Effekte beobachtet und gemeinsam besprochen. Danach erhielten die Lernenden Laufzettel für die Stationsarbeit und die Gelegenheit, im Schülerlabor verschiedene Experimente und Arbeitsmaterialien zum Thema Kohlenstoffdioxid auszuprobieren. Die Stationsarbeit wurde in zwei getrennten Laborräumen durchgeführt. Die Details zur Gruppeneinteilung während der Stationsarbeit sind Tabelle 39 zu entnehmen. Beide Gruppen konnten so jeweils in kleineren Lerngruppen zwei Experimentierstationen und zwei optionale digitale Stationen bearbeiten. Impressionen aus dem Kursangebot sind Abbildung 146 zu entnehmen. Die verwendeten Arbeitsmaterialien sind im Anhang 4 einsehbar.

Tabelle 39. Übersicht der SommerUni Stationsarbeit

	Gruppe A	Gruppe B
Kohorte	n = 8	n = 9
Experimentierstationen (obligatorisch)	Station 1: How Temperature Can Affect the Carbon Dioxide/Carbonic Acid Equilibrium.	Station 3: Adsorption Potential of Carbon Dioxide Version A and B
	Station 2: Absorption of Carbon Dioxide	Station 4: Carbon Dioxide and Photosynthesis
Stationen mit digitalem Angebot (optional)	Station 5: Carbon Footprint Calculator	Station 5: Carbon Footprint Calculator
	Station 6: Carbon Capture and Storage Video	Station 6: Carbon Capture and Storage Video



Abbildung 146. Impressionen aus den Gruppen A und B der SommerUni 2022

Die Oberstufenschülerinnen wählen die Kursangebote der SommerUni nach ihren persönlichen Wünschen und Interessenlagen aus. Es handelt sich bei der untersuchten Kohorte folglich um eine vorselektierte Stichprobe von 17 Teilnehmerinnen der Klassenstufen 10-12. Dies gilt es in Hinblick auf die generierten Daten zu berücksichtigen.

Die Erhebung von Daten wurde in Anlehnung an die Triangulations-Methode realisiert, die besonders zur Beobachtung von Unterrichtsprozessen [284, S.63] und zur Datenakquise in der Aktionsforschung der Chemiedidaktik [287] eingesetzt wird. Die am häufigsten verbreiteten Formen sind dabei die Methoden- und Datentriangulation [288, S.91]. Bei diesen Triangulationsformen wird das Unterrichtsgeschehen mit Hilfe von unterschiedlichen Methoden erhoben und mit mehreren Datenarten ausgewertet. Durch den Einsatz und die Kombination von verschiedenen Forschungsinstrumenten, kann eine Forschungsfrage aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet und so die Validität der Ergebnisse erhöht werden [289, S.47]. Darüber hinaus kann durch die Ergänzung von verschiedenen Methoden und Daten ein umfassenderes Bild des Forschungsgegenstandes gewonnen werden [290, S.236]. Dabei ist es möglich, dass die Befunde des Vorhabens nicht identisch sind, jedoch eine multiperspektivische Sicht ermöglichen [288, S.90]. Es besteht so die Möglichkeit, die Auswirkungen von Lernsettings auf Lernprozesse zu beforschen und die meist als „black box“ [290, S.236] bezeichneten Vorgänge etwas genauer zu beleuchten. Um Lernprozesse im Schülerlabor zu beforschen, werden im naturwissenschaftlichen Bereich oft qualitative Methoden wie z.B. die Nutzung eines Beobachtungsbogens mit quantitativen Methoden z.B. dem Einsatz eines Fragebogens in einem partizipativen Aktionsforschungsdesign verbunden [184, S.24]. Diese Vorgehensweise birgt auch Nachteile. Die Durchführung, Erhebung und Auswertung einer solchen Datenvielfalt ist komplex [23, S.48]. Auf Grund der Kürze der Interventionen und der Vielschichtigkeit der Daten, können zwar mehrere Perspektiven zu einem Untersuchungsgegenstand erfasst werden, jedoch sind die erworbenen Ergebnisse nicht generalisierbar. Nichtsdestotrotz ist es durch die Mitarbeit von Forschenden, Lehrenden und Lernenden in einem Aktionsforschungsprojekt möglich, Unterrichtssettings zu entwickeln, die auf die Bedürfnisse der Praxis zugeschnitten sind [291, S.213].

Bei den Untersuchungen der ersten Iterationsschleife stand zu Beginn die multiperspektivische und möglichst objektive Beobachtung der Lernumgebungsprozesse sowie das Experimentierverhalten und der Umgang mit den Materialien im Vordergrund. Aus diesem Grund wurden Forschungsmethoden eines Triangulations-Ansatzes ausgewählt, die dieser Zielsetzung entsprechen. Die Lernendenperspektive sollte mit Hilfe einer schriftlichen Prä-/Post-Fragebogenbefragung erfasst werden. Die Perspektive anderer Lehrpersonen wurde mit Hilfe einer teilnehmenden Beobachtung realisiert.

Die unterrichtende Lehrperson nahm ebenfalls daran teil und führte im Anschluss an die Intervention eine Selbstevaluation [292, S.280-281] mit einer Checkliste nach Becker [293, S.166] durchzuführen (siehe Abbildung 147).

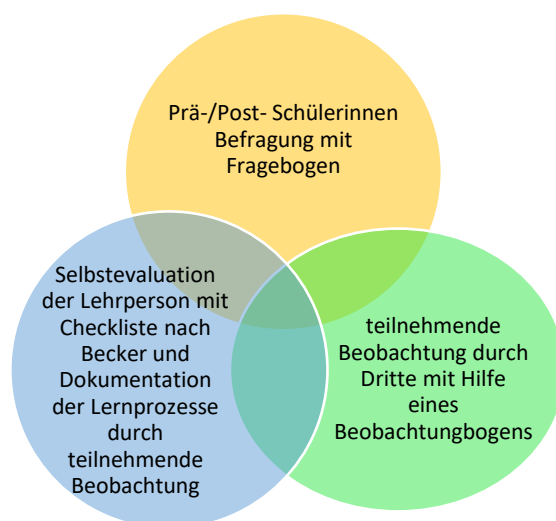


Abbildung 147. Erhebungsinstrumente der Triangulation in der SommerUni 2022

Die teilnehmende Beobachtung wurde als direkte Prozessbeobachtung [284, S.115] realisiert. Zwei Lehrpersonen der Chemiedidaktik und die Kursleitung beobachteten den Ablauf des Kurses und füllten einen vorstrukturierten Beobachtungsbogen aus. Der Bogen wurde aufbauend auf Items des EMU Fragebogens¹⁹⁵ zur Sprachförderung [292] für den Kurs und das entsprechende Erkenntnisinteresse angepasst (vgl. Abbildung 148-149). Eine Perspektive von Lehrkräften, die nicht umfassend in das Angebot eingebunden sind, ist wertvoll, da sie die Gesamtheit des Unterrichtsangebots mit mehr Distanz als die Lehrperson beurteilen können.

A) Bereich Sprachförderung

		Stimme nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme eher zu	Stimme zu
Sprachliche Angemessenheit der Materialien					
1	Die Kollegin hat Materialien eingesetzt, die sprachlich knapp über dem Niveau der Schüler/innen lagen.				
2	Die Kollegin hat für schwierige Materialien sprachliche Hilfen zur Verfügung gestellt.				
3	Im Lernraum waren Materialien für das selbstständige Sprachenlernen bereit (z.B. Lernposter, Wörterbücher).				
Sprachliche Aktivierung der Lernenden während der Stationsarbeit					
4	Die Schüler/innen unterhielten sich während der Stationsarbeit auf Englisch.				
5	Die Aufgaben waren offen konstruiert, so dass von den Lernenden zusammenhängende Beiträge (mdl/schrift.) geleistet werden mussten.				
6	Die Schüler/innen haben schriftlich gearbeitet und hatten genügend Zeit, ihre Aufgaben (ggf. mit anderen) kritisch zu überprüfen bzw. zu überarbeiten.				
7	Die Schüler/innen hätten mehr sprachliche Hilfestellungen (z.B. Übersetzungen) benötigt.				
Bilanz					
8	Die Einheit enthielt sprachlich anregende Elemente für die Schülerinnen und Schüler.				
9	Im Hinblick auf die unterschiedlichen Sprachvoraussetzungen der Schüler/innen war das Unterrichtsangebot angemessen.				

Abbildung 148. Ausschnitt aus dem eingesetzten Beobachtungsbogen

¹⁹⁵ EMU (Evidenzbasierte Methoden der Unterrichtsdagnostik) -Fragebogen Sprachförderung:
http://www.unterrichtsdagnostik.de/media/files/Fragebogen_zur_Sprachfoerderung_weibliche_Lehrperson.pdf (letzter Zugriff 10.03.25).

CODE: _ _ _

Damit Ihre Daten anonym bleiben, aber individuell ausgewertet werden können, kreuzen Sie bitte diesen Teil an bzw. füllen ihn aus:

- | | | |
|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| <input type="checkbox"/> Weiblich | 1. Buchstabe des Vornamens | 1. Buchstabe des |
| <input type="checkbox"/> Männlich | des Vaters: _____ | Vornamens der Mutter: _____ |
| <input type="checkbox"/> Divers | | |

Persönliche Angaben – Bitte kreuzen Sie die zutreffenden Angaben an:

1. Ich besuche ☐ ein Gymnasium ☐ eine Gesamtschule ☐ anderes: _____
 2. Ich bin in der ☐ 10. Klasse ☐ 11. Klasse ☐ 12. Klasse ☐ anderes: _____
 3. Ich lerne Englisch seit ☐ der Grundschule ☐ der 5. Klasse ☐ der 6. Klasse
 4. Ich habe Erfahrung mit bilinguaem Unterricht Ja ☐ Nein ☐
 5. Wenn ja, in welchem Fach? _____
 6. Meine letzte Zeugnisnote im Fach Englisch war eine _____
 7. Meine letzte Zeugnisnote im Fach Chemie war eine _____
- In der nächsten Frage sind mehrere Antworten möglich!
8. Ich verwende die englische Sprache außerhalb des Unterrichts z.B. beim:
 - ☐ Lesen von englischer Literatur
 - ☐ Lesen von englischen Beiträgen im Internet
 - ☐ Spielen von Computerspielen in englischer Sprache
 - ☐ Anschauen von englischen Filmen/Serien
 - ☐ Im Urlaub
 - ☐ Anderes _____

Abbildung 149. Ausschnitt aus dem eingesetzten Pre-S-Fragebogen

Außerdem können Dritte meist genauer und vielfältiger beobachten, weil sie nicht selbst unterrichten [284, S.123]. Trotzdem ist eine Beobachtung während einer Hospitation herausfordernd. In einer begrenzten Zeit müssen mehrere Lernende und deren Handlungen erfasst werden. Problematisch ist außerdem, dass Vergleiche mehrerer Gruppen schwer realisierbar und unterschiedliche Wahrnehmungen oder Erinnerungen im Nachhinein nur schwer überprüfbar sind [294, S.16].

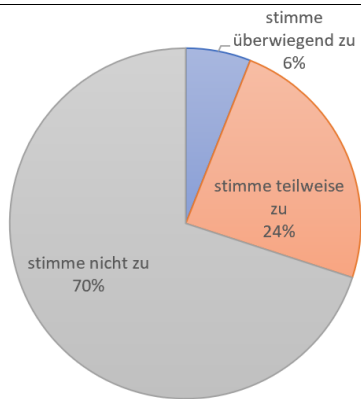
Der Einsatz eines Prä-/Post-SchülerInnen Fragebogens innerhalb eines Triangulations-Designs ist ein etabliertes Instrument in der naturwissenschaftlich-didaktischen Forschung, um die Perspektive der Lernenden zu erheben [23, S. 49]. Dabei werden meist offene Fragen mit Likert-Items kombiniert, um z.B. mögliche Adaptionen oder Verbesserungsvorschläge erfragen zu können [291, S.223]. An diesen Vorgaben orientiert, wurde ein passender Fragebogen für die Teilnehmenden des Kursangebots entworfen. Darüber hinaus wurde der Fragebogen um eine kurze soziodemografische Erhebung, eine Prä-/Post-Abfrage zu Fachbegriffen zum Themenbereich Kohlenstoffdioxid und um einen kurzen Wissenstest ergänzt (vgl. Abbildung 149, Gesamtdokument siehe Anhang 4).

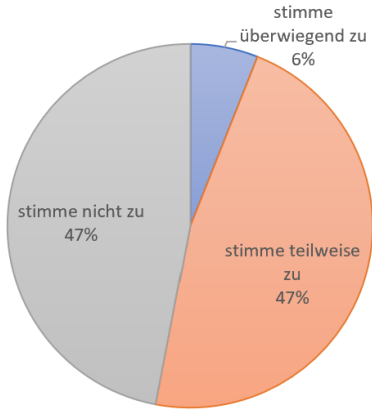
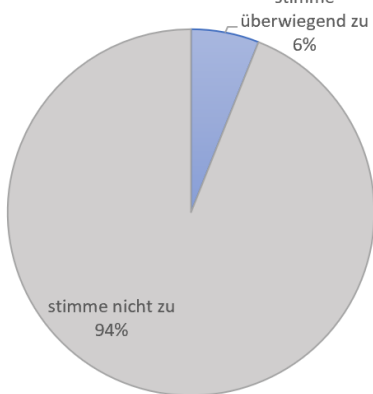
Durch die Triangulation konnten erste Eindrücke und Rückmeldungen zu den Materialien und Experimenten erhalten werden. Bei der befragten und beobachteten Kohorte handelt es sich um eine vorselektierte Stichprobe. Nur vier Teilnehmende verfügten über Erfahrungen mit bilinguaem Unterricht. Die Mehrheit der Lernenden gab an, in den Schulfächern Chemie und Englisch gute bis sehr gute Zeugnisnoten zu haben, beide Fächer gerne zu mögen und auch viel Freude an Schulexperimenten zu haben.

Die folgende Datenauswertung muss unter Berücksichtigung dieser Faktoren betrachtet werden, und lässt auch auf Grund der Größe der untersuchten Stichprobe, keine Generalisierungen zu. Bei den Antworten der Beobachtenden können Abweichungen auftreten, da es sich um eine subjektive Wahrnehmung handelt und die Beobachtenden unterschiedliche Vorerfahrungen mitbringen. Beobachter 1 ist eine Lehrkraft mit Vorerfahrungen im bilingualen Unterricht und hat schwerpunktmäßig die Gruppe A beobachtet. Beobachter 2 hat keine Vorerfahrungen mit bilinguaem Unterricht und hat die Gruppe B beobachtet. Die Beobachtungen der Lehrperson, die den Kurs leitete, beziehen sich sowohl auf Gruppe A, als auch auf Gruppe B. Beide Lerngruppen haben unterschiedliche obligatorische Pflichtstationen bearbeitet (vgl. Tabelle 40), weshalb bei den verschiedenen Beobachtungsperspektiven zusätzlich sprachliche und inhaltliche Unterschiede auftreten können. Grundlegend ließ sich jedoch innerhalb der erfragten Items eine geringe Streuung feststellen, weshalb aus den Antworten der Lernenden der Mittelwert gebildet wurde, um einen besseren Gesamteindruck zu ermöglichen. Diese Vorgehensweise ist jedoch auf Grund der geringen Teilnehmendenzahlen nicht unproblematisch, jedoch auf Grund der Datenlage nur schwer anderweitig zu realisieren.

Die Lernenden und Beobachtenden bestätigten die sprachliche Angemessenheit der Materialien und deren Verständlichkeit (vgl. Tabelle 40, B-Item 1A, S-Item 9,10). Die Anzahl an sprachlichen Hilfestellungen wird von der Mehrheit als weitestgehend ausreichend angesehen (vgl. B-Item 7A, S-Item 12). In Item 11 des S-Fragebogens gaben 47% der Lernenden an, dass sie Probleme hatten, einzelne englische Begrifflichkeiten zu verstehen. Hier könnten neben ausliegenden Wörterbüchern und Postern mit englischen Laborgeräten auf den Arbeitsmaterialien noch mehr Annotationen bereitgestellt bzw. Audiodateien sowie Glossare zur Verfügung gestellt werden. Dies wurde im zweiten und dritten Iterationszyklus umgesetzt.

Tabelle 40. Ausgewählte Beobachter- und Schülerinnen-Items zu sprachlicher Angemessenheit

Beobachter-Items sprachliche Angemessenheit									
B-Item 1A: Die Kollegin hat Materialien eingesetzt, die sprachlich knapp über dem Niveau der Schüler/innen lagen.	Alle Beobachtenden (Beobachter 1, 2 und Lehrperson) stimmten der Aussage des Items eher zu .								
B-Item 7A: Die Schüler/innen hätten mehr sprachliche Hilfestellungen benötigt.	Beobachter 1 stimmte dem Item eher nicht zu , die Lehrperson gab an nicht zuzustimmen . Beobachter 2 machte keine Angabe .								
Schülerinnen-Items sprachliche Angemessenheit									
S-Item 10: Ich hatte Probleme beim Verstehen der Versuchsbeschreibungen auf Englisch.	 <table border="1"> <caption>Student Responses to S-Item 10</caption> <thead> <tr> <th>Response</th> <th>Percentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>stimme nicht zu</td> <td>70%</td> </tr> <tr> <td>stimme teilweise zu</td> <td>24%</td> </tr> <tr> <td>stimme überwiegend zu</td> <td>6%</td> </tr> </tbody> </table>	Response	Percentage	stimme nicht zu	70%	stimme teilweise zu	24%	stimme überwiegend zu	6%
Response	Percentage								
stimme nicht zu	70%								
stimme teilweise zu	24%								
stimme überwiegend zu	6%								


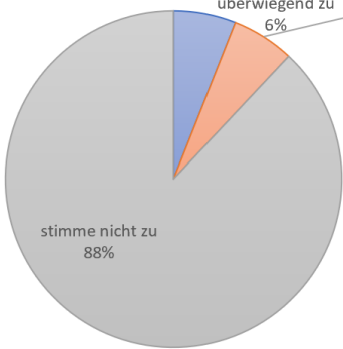
<p>S-Item 11: Ich hatte Probleme beim Verstehen einzelner englischer Begriffe.</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Antwort</th> <th>Prozent</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>stimme nicht zu</td> <td>47%</td> </tr> <tr> <td>stimme teilweise zu</td> <td>47%</td> </tr> <tr> <td>stimme überwiegend zu</td> <td>6%</td> </tr> </tbody> </table>	Antwort	Prozent	stimme nicht zu	47%	stimme teilweise zu	47%	stimme überwiegend zu	6%
Antwort	Prozent								
stimme nicht zu	47%								
stimme teilweise zu	47%								
stimme überwiegend zu	6%								
<p>S-Item 12: Ich hätte mehr sprachliche Hilfestellungen benötigt.</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Antwort</th> <th>Prozent</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>stimme nicht zu</td> <td>94%</td> </tr> <tr> <td>stimme überwiegend zu</td> <td>6%</td> </tr> </tbody> </table>	Antwort	Prozent	stimme nicht zu	94%	stimme überwiegend zu	6%		
Antwort	Prozent								
stimme nicht zu	94%								
stimme überwiegend zu	6%								

Experimentell traten im Laufe der Erprobung Schwierigkeiten auf. Beim Absorptionsversuch (vgl. 4.4.2.3) konnten in einigen Gruppen keine eindeutigen Effekte beobachtet werden. Beim Experiment „Kohleflöze“ (vgl. 4.4.2.5) gab es Schwierigkeiten beim Umgang mit der Sprizentechnik und Unklarheiten durch die Formulierung der Versuchsdurchführung. Die Materialien müssen entsprechend angepasst und die Anleitung an diesen Stationen durch die Betreuenden intensiviert werden.

Die inhaltliche Auswertung der Versuche war für die Lernenden unterschiedlich herausfordernd. Dies bestätigten die Schülerinnen in ihrem Antwortbogen (vgl. Tabelle 41, S-Item 5). Dennoch sprachen sich alle Beteiligten dafür aus, dass nicht unbedingt zusätzliche inhaltliche Hilfestellungen benötigen würden (vgl. B-Item 9B, S-Item 13). In Items 8 und 9 bestätigten die Lernenden außerdem, dass die Materialien sowohl übersichtlich als auch verständlich gestaltet waren. Dies bekräftigt, dass das Grundprinzip und die Struktur der Materialien beibehalten werden können. Es ist zu prüfen, ob sie jedoch noch von einem gezielten Medieneinsatz (z.B. digitales Laborjournal, Einsatz QR-Codes) weiter profitieren könnten. Die grundlegenden fachlichen Inhalte der Experimente, im Speziellen, die Rolle von Kohlenstoffdioxid in den Experimenten wurde von den Lernenden grundlegend verstanden (vgl. B-Item 10B, S-Item 7).

Tabelle 41. Ausgewählte Beobachter- und Schülerinnen-Items zu Experimenten und Materialgestaltung

Beobachter-Items Experimente									
B-Item 4B: Die Beantwortung der Auswertungsfragen fiel den Schüler/innen schwer.	Alle Beobachtenden (Beobachter 1, 2 und Lehrperson) stimmten der Aussage des Items eher nicht zu .								
B-Item 9B: Die Schüler/innen hätten mehr inhaltliche Hilfestellungen (z.B. Hilfekarten) benötigt.	Bei diesem Item stimmten Beobachter 1 und die Lehrperson eher nicht zu . Beobachter 2 machte zu dem Item keine Angabe .								
B-Item 10B: Die Schüler/innen konnten die Rolle von Kohlenstoffdioxid in den Stationen/Experimenten benennen.	Alle Beobachtenden (Beobachter 1, 2 und Lehrperson) stimmten der Aussage des Items eher zu .								
Schülerinnen-Items Experimente und Materialgestaltung									
S-Item 5: Die fachliche Auswertung der Experimente fiel mir schwer.	 <table border="1"> <caption>Response Data for S-Item 5</caption> <thead> <tr> <th>Response</th> <th>Percentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>stimme nicht zu</td> <td>42%</td> </tr> <tr> <td>stimme teilweise zu</td> <td>42%</td> </tr> <tr> <td>stimme überwiegend zu</td> <td>18%</td> </tr> </tbody> </table>	Response	Percentage	stimme nicht zu	42%	stimme teilweise zu	42%	stimme überwiegend zu	18%
Response	Percentage								
stimme nicht zu	42%								
stimme teilweise zu	42%								
stimme überwiegend zu	18%								
S-Item 7: Ich habe nicht verstanden welche Rolle CO ₂ in den Experimenten spielt.	 <table border="1"> <caption>Response Data for S-Item 7</caption> <thead> <tr> <th>Response</th> <th>Percentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>stimme nicht zu</td> <td>88%</td> </tr> <tr> <td>stimme zu</td> <td>6%</td> </tr> <tr> <td>stimme überwiegend zu</td> <td>6%</td> </tr> </tbody> </table>	Response	Percentage	stimme nicht zu	88%	stimme zu	6%	stimme überwiegend zu	6%
Response	Percentage								
stimme nicht zu	88%								
stimme zu	6%								
stimme überwiegend zu	6%								
S-Item 8: Die Materialien waren übersichtlich gestaltet.	 <table border="1"> <caption>Response Data for S-Item 8</caption> <thead> <tr> <th>Response</th> <th>Percentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>stimme zu</td> <td>82%</td> </tr> <tr> <td>stimme überwiegend zu</td> <td>18%</td> </tr> </tbody> </table>	Response	Percentage	stimme zu	82%	stimme überwiegend zu	18%		
Response	Percentage								
stimme zu	82%								
stimme überwiegend zu	18%								

S-Item 9: Die Materialien waren verständlich gestaltet.	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Antwort</th> <th>Anteil</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>stimme zu</td> <td>70%</td> </tr> <tr> <td>stimme überwiegend zu</td> <td>30%</td> </tr> </tbody> </table>	Antwort	Anteil	stimme zu	70%	stimme überwiegend zu	30%		
Antwort	Anteil								
stimme zu	70%								
stimme überwiegend zu	30%								
S-Item 13: Ich hätte mehr inhaltliche Hilfestellungen benötigt.	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Antwort</th> <th>Anteil</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>stimme nicht zu</td> <td>88%</td> </tr> <tr> <td>stimme teilweise zu</td> <td>6%</td> </tr> <tr> <td>stimme überwiegend zu</td> <td>6%</td> </tr> </tbody> </table>	Antwort	Anteil	stimme nicht zu	88%	stimme teilweise zu	6%	stimme überwiegend zu	6%
Antwort	Anteil								
stimme nicht zu	88%								
stimme teilweise zu	6%								
stimme überwiegend zu	6%								

Befragt nach einer Einschätzung des Kurses gaben 11 der 17 Schülerinnen an, dass der Kurs interessant für sie war. Einige Lernende nutzen auch das Freitextfeld um eine Rückmeldung zu geben. Exemplarisch seien hier zwei Antworten von Schülerinnen herausgegriffen: „Ein sehr schöner Kurs der Abwechslung mitbringt und einen gleichzeitig herausfordert“ und „Der Kurs hat mir gut gefallen und ich konnte viel mitnehmen.“

Die Beobachtenden wurden spezifischer nach einer Bilanzierung der sprachlichen und experimentellen Elemente des Kurses befragt. Sie stimmen weitestgehend zu, dass das Unterrichtsangebot sprachlich angemessen war (vgl. Tabelle 42, B-Item 9A). Die zweisprachige Beschriftung von Chemikalien und der Einsatz des Lab Equipment Posters (siehe Anhang 4: SommerUni 2022) mit Bildern und englischen Bezeichnungen der Laborgeräte wurde von zwei Beobachtenden als sinnvoll wahrgenommen (vgl. B-Item 10A). Der Einsatz der englischen Sprache in den Gruppenphasen war einigen Betreuenden nicht klar genug umgesetzt (vgl. B-Item 10A Beobachter 2). Eine vermehrte englische Sprachverwendung der Schülerinnen könnte durch ein gezieltes Frage- und Anspracheverhalten auf Englisch von den Betreuenden noch gesteigert werden.

Tabelle 42. Beobachter-Items zur Bilanzierung der sprachlichen Elemente

Beobachter-Items Sprache Bilanz	
B-Item 8A: Die Einheit enthielt sprachliche anregende Elemente für die Schülerinnen und Schüler.	Beobachter 1 und Lehrperson stimmten dem Item zu . Beobachter 2 gab an eher nicht zuzustimmen .
B-Item 9A: Im Hinblick auf die unterschiedlichen Sprachvoraussetzungen der Schüler/innen war das Unterrichtsangebot angemessen.	Die Lehrperson stimmte den Angaben zu . Beobachter 1 und 2 stimmten eher zu .
B-Item 10A Freitext Lehrperson: <ul style="list-style-type: none"> • Beschriftung von spez. Geräte-/Chemikalienflaschen zweisprachig beibehalten • Lab Equipment Poster beibehalten • S gezielt auf Englisch antworten und ansprechen, um englische Gespräche zu initiieren (dies gilt auch für Betreuer) • Betreuende sollten weniger eng agieren und Lernenden machen lassen (besonders Gruppe B) 	
B-Item 10A Freitext Beobachter 1: <ul style="list-style-type: none"> • (+) Lab Equipment Poster wird genutzt, • (+) zweisprachige Beschriftung von Chemikalien • (!) Gruppe spricht untereinander Englisch 	
B-Item 10A Freitext Beobachter 2: <ul style="list-style-type: none"> • The students responded in English when addressed in English. • In the groups, by themselves, the preferred language was German. • The students were softspoken. The students don't speak much in general, especially in the beginning. 	

Die experimentelle Arbeit wurde mehrheitlich als motivierend und für die Lerngruppe angemessen wahrgenommen (vgl. Tabelle 43, B-Item 11b, 12B). An Station 2 und 3 gab es einige Schwierigkeiten beim Umgang mit den Gerätschaften (vgl. B-Item 13B Lehrkraft), der Versuchsbeschreibung (vgl. B-Item 13B Beobachter 2) und den zu beobachtbaren Ergebnissen (vgl. B-Item 13B Beobachter 1). Diese Anmerkungen werden bei der Optimierung der Materialien für die nächste Iterationsschleife berücksichtigt, indem z.B. spezifische Anleitungen zur Nutzung von Spritzentechnik erstellt werden.

Tabelle 43. Beobachter-Items zur Bilanzierung der Experimente

Beobachter-Items Experimente Bilanz	
B-Item 11B: Die Einheit enthielt experimentelle Elemente, die für Schülerinnen und Schüler motivierend waren.	Beobachter 1 und die Lehrperson stimmten den Angaben zu . Beobachter 2 gab an eher zuzustimmen .
B-Item 12B: Im Hinblick auf die unterschiedlichen Voraussetzungen der Schüler/innen waren die ausgewählten Experimente angemessen.	Die Lehrperson stimmte zu , während Beobachter 1 und 2 dem Item eher zustimmten .
B-Item 13B Freitext Lehrperson : <ul style="list-style-type: none"> • Schwierigkeiten bei Versuch [Station] 2 und 3 (Flaschengröße, Menge NaOH, Menge Aktivkohle); liefern keine eindeutigen Ergebnisse und müssen überarbeitet werden • S hatten Schwierigkeiten mit Medizintechnik und Kolben (neue Geräte) zusätzliche Begleitung nötig 	
B-Item 13B Freitext Beobachter 1 : <ul style="list-style-type: none"> • Innerhalb der Gruppen erfolgt eine fachliche Klärung (z.T. durch stärkere Schülerinnen geführt) • (!) Schülerinnen scheinen das direkte Gespräch mit Betreuenden zu bevorzugen. • [Station 2] Messzylinder und kleines Becherglas, kleinere Flaschen oder mehr CO₂? 	
B-Item 13B Freitext Beobachter 2 : <ul style="list-style-type: none"> • [Station 3] Disconnect between instruction and what experimentally needs to be done (step 7/8). • [Station 3] Too much activated carbon in instruction • [Station 3] Give instructions on how to test whether the apparatus is "airtight". 	

Die Rückmeldungen der Lehrkraft aus dem Selbstreflexionsbogen stellten den hohen Sprechanteil der Lernenden innerhalb des Lernangebots heraus. Die Arbeitsaufträge wurden als verständlich wahrgenommen und nötige Lernhilfen passend eingesetzt.

Auf Grund der Kürze der Intervention blieb für die Auswertung der Ergebnisse in der Plenumsphase wenig Zeit und diese verblieb inhaltlich oberflächlich. Für zukünftige Vorhaben wäre es hier sinnvoll, mehr Zeit für die Sicherungs- und Transferphase einzuplanen und Inhalte schriftlich zu fixieren und ggf. zu diskutieren.

Durch die Erprobungen im Rahmen der SommerUni konnten Impulse für die Weiterarbeit in der zweiten und dritten Iterationsschleife gewonnen werden. Einige studentische Betreuende äußerten fachliche und sprachliche Unsicherheiten während der Intervention. Die sich beispielsweise darin äußerten, dass einige von ihnen nicht in der Lage waren den Lernenden Versuchsbeobachtungen zu erläutern. Für weitere Interventionen sollten alle Betreuenden noch genauer inhaltlich und sprachlich auf das Angebot vorbereitet werden. Es ist nicht ausreichend den Studierenden eine Woche vor Beginn der Erprobung die Arbeitsmaterialien zur Verfügung zu stellen. Für weitere Iterationsschleifen sollten die Betreuenden ein kleines Training durchlaufen, bevor sie an dem Vorhaben teilnehmen, damit sie ihre Unterstützung zielführend gestalten können.

Grundlegend war diese erste Erprobung sehr gewinnbringend. Die Rückmeldungen der Lernenden und Beobachtenden bestärkten den Eindruck eines gelungenen Angebots, welches in einigen Bereichen noch genauer ausgeschärft werden muss (vgl. Tabellen 40-43).

Aus der Erprobung ergaben sich auch Impulse für die weitere Umsetzung der Forschungsmethodologie. Die Beobachtungsbögen sollten für die nächste Iterationsschleife noch detaillierter auf das Forschungsvorhaben angepasst werden. Dabei wurde deutlich, dass die hospitierenden Personen maximal eine experimentierende Gruppe (Station) umfassend beobachten können. Die Befragungsinstrumente der verschiedenen Beteiligten sind nur vergleichbar, wenn auch die Items vergleichbar formuliert sind. Das war z.B. im Schülerfragebogen nicht immer der Fall, was eine Auswertung der Daten erschwerte. Auch hier müssen Anpassungen vorgenommen werden. Die Erfragung von Fachbegriffen zum Thema Kohlenstoffdioxid lieferte im Prä-/Post Design keine signifikanten Ergebnisse. Statt der Begrifflichkeiten sollte ein Prä/Post-Wissenstest eingeführt werden, da dieser eine Auswertung erleichtert. Diese Aspekte werden für zukünftige Untersuchungen angepasst.

5.2.2 MINT-Tag NRW in Bottrop

Das Bildungswerk der nordrhein-westfälischen Wirtschaft organisiert jährlich den MINT-Tag NRW, ein Netzwerk-Tag, an dem Vertreterinnen und Vertreter aus allen drei Phasen der LehrerInnenbildung zusammentreffen, um sich in Workshops fachliche, unterrichtliche und experimentelle Impulse zu geben.

In Zusammenarbeit mit Julian Venzlaff (zum derzeitigen Zeitpunkt Doktorand in der Chemiedidaktik der BUW) wurde im Rahmen des MINT-Tages NRW 2022 ein Workshop unter dem Titel „BNE und Chemieunterricht – Von der Leitlinie BNE zur exemplarischen Unterrichtseinbindung“ angeboten. Nach einer kurzen inhaltlichen Inputphase zur Leitlinie BNE und dem im Arbeitskreis entwickelten Verlaufsplan (vgl. 4.1.4), bekamen die Lehrkräfte in der Gruppenphase verschiedene BNE-Unterrichtsvorhaben mit Experimenten und passenden Materialien zur Sichtung und zur Erprobung vorgelegt. Drei von vier Stationen befassten sich mit der Unterrichtssequenz *Carbon Capture and Storage*. Die Lehrkräfte sichteten bilinguale und deutsche Arbeitsmaterialien zu dem Thema und konnten das Modellexperiment Kohleflöze ausprobieren (siehe Abbildung 150). Im Anschluss an die Gruppenphasen wurden die Lehrpersonen mit Hilfe eines Fragebogens zu ihren Eindrücken befragt.

Der Fragebogen setzte sich aus bereits etablierten Items eines zuvor im Arbeitskreis eingesetzten Fragebogens [295, S.255], sowie Items der bereits in 4.1.4 beschriebenen BNE-Umfrage zusammen. Dabei wurden hauptsächlich geschlossene Likert-Items verwendet, die eine Evaluation der verwendeten Materialien und Experimente ermöglichen sollten. Zusätzlich bestand die Option, zu einigen Fragen Begründungen oder Bemerkungen zu ergänzen. Am Ende des Fragebogens konnten weitere Aspekte in einem Freitextfeld erwähnt werden. Der Fragebogen und die verwendeten Arbeitsmaterialien können im Anhang 4 dieser Arbeit eingesehen werden.

An dem Workshop nahmen 14 MINT-Gymnasiallehrkräfte teil, die eine durchschnittliche Lehrerfahrung von 18 Jahren hatten. Acht von 14 Teilnehmenden war die BNE Leitlinie bereits bekannt und 10 der 14 Teilnehmenden gaben an, dass sie bereits „BNE Themen“ in ihrem eigenen Unterricht z.B. zum Thema Klimawandel oder Energieversorgung umsetzen.

Befragt zum Themenbereich *Carbon Capture and Storage* gaben alle Teilnehmenden an, dass dieser zum aktuellen Oberstufenlehrplan NRW passt und sowohl für den Regelunterricht als auch für einen Ausflug in ein Schülerlabor geeignet sei.



Abbildung 150. (links) Aufbau einer Experimentier- und Materialstation, (rechts) Lehrkräfte beim Experimentieren

Da die Stationen im Workshop nur arbeitsteilig bearbeitet wurden, beziehen sich die folgenden Ausführungen auf die Antworten von acht Lehrkräften. Die deutschsprachigen Materialien wurden als mittelschwer bis schwer für die Lernenden eingeschätzt, wobei besonders die Arbeit mit Texten hervorgehoben wurde. Dies hat sich jedoch in den Machbarkeitsuntersuchungen mit Schülerinnen und Schülern nicht bestätigt (vgl. 5.1). Alle befragten Pädagogen ($n = 8$) würden das Material in ihrem Unterricht einsetzen und kleinere Adaptionen zur Erleichterung des Leseverständnisses etablieren (z.B. die Einführung von Zeilennummern und ein Glossar für Fachbegriffe).

Der Modellversuch wurde mit deutschsprachiger Versuchsbeschreibung als mittelschwer eingeschätzt. Dies hat sich in den Erprobungen mit Lernenden nur teilweise bestätigt (vgl. 5.2.1). Insgesamt ordneten die Lehrkräfte die Arbeitsmaterialien zum Versuch im mittleren Schwierigkeitsbereich ein, dabei wurden die Versuchsdurchführung und -Auswertung als schwieriger angesehen als die Beobachtung. Alle befragten Lehrkräfte ($n = 8$) würden das Experiment in ihrem Unterricht einsetzen. Als potenzielle Hürden für den Einsatz in der Schule wurden fehlende Materialien und Chemikalien, eventuelle Kosten und der Faktor Zeitaufwand angegeben.

Die bilingualen Materialien wurden als mögliche Ergänzung für den Einsatz in internationalen Vorbereitungsklassen (IVK-Klassen)¹⁹⁶ vorgeschlagen. Die Mehrzahl der teilnehmenden Lehrkräfte hat das bilinguale Material nicht gesichtet bzw. keine Rückmeldung im Fragebogen gegeben. Nur eine Teilnehmerin füllte diesen Teil des Fragebogens aus. Die befragte Person verfügt über Lehrerfahrung im bilingualen Chemieunterricht und würde das Material in ihrem Unterricht einsetzen. Die Schwierigkeit für die Lernenden schätzt sie, ähnlich wie die des deutschen Materials, als mittelschwer ein.

Bilanzierend lässt sich festhalten, dass die Lehrkräfte dieses Workshops die Thematik CCS an die Inhalte des Kernlehrplans NRW anbindbar hielten und die Praktikabilität des Experiments Kohleflöze sowie die dazugehörigen deutschen Materialien bestätigt haben. Auf Grund des Material- und Zeitaufwands würde eine Mehrzahl der Lehrkräfte diese zwar im eigenen Unterricht einsetzen, aber auch verstärkt für deren Einsatz in einem Schülerlabor plädieren.

¹⁹⁶ **Internationale Vorbereitungsklasse (IVK)** in NRW auch oft synonym verwendet mit den Begrifflichkeiten Seiteneinstiegsklasse und Internationalen Förderklasse (IFK). Gemeint sind meist sehr heterogene Lerngruppen, die an Regelschulen die deutsche Sprache erwerben. Ziel dieser Klassen ist die Erreichung einer schnellen Integration in den Regelunterricht und das Erlangen eines Schulabschlusses.

Weiterhin gab es kleinere Adaptionsideen für den Bereich des Leseverstehens z.B. das Einfügen einer Zeilennummerierung, die für die nächste Iterationsschleife eingearbeitet werden können. Nichtsdestotrotz wurde der Schwierigkeitsgrad im Plenumsgespräch mit den Lehrkräften als relativ hoch eingeschätzt. Dies hat sich in den Erprobungen mit Schülerinnen in Schülern im Schul- bzw. Laborsetting nur bedingt bestätigt (vgl. 5.1, 5.2.1).

Vielleicht liegt diese Einschätzung auch in der etwas anderen Aufbereitung und Gestaltung der BNE-Materialien begründet, die von „klassischen“ Arbeitsmaterialien für den Chemieunterricht abweichen. Die Kohorte der Lehrkräfte hatte als Zweitfach überwiegend ein MINT-Fach, weshalb Aspekte z.B. des sprachsensiblen Unterrichts oder der Arbeit mit Lesetexten für die Lehrkräfte noch etwas ungewohnt sein könnten und deshalb als potenziell schwieriger eingeschätzt werden. Trotzdem sind sowohl die Thematik als auch die verwendeten Materialien und Experimente anspruchsvoll für Lernende und sollten in einem Schülerlaborsetting durch weitere Maßnahmen z.B. eine bebilderte Versuchsanleitung und Unterstützung durch betreuende Studierende ergänzt werden, um den allgemeinen Schwierigkeitsgrad zu senken. Diese Anpassungen wurden in den weiteren Iterationen berücksichtigt (siehe 5.3 und 5.4).

Ähnliche Ergebnisse liegen aus den Rückmeldungen der bilingualen Lehrkraft zu den bilingualen Materialien vor. Die Praktikabilität der Materialien wurde bestätigt, aber hier auch ein gewisser Schwierigkeitsgrad attestiert.

Diese Einschätzung wurde aber bei den erfolgten Erprobungen nicht bestätigt und die Notwendigkeit von weiteren Hilfestellungen von den Lernenden verneint (vgl. 5.2.1). Weitere Erprobungen mit Lernenden werden notwendig sein, um die Details auszuscharfen (siehe 5.3).

Eine weitere Lehrkräftefortbildung sollte im Rahmen des *3. Tag des bilingualen Unterrichtens* an der Bergischen Universität Wuppertal am 10.02.23 stattfinden. Die Arbeitsgruppe *Bilinguales Lernen und Lehren* lädt dazu jährlich Lehrkräfte, Forscherinnen und Forscher und Studierende, in Impulsvorträgen und Workshops ein, Perspektiven zur Gestaltung von bilinguaalem Unterricht zu erhalten und sich auszutauschen.

Mit dem Workshop „Carbon Capture and Storage – Eine Unterrichtssequenz für den BNE-bezogenen bilingualen Chemieunterricht“ sollte sich hier die Gelegenheit bieten mit naturwissenschaftlichen Lehrkräften mit bilingualer Unterrichtserfahrung über die Eignung und Gestaltung der entwickelten Materialien und Experimente ins Gespräch zu kommen. Leider entfiel das gesamte Fortbildungsangebot auf Grund einer zu geringen Anzahl an Teilnehmenden.

5.3 Zweiter Iterationszyklus (2023-2024)

In diesem Abschnitt werden die Erprobungen des zweiten Iterationszyklus beschrieben. In dieser Iterationsschleife wurden zwei Kurse für Lernende im Rahmen der SommerUni durchgeführt. Außerdem wurde die Perspektive der Lehrkräfte in zwei Lehrkräftefortbildungen erfragt. Zu den Erhebungen werden folgende praktisch-konzeptionelle Forschungsfragen (FF) formuliert:

SommerUni 2023-2024 (bilinguale Materialien)

(FF1) Waren die ausgewählten Experimente von den Lernenden durchführbar und lieferten sie eine klare Beobachtung?

(FF2) Waren die Materialien aus der Perspektive der Lernenden übersichtlich und verständlich gestaltet?

(FF3) Werden mehr sprachliche und inhaltliche Hilfestellungen für die Lernenden benötigt?

Lehrkräftefortbildungen (deutschsprachige und bilinguale Materialien)

(FF4) Wie schätzen Lehrkräfte die Anbindbarkeit der Thematik an den aktuellen KLP ein?

(FF5) Wie schätzen Lehrkräfte die Eignung der Thematik für verschiedene schulische Bereiche ein?

(FF6) Würden Lehrkräfte die entwickelten Materialien und Experimente in ihrem eigenen Unterricht einsetzen?

5.3.1 SommerUni 2023 und 2024


Mit den Erkenntnissen aus der ersten Iterationsschleife wurden einige Änderungen an den Materialien und Experimentierstationen vorgenommen.

Adaptionen der Materialien und des Ablaufs

Das Kursangebot wurde auf 10 Stationen erweitert (siehe Tabelle 44). Zudem wurde der Laufzettel zur einfacheren Bearbeitbarkeit der Stationen optimiert. Jede Station wurde darauf mit einem Schwierigkeitsniveau versehen, welches die Lernenden bei ihrer Auswahl der zu bearbeitenden Station berücksichtigen können. Dies ermöglicht den Schülerinnen und Schülern eine freie inhaltliche Wahl und Schwerpunktsetzung je nach Interesse und Leistungsfähigkeit. Der Laufzettel zur Stationsarbeit und die Arbeitsmaterialien für die Lernenden sind im Anhang 5 zu finden.

Tabelle 44. Übersicht der Stationen in der SommerUni 2023 und 2024

Pflichtstationen
1) How Temperature Can Affect the Carbon Dioxide/Carbonic Acid Equilibrium.
2) Carbon Dioxide and Photosynthesis
3) Post-Combustion Capture -Absorption of Carbon Dioxide
4) Understanding CCS -Adsorption Potential of Carbon Dioxide
5) Direct Air Capture

Cool-down  (15 min)	Rückbezug zu den Laufzetteln und Klärung von Fragen Ergänzung der Mentimeter Word Cloud mit neuen Begrifflichkeiten (10)	Plenum	ppt. Laufzettel
	Post-Erhebung (5)	EA	Fragebogen

Bei der Materialgestaltung fanden einige Adaptionen statt. Es wurden optische Anpassungen des Layouts vorgenommen, um die Übersichtlichkeit zu steigern (vgl. Abbildung 152 rechts). Zur besseren Orientierung wurde das Material in Tabellenform mit farblichen Akzenten gestaltet. Darüber hinaus wurde ein Hilferand für sprachliche und fachliche Unterstützungsmaßnahmen integriert.


Station 1: How Does Temperature Affect the Carbon Dioxide/Carbonic Acid Equilibrium?

Material

Lab Equipment
stirring hot plate, balloon, 2 x 100 mL Erlenmeyer flasks, 1 x 1000 mL beaker, parafilm, finger protection

Chemicals
Bromothymol blue indicator solution, sparkling water, ice

Setup
Label the photo with the correct terms:
- Erlenmeyer flask, indicator solution, stirring hot plate, balloon -



Procedure

- Preheat the stirring hot plate to 200 °C.
- Fill two Erlenmeyer flasks with 50 mL of sparkling water each and add 4-5 drops of indicator solution to both flasks.

Both solutions should have the same colour!


Station 1 Experiment: How Does Temperature Affect the Carbon Dioxide/Carbonic Acid Equilibrium?

Material

Lab Equipment
stirring hot plate, balloon, 2 x 100 mL Erlenmeyer flasks, 1x 1000 mL beaker, parafilm, finger protection

Chemicals
Bromothymol blue indicator solution, sparkling water, ice

Setup
Label the photo with the correct terms:



Procedure

- Preheat the stirring hot plate to 200 °C.
- Fill two Erlenmeyer flasks with 50 mL of sparkling water each and add 4-5 drops of indicator solution to both flasks.

Both solutions should have the same colour!

Abbildung 152. Optische Adaptionen Arbeitsmaterial Station 1 links 2022, rechts 2023

Auf diesem Rand finden sich deutsch-englische Annotationen, Wordbanks mit hilfreichen Formulierungen und Wortimpulsen sowie Wortgeländer für mündliche Äußerungen. Im Jahr 2024 wurden die Stationen 1, 3, 4 und 5 in die Form eines digitalen Lernbegleiters übertragen (vgl. Abbildung 153).

Station 1: How Temperature Can Affect the Carbon Dioxide/Carbonic Acid Equilibrium

MATERIAL

Lab Equipment
stirring hot plate, balloon, 2 x 100 mL Erlenmeyer flasks, 1x 1000 mL beaker, parafilm, finger protection, *boiling stones*


Chemicals
Bromothymol blue indicator solution, sparkling water, ice

stirring hot plate: Magnetrührer mit Heizplatte
boiling stones: Siedesteine

Station 1: How Temperature Can Affect the Carbon Dioxide/Carbonic Acid Equilibrium

SETUP

Label the photo with the correct terms:



Erlenmeyer flask
indicator solution
sparkling water with indicator solution
balloon
stirring hot plate

Abbildung 153. Arbeitsmaterial Station 1 Version 2024 als DLB

Neben Anpassungen im Layout wurde 2023 bei den papierbasierten Arbeitsmaterialien und 2024 auch bei den digitalen E-Books auch ein verstärkter Fokus auf Differenzierung (vgl. Tabelle 46) gelegt, um die Zugänglichkeit des Lernangebots für Lernende mit und ohne bilinguale Vorerfahrungen einfacher zu ermöglichen. Zur Förderung des selbstständigen Lernens wurden Möglichkeiten zur Selbstkorrektur in Form von interaktiven Multiple-Choice Fragen oder Lösungsblättern eingeführt. Darüber hinaus standen leistungsstärkeren Lernenden Sprinter-Aufgaben zum Weiterdenken und optionale Stationen zur Verfügung. Leistungsschwächere Lernende erhielten Hilfekarten und zusätzliche Informationskarten, um fachliche Inhalte etwas besser nachvollziehen zu können. Außerdem wurden Hilfen für die Formulierung der Versuchsauswertung integriert.

Tabelle 46. Übersicht der implementierten Differenzierungsmaßnahmen

Station	Differenzierungsmaßnahme(n)
1) How Temperature Can Affect the Carbon Dioxide/Carbonic Acid Equilibrium.	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichkeit zur Selbstkorrektur mit interaktiven Multiple-Choice Fragen
3) Post-Combustion Capture -Absorption of Carbon Dioxide	<ul style="list-style-type: none"> • Gestufte Hilfekarten für die Auswertung • Möglichkeit zur Selbstkorrektur mit Lösungsblatt • Sprinter-Aufgabe mit Lösung in Spiegelschrift
4) Understanding CCS -Adsorption Potential of Carbon Dioxide	<ul style="list-style-type: none"> • Infokarten für zusätzlichen fachlichen Input • Möglichkeit zur Selbstkorrektur mit Lösungsblatt • Sprinter-Aufgabe mit Lösung in Spiegelschrift
5) Direct Air Capture	<ul style="list-style-type: none"> • Formulierungshilfen für die Auswertung und zur Schulung des Hör/Sehverstehens

Als laborpraktische Hilfen wurden Anleitungen zum Umgang mit Parafilm, sowie Spritzentechnik (vgl. Abbildung 154) und im Jahr 2024 bebilderte Versuchsanleitungen hinzugefügt.

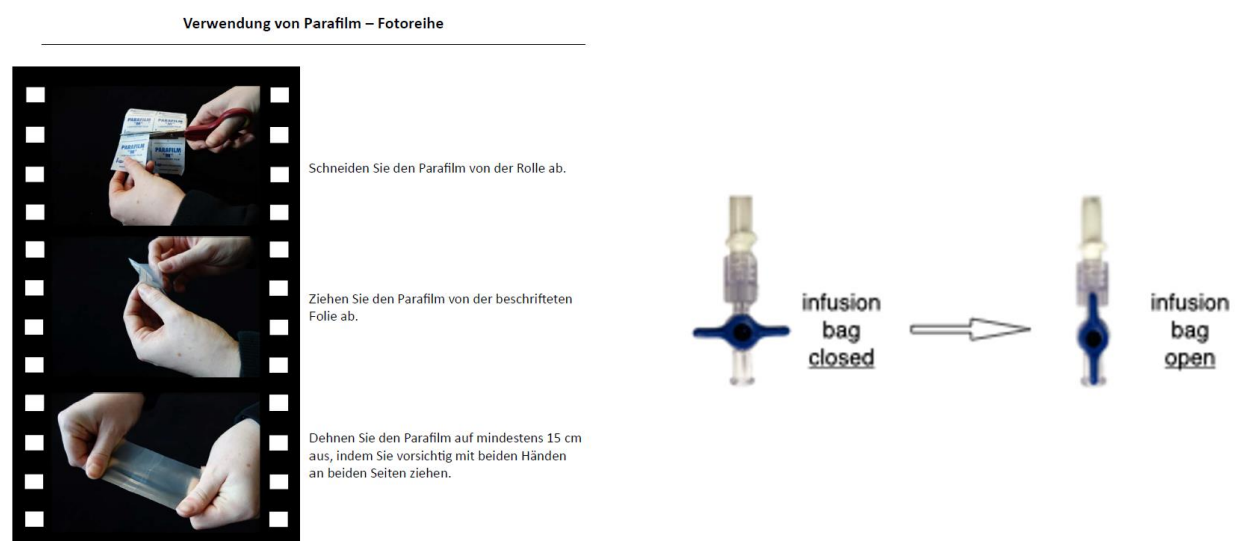


Abbildung 154. Laborpraktische Hilfen (links Parafilm, rechts Umgang mit Spritzentechnik)

Erprobungen

In den Jahren 2023 und 2024 wurden jeweils zwei Kurse im Rahmen des SommerUni-Programms mit Schülerinnen durchgeführt. Impressionen aus den Erprobungen können der Abbildung 155 entnommen werden.



Abbildung 155. Impressionen aus der SommerUni 2023 (oben) und 2024 (unten)

Die Kohorten setzten sich aus Schülerinnen zusammen, die das Kursangebot aus eigenem Interesse wählten. Insgesamt wurden vier Kurse für 76 Teilnehmerinnen angeboten (vgl. Tabelle 47). Der Großteil der Schülerinnen besuchte ein Gymnasium. Die Mehrheit der Lernenden hatte keine Vorerfahrungen mit bilingualen Unterricht.

Tabelle 47. Übersicht der Kohorten der SommerUni-Angebote 2023 und 2024

	2023	2024
Erhebungen	14. und 15.06.23	26. und 27.06.24
Kohorte	n = 34	n = 42
Bilinguale Vorerfahrungen	26%	36%
Schulform	5x Gesamtschule 28x Gymnasium 1x Berufskolleg	9x Gesamtschule 33x Gymnasium
Klassen	9-12	10-12

Ziel der Untersuchungen der zweiten Iterationsschleife war es, drei experimentelle Stationen in den Blick zu nehmen. Eine Fokussierung auf einzelne Gruppen und Inhalte sollte die Beobachtung der Prozesse erleichtern und konkretere Erkenntnisse zu den entwickelten Arbeitsmaterialien und Experimenten liefern. Dabei sollten die Beobachtenden die Realisierbarkeit der Versuche und den Umgang der Lernenden mit dem Material analysieren. Zur besseren Vorbereitung wurden die Beobachter mit einem Informationsschreiben vor der Intervention informiert (siehe Anhang 5: SommerUni 2023-2024). Der Beobachtungsbogen wurde überarbeitet und speziell auf die Experimentierstationen 3, 4 und 5 und deren Materialangebot zugeschnitten (vgl. Anhang 5). Darüber hinaus wurde darauf geachtet, die Lernenden- und Beobachtenden-Items noch genauer aufeinander abzustimmen, um eine spätere Auswertung der Daten zu erleichtern.

Die Daten zur Erprobung wurden erneut in Anlehnung an die Triangulation erhoben (vgl. Abbildung 156). Die Lernenden wurden vor und nach der Intervention mit Hilfe eines Fragebogens mit vierstufiger Likert-Skala und offenen Items befragt.

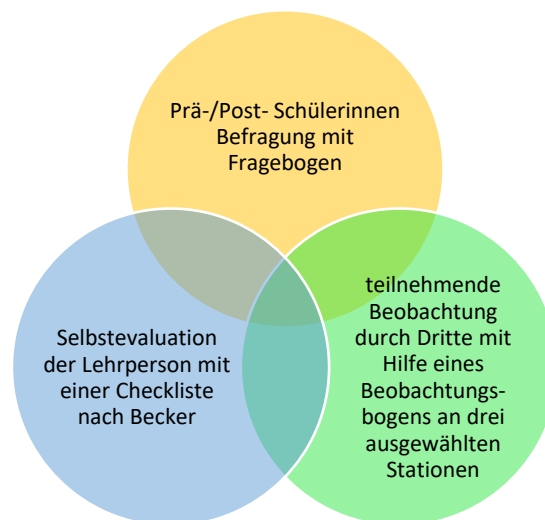


Abbildung 156. Erhebungsinstrumente der Triangulation in der SommerUni 2023 und 2024

Die drei Experimentierstationen wurden von jeweils einem/einer Lehramtsstudierenden teilnehmend beobachtet. Der strukturierte Beobachtungsbogen enthielt für jede Station spezifisch formulierte Likert-Items mit vierstufiger Skala und offenen Antwortoptionen. Die Lehrperson füllte nach der Intervention einen Selbstevaluationsbogen aus.

Ergebnisse

Drei der Experimentierstationen wurden explizit für eine genauere Betrachtung ausgewählt, weil es in früheren Erprobungen zu Schwierigkeiten bei der Handhabung der Experimente kam. Außerdem sollten neue Aufgabenformate (z.B. Hör-Sehverstehen, Selbstkorrekturformate) erprobt werden. Schwerpunkte der Beobachtung waren die Verständlichkeit und Lösbarkeit der Aufgaben sowie die Notwendigkeit des Einsatzes inhaltlicher und sprachlicher Hilfen. Auf Grund der Erkenntnisse aus den Erprobungen der ersten Kurse im Jahr 2023, wurden Anpassungen an den Materialien und Beobachtungsbögen vorgenommen. Folglich weicht die Gestaltung der Materialien und Items der Beobachtungsbögen der Jahre 2023 und 2024 etwas voneinander ab. Die teilweise geringen Teilnehmendenzahlen an einigen Stationen sind deren zeitlichem Umfang geschuldet.

Je umfangreicher, desto weniger Lernende konnten die Station innerhalb des verfügbaren Zeitkontingents durchlaufen. Auf Grund der geringen Stichprobenzahlen sind die Ergebnisse nicht generalisierbar, geben aber die Perspektive der Lernenden und Beobachtenden auf die Experimente und sprachlichen sowie inhaltlichen Hilfestellungen wieder. Grundlegend ließ sich jedoch innerhalb der erfragten Items eine geringe Streuung feststellen, weshalb aus den Antworten der Lernenden der Mittelwert gebildet wurde, um einen besseren Einblick zu liefern. Diese Vorgehensweise ist jedoch auf Grund der geringen Teilnehmendenzahlen nicht unproblematisch, auf Grund der Datenlage jedoch nur schwer anders darstellbar.

Station 3 beinhaltete einen Infotext und ein Experiment zur Absorption von Kohlenstoffdioxid (vgl. 4.4.2.3). Mit Hilfe der bereitgestellten Inhalte, sollte den Lernenden das Verfahren der *Post-Combustion Capture* vermittelt werden. In Tabelle 48 sind ausgewählte Items der Erprobungen gegenübergestellt. Lernenden- und Beobachtenden-Items sind direkt untereinander angegeben, um eine Vergleichbarkeit zu erleichtern. Aus den Rückmeldungen wurden Mittelwerte gebildet, die in der Tabelle aufgetragen sind. Abweichungen zwischen Beobachtenden (B) und Schülerinnen (S) um mehr als 1 sind rot markiert.

Tabelle 48. Ausgewählte Items der Station 3 aus Schülerinnen und Beobachtendenperspektive

Station 3: Post-Combustion Capture	2023 (S n= 20, B n = 2)	2024 (S n = 23, B n = 2)
Items	Mittelwert der Angaben (1) stimme zu - (4) stimme nicht zu	Mittelwert der Angaben (1) stimme zu - (4) stimme nicht zu
Experiment		
S1: Ich konnte die Experimente durchführen.	Ø 1,1	Ø 1,2
B7: Die Lernenden konnten das Experiment durchführen.	Ø 1,0	Ø 1,5
S2: Die Experimente lieferten eine klare Beobachtung.	Ø 1,5	Ø 1,4
B8: Das Experiment lieferte den SuS eine klare Beobachtung.	Ø 1,0	Ø 1,5
Sprachliche Unterstützung		
S5: Ich habe die sprachlichen Hilfestellungen (Word Banks...) genutzt.	Ø 2,8	Ø 3,6
B12: Die Lernenden nutzen die sprachlichen Hilfestellungen.	Ø 2,0	Ø 2,5
S6: Ich hätte mehr sprachliche Hilfestellungen (z.B. Übersetzungen) benötigt.	Ø 3,5	Ø 3,9
B20: Die Lernenden hätten mehr sprachliche Hilfestellungen (z.B. Übersetzungen, Formulierungshilfen, Worterklärungen) benötigt.	Ø 3,5	Ø 4,0
Inhaltliche Unterstützung und Bearbeitung		
S3: Die Beantwortung der Auswertungsfragen fiel mir schwer.	Ø 3,2	Ø 3,4
B10: Die Beantwortung der Auswertungsfragen fiel den Lernenden schwer.	Ø 2,5	Ø 3,0

S4: Ich habe die inhaltlichen Hilfestellungen (Help bzw. Info Cards) genutzt.	Ø 2,1	Ø 2,5
B11: Die Lernenden nutzen die inhaltlichen Hilfestellungen (Help Cards).	Ø 1,5	Ø 2,0
S7: Ich hätte mehr inhaltliche Hilfestellungen (z.B. Tipp/Infokarten) benötigt.	Ø 3,1	Ø 3,1
B17: Die Lernenden hätten mehr inhaltliche Hilfestellungen (z.B. Hilfekarten) benötigt.	Ø 4,0	Ø 3,0

Der Versuch zur Absorption von Kohlenstoffdioxid konnte von den Lernenden durchgeführt werden und lieferte eine klare Beobachtung (vgl. Item S1-S2/B7-B8). Sprachliche Hilfestellungen wurden von den Lernenden genutzt (vgl. Item S5/B12), weitere sprachliche Unterstützung wurde sowohl nach Aussagen der Lernenden und der Beobachtenden nicht benötigt (vgl. Item S6/B20). Die inhaltlichen Hilfestellungen wurden verwendet (vgl. Item S4/B11), weitere inhaltliche Hilfen wurden nicht benötigt (vgl. Item S7/B17).

Bei der Bilanzierung der Station 3 (vgl. Tabelle 49), schätzen die Beobachtenden das ausgewählte Experiment und das Unterrichtsangebot in beiden Jahren als angemessen ein (vgl. Item B24/19, B26/20).

Tabelle 49. Bilanzierung Station 3 aus Beobachtendenperspektive

Station 3: Post-Combustion Capture	2023 (B n = 2)	2024 (B n = 2)
Items	Mittelwert der Angaben 1 stimme zu, 2- stimme eher zu, 3 – stimme eher nicht zu, 4- stimme nicht zu	Mittelwert der Angaben 1 stimme zu, 2- stimme eher zu, 3 – stimme eher nicht zu, 4- stimme nicht zu
Bilanz		
B24/18: Im Hinblick auf die unterschiedlichen Voraussetzungen der Lernenden war das ausgewählte Experiment angemessen.	Ø 1,5	Ø 1
B26/20: Im Hinblick auf die unterschiedlichen Sprachvoraussetzungen der Schüler/innen war das Unterrichtsangebot angemessen.	Ø 1,5	Ø 1,5

Station 4 beinhaltete im Jahr 2023 ein Video, einen Infotext und ein Modellexperiment zur Adsorption von Kohlenstoffdioxid in Kohleflözen (vgl. 4.4.2.5). Mit Hilfe der bereitgestellten Inhalte, sollte den Lernenden das Verfahren der geologischen Speicherung vermittelt werden.

In Tabelle 50 sind ausgewählte Items der Erprobungen gegenübergestellt. Das Modellexperiment zur geologischen Speicherung von Kohlenstoffdioxid in Kohleflözen konnte von den Lernenden durchgeführt werden und lieferte eine klare Beobachtung (vgl. Item S1/B14 und S2/B15). Auf Grund der Rückmeldungen aus dem Jahr 2023, wurden die inhaltlichen Hilfestellungen (vgl. Item S7/B24) und die Gestaltung der Auswertungsfragen (vgl. Item S3/B17) für das Jahr 2024 angepasst. Die Inhalte des Infotextes wurden in die Hilfekarten des Experiments integriert, um den Umfang und die Schwierigkeit des Lernangebots zu reduzieren. Während der Durchführung wurde von den Betreuenden immer wieder auf die Informations- und Hilfsangebote verwiesen, damit diese von den Lernenden wahrgenommen wurden.

Die Nutzungshäufigkeit und die Notwendigkeit von sprachlichen und inhaltlichen Hilfestellungen wurden von Lernenden und Beobachtenden unterschiedlich eingeschätzt (vgl. Item S4/B18, S7/B24).

Tabelle 50. Ausgewählte Items der Station 4 aus Schülerinnen und Beobachtendenperspektive

Station 4: Understanding CCS	2023 (S n= 6, B n = 2)	2024 (S n= 12, B n = 2)
Items	Mittelwert der Angaben (1) stimme zu - (4) stimme nicht zu	Mittelwert der Angaben (1) stimme zu - (4) stimme nicht zu
Experiment		
S1: Ich konnte die Experimente durchführen.	Ø 1,2	Ø 1,1
B14: Die Lernenden konnten das Experiment durchführen.	Ø 2	Ø 1
S2: Die Experimente lieferten eine klare Beobachtung.	Ø 1,2	Ø 1,4
B15: Das Experiment lieferte den SuS eine klare Beobachtung.	Ø 1,5	Ø 1
Sprachliche Unterstützung		
S5: Ich habe die sprachlichen Hilfestellungen (Word Banks...) genutzt.	Ø 2,4	Ø 3,2
B19: Die Lernenden nutzen die sprachlichen Hilfestellungen	Ø 2,5	Ø 1
S6: Ich hätte mehr sprachliche Hilfestellungen (z.B. Übersetzungen) benötigt.	Ø 3,6	Ø 3,3
B26: Die Lernenden hätten mehr sprachliche Hilfestellungen (z.B. Übersetzungen, Formulierungshilfen, Worterklärungen) benötigt.	Ø 2,6	Ø 4,0
Inhaltliche Unterstützung und Bearbeitung		
S3: Die Beantwortung der Auswertungsfragen fiel mir schwer.	Ø 3,6	Ø 2,7
B17: Die Beantwortung der Auswertungsfragen fiel den Lernenden schwer.	Ø 2	Ø 3,3
S4: Ich habe die inhaltlichen Hilfestellungen (Help bzw. Info Cards) genutzt.	Ø 2,4	Ø 2,1
B18: Die Lernenden nutzen die inhaltlichen Hilfestellungen (Help Cards).	Ø 1	Ø 1
S7: Ich hätte mehr inhaltliche Hilfestellungen (z.B. Tipp/Infokarten) benötigt.	Ø 3,4	Ø 3,3
B24: Die Lernenden hätten mehr inhaltliche Hilfestellungen (z.B. Hilfekarten) benötigt.	Ø 2	Ø 3,0

Die Station 4 enthielt neben dem Versuch auch ein Versuchsvideo, um die CCS-Prozesskette zu erschließen. Die Aufgabenstellungen zum Versuchsvideo zu *Carbon Capture and Storage* wurden von den Lernenden verstanden (vgl. Tabelle 51 Item B1). Bei der Beantwortung der *listening for gist* und *listening for detail* Aufgabe, konnte im Jahr 2023 eine sehr unterschiedliche Bearbeitungsqualität in den Lernprodukten festgestellt werden (vgl. Abbildung 157), weshalb es zu etwas abweichenden Ergebnissen im Vergleich zum Jahr 2024 kommt (vgl. Item B2/B3).

Bei der Bilanzierung der Station 4 (vgl. Tabelle 51) schätzen die Beobachtenden das ausgewählte Experiment und das Unterrichtsangebot in beiden Jahren als angemessen ein (vgl. Items B30/23, B32/25).

Tabelle 51. Einsatz des Videos und Bilanzierung Station 4 aus Beobachtendenperspektive

Station 4: Understanding CCS	2023 (B n = 2)	2024 (B n = 2)
Items	Mittelwert der Angaben 1 stimme zu, 2- stimme eher zu, 3 – stimme eher nicht zu, 4- stimme nicht zu	Mittelwert der Angaben 1 stimme zu, 2- stimme eher zu, 3 – stimme eher nicht zu, 4- stimme nicht zu
Video „CCS“		
B1: Die Lernenden haben die Formulierungen der Aufgabenstellungen verstanden.	Ø 1,5	Ø 1,0
B2: <i>Listening for gist</i> : Die Lernenden konnten die Hauptaussage des Videos in 1-2 Sätzen zusammenfassen.	Ø 2,5	Ø 2,0
B3: <i>Listening for detail</i> : Die Lernenden konnten die Multiple-Choice Fragen zum Video beantworten.	Ø 2,0	Ø 1,5
B6: Diese inhaltlichen Unklarheiten wurden von den Lernenden notiert/erfragt (Freitext)	keine Angaben	keine Angaben
B7: Diese sprachlichen Schwierigkeiten ergaben sich bei den Lernenden (Freitext)	keine Angaben	keine Angaben
Bilanz		
B30/23: Im Hinblick auf die unterschiedlichen Voraussetzungen der Lernenden war das ausgewählte Experiment angemessen.	Ø 2,0	Ø 1,5
B32/25: Im Hinblick auf die unterschiedlichen Sprachvoraussetzungen der Schüler/innen war das Unterrichtsangebot angemessen.	Ø 2,0	Ø 1,0

Station 4: Understanding Carbon Capture and Storage	
Video: Carbon Capture and Storage	
Follow the link and watch the video. https://www.youtube.com/watch?v=ROEFaHKVmSs&NR=1	
Listening for gist: Summarize the main ideas of the video in two sentences.	
Listening for detail: Listen a second time and tick (x) the right answer.	(to) tick: ankreuzen
1. Pre-combustion capture produces <input checked="" type="radio"/> a) hydrogen and carbon dioxide. <input type="radio"/> b) carbon monoxide and carbon dioxide. <input type="radio"/> c) water and oxygen. 2. Post-combustion capture <input type="radio"/> a) uses coal to absorb emissions. <input checked="" type="radio"/> b) uses amines to absorb emissions. <input type="radio"/> c) uses carbon dioxide to absorb emissions. 3. The Oxyfuel-process generates energy by the following process: <input type="radio"/> a) water vapor and oxygen are put through turbines. <input type="radio"/> b) coal is put through turbines. <input checked="" type="radio"/> c) water vapour and carbon dioxide are put through turbines. 4. How is CO ₂ turned into a liquid? <input checked="" type="radio"/> a) It is compressed. <input type="radio"/> b) It is heated. <input type="radio"/> c) It is cooled. 5. Geosequestration is <input type="radio"/> a) the study of rocks. <input checked="" type="radio"/> b) the storage of CO ₂ in rock formations underground. <input type="radio"/> c) the storage of CO ₂ in water underground. 6. Impermeable layer means <input type="radio"/> a) it is porous. <input checked="" type="radio"/> b) it non-porous. 7. Name the three monitoring levels mentioned in the video:	combustion: Verbrennung (to) capture: einfangen (to) compress: verdichten impermeable: undurchlässig porous: porös
Thinking further: Discuss why the Australian coal industry might have an interest in promoting CCS through this video. Exchange ideas with a partner. Write down 2-3 reasons.	
Climate protection, atmosphere	
Check your answers, before you continue.	

Station 4: Understanding Carbon Capture and Storage	
Video: Carbon Capture and Storage	
Follow the link and watch the video. https://www.youtube.com/watch?v=ROEFaHKVmSs&NR=1	
Listening for gist: Summarize the main ideas of the video in two sentences.	
Carbon dioxide can be captured. afterwards, you can storage it in the underground	
Listening for detail: Listen a second time and tick (x) the right answer.	(to) tick: ankreuzen
1. Pre-combustion capture <u>produces</u> <input checked="" type="radio"/> a) hydrogen and carbon dioxide. <input type="radio"/> b) carbon monoxide and carbon dioxide. <input type="radio"/> c) water and oxygen. 2. Post-combustion capture <input type="radio"/> a) uses coal to absorb emissions. <input checked="" type="radio"/> b) uses amines to absorb emissions. <input type="radio"/> c) uses carbon dioxide to absorb emissions. 3. The Oxyfuel-process generates energy by the following process: <input type="radio"/> a) water vapor and oxygen are put through turbines. <input type="radio"/> b) coal is put through turbines. <input checked="" type="radio"/> c) water vapour and carbon dioxide are put through turbines. 4. How is CO ₂ turned into a liquid? <input checked="" type="radio"/> a) It is compressed. <input type="radio"/> b) It is heated. <input type="radio"/> c) It is cooled. 5. Geosequestration is <input type="radio"/> a) the study of rocks. <input checked="" type="radio"/> b) the storage of CO ₂ in rock formations underground. <input type="radio"/> c) the storage of CO ₂ in water underground. 6. Impermeable layer means <input type="radio"/> a) it is porous. <input checked="" type="radio"/> b) it non-porous. 7. Name the three monitoring levels mentioned in the video:	combustion: Verbrennung (to) capture: einfangen (to) compress: verdichten impermeable: undurchlässig porous: porös
Thinking further: Discuss why the Australian coal industry might have an interest in promoting CCS through this video. Exchange ideas with a partner. Write down 2-3 reasons.	
- coal industry produces a lot of CO ₂ , for not damaging the business, the industry promotes CCS	
Check your answers, before you continue.	

Abbildung 157. Lernprodukte zweier Gruppen zum Versuchsvideo der Station 4 (2023)

Station 5 beinhaltete ein Experiment und ein Video zur Vermittlung der *Direct Air Technologie* (DAC). Ausgewählte Items aus Schülerinnen und Beobachtendenperspektive können Tabelle 52 entnommen werden. Laut der Rückmeldungen konnte das Experiment von den Lernenden durchgeführt werden (vgl. Item S1/B18). Die generierten Beobachtungen entsprachen in beiden Durchgängen den antizipierten Messwerten (vgl. S2/B15). Beobachtende und Lernende meldeten zurück, dass keine zusätzlichen inhaltlichen bzw. schriftlichen Hilfestellungen benötigt würden (vgl. Items S6/S7, B23/B25). Analog zu Station 4, sollten Betreuende noch mehr auf die Verfügbarkeit der Hilfestellungen hinweisen (vgl. Item S4/S5, B18/B19). In den Freitextanmerkungen gaben die Beobachtenden an, dass Lernende beim experimentellen Arbeiten stärkere Hilfestellung durch Betreuende benötigen. Im Besonderen wurde der Umgang mit Parafilm, mit der Waschflasche, mit dem 3-Wege-Hahn und mit den Gasbeuteln hervorgehoben. Darüber hinaus sollte die Apparatur vor der Versuchsdurchführung auf Dichtigkeit geprüft werden (vgl. B21, B27, B32). Diese Hinweise finden sich bereits in den Hinweisen für Beobachtende, die den betreuenden Personen vor der Durchführung zur Verfügung gestellt wurden (siehe Anhang 5: SommerUni 2023-2024).

Tabelle 52. Ausgewählte Items der Station 5 aus Schülerinnen und Beobachtendenperspektive

Station 5: Direct Air Capture	2023 (S n = 5, B n = 2)	2024 (S n = 4, B n = 2)
Items	Mittelwert der Angaben (1) stimme zu - (4) stimme nicht zu	Mittelwert der Angaben (1) stimme zu - (4) stimme nicht zu
Experiment		
S1: Ich konnte die Experimente durchführen.	Ø 1,0	Ø 1,0
B14: Die Lernenden konnten das Experiment durchführen.	Ø 1,0	Ø 2,0
S2: Die Experimente lieferten eine klare Beobachtung.	Ø 1,4	Ø 1,3
B15: Das Experiment lieferte den SuS eine klare Beobachtung.	Ø 1,0	Ø 2,0
Sprachliche Unterstützung		
S5: Ich habe die sprachlichen Hilfestellungen (Word Banks...) genutzt.	Ø 3,0	Ø 2,5
B19: Die Lernenden nutzen die sprachlichen Hilfestellungen	Ø 1,5	Ø 2,5
S6: Ich hätte mehr sprachliche Hilfestellungen (z.B. Übersetzungen) benötigt.	Ø 3,6	Ø 2,8
B25: Die Lernenden hätten mehr sprachliche Hilfestellungen (z.B. Übersetzungen, Formulierungshilfen, Worterklärungen) benötigt.	Ø 3,5	Ø 3,0
Inhaltliche Unterstützung und Bearbeitung		
S3: Die Beantwortung der Auswertungsfragen fiel mir schwer.	Ø 2,8	Ø 3,0
B17: Die Beantwortung der Auswertungsfragen fiel den Lernenden schwer.	Ø 1,5	Ø 2,0
S4: Ich habe die inhaltlichen Hilfestellungen (Help bzw. Info Cards) genutzt.	Ø 3,8	Ø 2,8
B18: Die Lernenden nutzen die inhaltlichen Hilfestellungen (Help Cards).	Ø 1	Ø 4,0
S7: Ich hätte mehr inhaltliche Hilfestellungen (z.B. Tipp/Infokarten) benötigt.	Ø 3,6	Ø 3,8
B23: Die Lernenden hätten mehr inhaltliche Hilfestellungen (z.B. Hilfekarten) benötigt.	Ø 3,5	Ø 3,5

Die Hör-/Sehaufräge des Videos (vgl. Tabelle 53) bereiteten den Lernenden keine Schwierigkeiten (vgl. Item B1). Inhaltliche Unklarheiten bzw. sprachliche Schwierigkeiten traten bei der Bearbeitung nach Aussagen der Beobachtenden nicht auf (vgl. Item B5/4, B6/5). Bei der Bilanzierung der Station 5 schätzen die Beobachtenden das ausgewählte Experiment und das Unterrichtsangebot in beiden Jahren als angemessen ein (vgl. Items B29/20, B31/23).

Tabelle 53. Einsatz Versuchsvideo und Bilanzierung Station 5 aus Beobachtendenperspektive

Station 5: Direct Air Capture	2023 (B n = 2) Mittelwert der Angaben 1 stimme zu, 2- stimme eher zu, 3 – stimme eher nicht zu, 4- stimme nicht zu	2024 (B n = 2) Mittelwert der Angaben 1 stimme zu, 2- stimme eher zu, 3 – stimme eher nicht zu, 4- stimme nicht zu
Items		
Video „Climeworks“		
B1: Die Lernenden haben die Formulierungen der Aufgabenstellungen verstanden.	Ø 1,0	Ø 2,0
B5/4: Diese inhaltlichen Unklarheiten wurden von den Lernenden notiert/erfragt (Freitext)	keine Angaben	keine Angaben
B6/5: Diese sprachlichen Schwierigkeiten ergaben sich bei den Lernenden (Freitext)	keine Angaben	keine Angaben
Bilanz		
B29/20: Im Hinblick auf die unterschiedlichen Voraussetzungen der Lernenden war das ausgewählte Experiment angemessen.	Ø 1,5	Ø 1,5
B31/23: Im Hinblick auf die unterschiedlichen Sprachvoraussetzungen der Schüler/innen war das Unterrichtsangebot angemessen.	Ø 1,5	Ø 1,0

Der Selbstevaluationsbogen wurde in beiden Jahren von der durchführenden Lehrkraft ausgefüllt. Ziel war es, eine allgemeine Einschätzung des Ablaufs des Kurses und der Lernendenbeteiligung zu erhalten. Es handelt sich um subjektive Wahrnehmungen der Lehrperson, die jedoch Übereinstimmungen mit den Rückmeldungen der Lernenden und Beobachtenden aufweisen. In beiden Jahren konnten innerhalb der Gruppen sehr starke Unterschiede in Vorwissen, Leistungsstärke, Sprachkompetenz und Motivation festgestellt werden. Dies ist durch die Zusammensetzung der Kohorte aus verschiedenen Altersgruppen, Klassenstufen und Schulen/Schulformen (vgl. Tabelle 47) bedingt. In den Beobachtungen des Kursangebots durch die Lehrperson konnte trotz des kurzen Kurszeitraums eine hohe Beteiligung und sprachliche Aktivierung der Lernenden festgestellt werden. Bis auf kleinere Hürden beim Experimentieren, stellten die sprachlichen Inhalte für die meisten Lernenden kaum Schwierigkeiten dar. Die Mehrheit kam gut mit den Materialien zurecht. Dies wurde auch von den Lernenden im Post-Fragebogen bestätigt (vgl. Tabelle 54).

Tabelle 54. Schülerinnenrückmeldungen zur Materialgestaltung der Stationen

	Station 3		Station 4		Station 5	
Item	2023 (n = 20)	2024 (n = 23)	2023 (n = 6)	2024 (n = 12)	2023 (n = 5)	2024 (n = 4)
S9: Die Materialien waren übersichtlich gestaltet.	Ø1,0	Ø1,0	Ø1,6	Ø1,3	Ø1,0	Ø1,0
S10: Die Materialien waren verständlich gestaltet.	Ø1,4	Ø1,1	Ø1,2	Ø1,6	Ø1,0	Ø1,0

In den Jahren 2023 [296, S.17] und 2024 [297, S.24] wurde der Kurs von den Teilnehmerinnen in die Top 6 der beliebtesten Veranstaltungen der SommerUni gewählt¹⁹⁷. Befragt nach einem allgemeinen, offenen Feedback (vgl. Item S21) machten einige Schülerinnen 2023 folgende Angaben¹⁹⁸: „Insgesamt fand ich den Kurs sehr spannend und vom Niveau her passend. Außerdem finde ich es gut, dass wir in Gruppen arbeiten konnten.“ Eine weitere Lernende merkte an: „Der Kurs hat sehr viel Spaß gemacht, trotz der Pannen unserer Gruppe, jedoch hätte ich mir mehr Zeit zum Experimentieren gewünscht, damit man mehr Stationen schafft. Ansonst einfach super!!!“. Darüber hinaus gab eine Schülerin an: „Die Inhalte waren sehr interessant, jedoch war für mich persönlich die Zeit zu kurz, um diese so gut zu verstehen, dass ich sie auch auf Englisch gut wiedergeben kann.“ Im Jahr 2024 waren z.B. folgende Rückmeldungen zu lesen: „Sehr schön gestaltet! Jetzt habe ich Lust Chemie auch auf englisch in der Schule zu lernen, bzw. andere Fächer auf Englisch was ich gut fand ist, das kein Druck bezüglich des auf englisch sprechen gab. Man ist automatisch rein gekommen.“ Weiterhin bemerkte eine Schülerin: „Die Inhalte der Infokarten haben alles gut erklärt und mithilfe von beispielen nochmal verdeutlicht! Das hat alles einfacher gemacht :). Darüber hinaus schrieb eine Schülerin: „Mir hat es insgesamt sehr gut gefallen, vor allem wirklich darüber selbst nachzudenken und dann eventuell hilfe von den Lehrenden zu bekommen. Hat sehr spaß gemacht!“

Diese vereinzelt, positiven offenen Anmerkungen, stimmen größtenteils mit den Rückmeldungen aller Teilnehmerinnen überein. Die Mehrheit der Schülerinnen (79%) in den Jahren 2023 und 2024 fanden den Kurs interessant (vgl. Item S19).

Auf Grundlage der Rückmeldungen der Lernenden und Beobachtenden wurden die Materialien vollständig digitalisiert und weiter optimiert. Final entstand für das Kursangebot ein E-Book mit Lernlandkarte (vgl. Abbildung 158), das in zukünftigen SommerUni-Kursen eingesetzt werden kann. Alle Materialien des E-Books sind über eine interaktive Lernlandkarte verlinkt und ohne Medienbruch verwendbar. Die überarbeitete Version des E-Books wurde bereits in zwei SommerUni- Kursen im Juli 2025 erfolgreich mit Schülerinnen erprobt (n = 34). Die vollständige Datei findet sich im Angang dieser Arbeit (vgl. Anhang 5: E-Book SommerUni ab 2025).

¹⁹⁷ Insgesamt wurden in der SommerUni 2023 65 fachbezogene Kurse und in der SommerUni 2024 83 fachbezogene Kurse angeboten.

¹⁹⁸ Die Rückmeldungen der Lernenden wurden ohne sprachliche Korrektur als direkte Zitate übernommen.

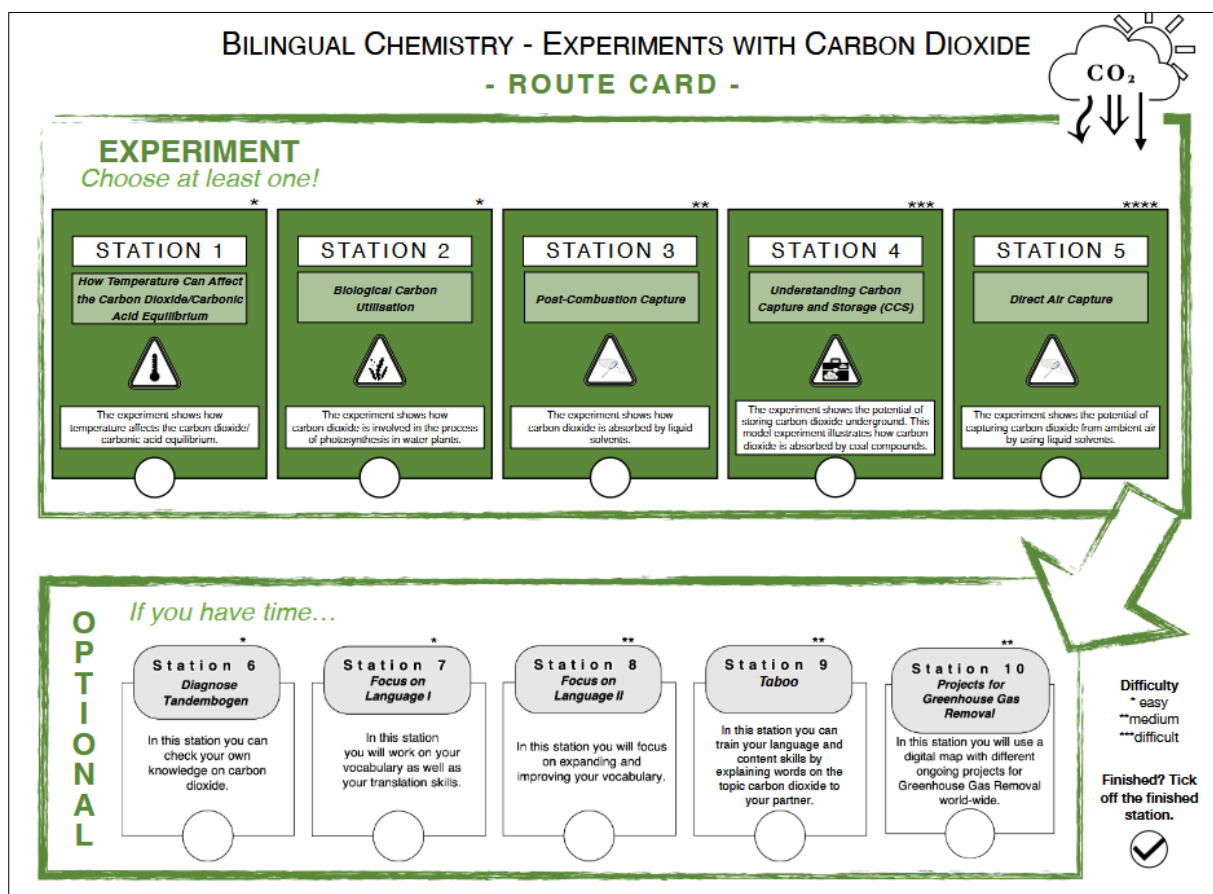


Abbildung 158. Interaktive Lernlandkarte im E-Book für die SommerUni-Kurse ab 2025

5.3.2 Lehrkräftefortbildungen

Um auch die Perspektive der Lehrkräfte zu den Experimenten und Materialien einzuholen, wurden am 25.10.2023 (n = 5) und 15.11.2023 (n = 6) zwei Präsenz-Fortbildungen angeboten. Auf Grund der geringen Anmeldezahlen, konnten auch ReferendarInnen und Studierende an den Angeboten teilnehmen. Nach einer fachlichen Einführung und curricularen Anbindungsmöglichkeiten des Themas erhielten die Lehrkräfte an Experimentierstationen die Gelegenheit, die entwickelten Experimente durchzuführen und die didaktisierten Materialien zu sichten (vgl. Abbildung 159).

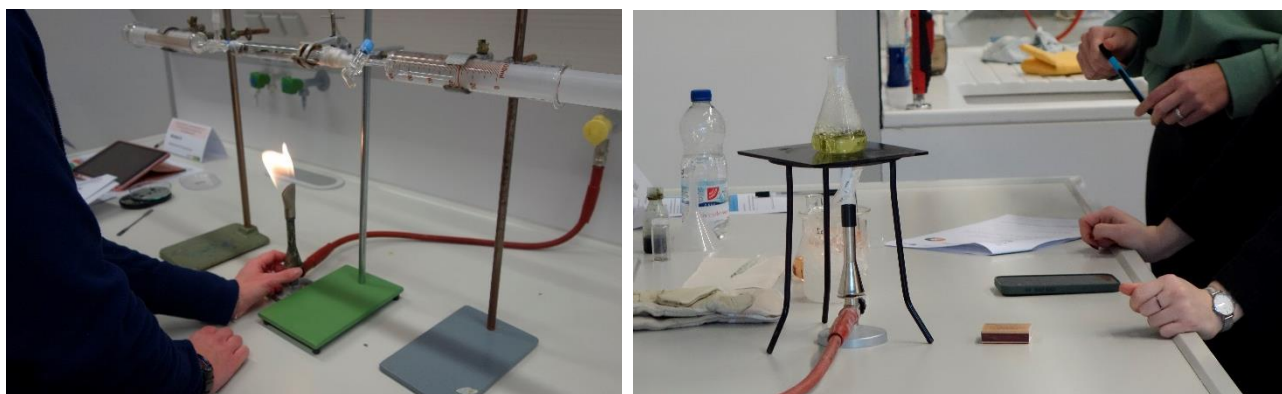


Abbildung 159. Lehrkräfte beim Experimentieren am 15.11.2023

Im Anschluss fand eine gemeinsame Diskussion statt. Da BCU auf Grund seiner geringen Verbreitung (vgl. 3.6) für die meisten Chemielehrkräfte in ihrem täglichen Berufsalltag eine untergeordnete Rolle spielt, wurden in den Fortbildungen hauptsächlich Experimente und Materialien in deutscher Sprache vorgestellt. Die Lehrkräfte konnten ihre Rückmeldungen in einem Fragebogen mit offenen und geschlossenen Items festhalten (siehe Anhang 5). An einigen Experimentierstationen lagen Notizzettel aus, an denen die Lehrkräfte positives und negatives schriftliches Feedback ohne genauere Kriterien festhalten konnten.

In der Fortbildung vom 25.10.2023 *Wege aus der Klimakrise – BNE als Leitidee für einen Experimentierparcours* wurde das Modellexperiment zur Adsorption von Kohlenstoffdioxid an Aktivkohle (4.4.2.5) mit einem digitalen Lernbegleiter als eine Station innerhalb des Schülerlaborangebots „Wege aus der Klimakrise“ vorgestellt und erprobt. Am 15.11.2023 widmete sich die Fortbildung der Vermittlung der *CO₂-Abscheidung, Nutzung und Speicherung (Carbon Capture, Utilisation and Storage)*. Eine Übersicht der eingesetzten Materialien kann Tabelle 55 entnommen werden.

Tabelle 55. Übersicht der Materialien für das Fortbildungsangebot am 15.11.23

Zum Unterrichtsmodul „Klimawirksamkeit von Kohlenstoffdioxid“	Digitale Medien	Weitere Materialien
<input type="checkbox"/> Modul 1: Eigenschaften von CO ₂	<input type="checkbox"/> Modul 5 mit Videoexperiment: Kohlenstoffdioxid als Rohstoff	<input type="checkbox"/> Post- Combustion Capture
<input type="checkbox"/> Modul 2: Quellen und Senken von CO ₂	<input type="checkbox"/> Digitaler, bilingualer Lernbegleiter mit Experiment Temperaturabhängigkeit	<input type="checkbox"/> Gedankenexperiment – Leck einer CO ₂ -Pipeline
<input type="checkbox"/> Modul 4: Möglichkeiten der CO ₂ - Speicherung		<input type="checkbox"/> Tandembogen zur Aktivierung des Vorwissens
<input type="checkbox"/> Modul 6: Direct Air Capture		

Die Kohorte vom 25.10.23 setzte sich aus insgesamt fünf Personen, davon drei Lehrkräften und zwei Referendarinnen zusammen. An der Fortbildung vom 15.11.23 nahmen sechs Personen, davon zwei Lehrkräfte und vier Studierende teil. Auf Grund der organisatorischen Rahmenbedingungen konnten nicht alle Teilnehmenden alle Experimentierstationen und Materialien bearbeiten und sichten, weshalb einzelne Rückmeldungen z.B. nur von zwei Personen angegeben wurden. Bei gemeinsamen überschneidenden Items wurden die Rückmeldungen aus beiden Fortbildungsangeboten zusammengefasst (n = 11).

Bei den schriftlichen Befragungen stimmten alle elf Teilnehmende im Fragebogen zu, dass das Thema CCS zum aktuellen Oberstufenlehrplan des Landes NRW passt.

Als mögliche Einsatzbereiche von CCS wurden im Besonderen Projekttag/-wochen, fächerübergreifender Unterricht und ein Ausflug in ein Schülerlabor angegeben (vgl. Tabelle 56).

Tabelle 56. Einsatzbereiche des Themas CCS (Mehrfachnennungen waren möglich)

(schulischer) Bereich	Nennungen
<i>im regulären CheU</i>	7
<i>an Projekttagen/-wochen</i>	10
<i>in Arbeitsgemeinschaften</i>	3
<i>in Facharbeiten</i>	6
<i>im fächerübergreifenden Unterricht</i>	9
<i>Ausflug ins Schülerlabor</i>	10

Diese Aussagen stützen das Potential des Themas für BNE (vgl. 4.3.2) und dessen Realisation im Schülerlabor (vgl. 4.3).

Als problematisch für den Einsatz der Thematik im Regelunterricht, gaben fünf der elf Lehrkräfte den umfangreichen Lehrplan und fehlende zeitliche Kapazitäten an. Außerdem wurde von zwei Lehrkräften das fehlende „handwerkliche Geschick“ der Lernenden beim Experimentieren und die komplexe Apparatur beim Adsorptionsversuch mit Aktivkohle (z.B. der Einsatz von Glasgeräten, im besonderen Kolbenprober) als Begründungen angegeben.

Als hilfreich zur Überwindung dieser Schwierigkeiten wurde eine Implementation an Projekttagen und die Gestaltung von Lernmaterialien mit einer ausführlichen Lehrkräftehandreichung als Vorschläge vorgebracht.

Anschließend wurden die Teilnehmenden zu den von ihnen bearbeiteten Stationen befragt. Sie sollten angeben, ob sie die Materialien und Experimente in ihrem eigenen Unterricht einsetzen würden und welche Adaptionen- bzw. Verbesserungsvorschläge sie machen würden. In Tabelle 57 sind die Rückmeldungen zusammengefasst.

Tabelle 57. Bearbeitete Stationen und Rückmeldungen der Lehrkräfte

Stationen	TN	Material im Unterricht einsetzbar (basierend auf einer Ja/Nein-Abfrage)	Experiment im Unterricht einsetzbar (basierend auf einer Ja/Nein-Abfrage)	Vorschläge für mögliche Adaptionen
M1 Eigenschaften CO ₂	2	2 von 2	1 von 1	-
M4 Möglichkeiten CO ₂ -Speicherung	9	9 von 9	Adsorption und Desorption: 7 von 9	<ul style="list-style-type: none"> Argumente gegen Versuch mit Sprizentechnik (Komplexität Aufbau, Gefahr Nichtfunktion) Plädoyer für Kolbenproberaufbau
			Nachweis: 6 von 7	-
M6 DAC	2	2 von 2	2 von 2	<ul style="list-style-type: none"> Hinweise zu Ausrichtung Gaswaschflasche und Dichtigkeit der Apparatur ergänzen
M5 Algen	2	1 von 1	1 von 1	-

Weitere Stationen wurden mit Hilfe des offenen Daumens hoch/runter Feedbacks beurteilt. Die Rückmeldungen sind in Tabelle 58 in Textform zusammengefasst.

Tabelle 58. Rückmeldungen zu weiteren Stationen der Fortbildung vom 15.11.23

Station	TN	Freitext Rückmeldungen zum Material	Freitext Rückmeldungen zum Experiment
Bili, digitaler Lernbegleiter (Optional 4)	4	<ul style="list-style-type: none"> • bilingualer Lernbegleiter war sehr angenehm und gut durchzuführen, besonders durch digitales Laborjournal • sehr zeitgemäß, motivierend und nicht überfordernd auf Grund des bilingualen Unterrichtsziels 	<ul style="list-style-type: none"> • schöner, einfacher Versuch
Post-Combustion	4	<ul style="list-style-type: none"> • einfach gestaltet und gut durchzuführen 	<ul style="list-style-type: none"> • das einfache Gelingen mit sehr sichtbarem Effekt • tolles, einfaches Experiment
Gedankenexperiment	4	<ul style="list-style-type: none"> • tolles, cooles, Gedankenexperiment, beeindruckendes Video • Video könnte für eine erfolgreiche Sicherung sorgen, da es großes Interesse hervorruft • Gedankenexperiment sehr schön veranschaulicht 	

Auf Grund der kleinen Kohorten der Fortbildungen sind die Rückmeldungen der Lehrkräfte vorsichtig zu werten, da es sich um rein subjektive Meinungsäußerungen handelt. Nichtsdestotrotz liefern die Rückmeldungen Einschätzungen aus der Berufspraxis auf das erstellte Material und die ausgewählten Experimente. Die Thematik CCS wird von der Mehrheit der Lehrkräfte als Exkurs oder Inhalt außerhalb des regulären Chemieunterrichts wahrgenommen. Durch die Aufbereitung als außerschulisches Lernangebot oder durch kommentierte Materialien für Lehrkräfte, kann CCS für Lernende und den Regelunterricht zugänglich gemacht werden.

5.3.3 Ergebnisse

Durch die gewonnenen Erkenntnisse aus den Kapiteln 5.3.1 bis 5.3.2, können die aufgestellten praktisch-konzeptionellen Forschungsfragen (FF) nun wie folgt beantwortet werden:

SommerUni 2023-2024 (bilinguale Materialien)

(FF1) Waren die ausgewählten Experimente von den Lernenden durchführbar und lieferten sie eine klare Beobachtung?

In den Erprobungen der SommerUni wurden die Experimente der Stationen 3, 4 und 5 untersucht. Die Einschätzungen zur Durchführbarkeit und Beobachtbarkeit wurden aus den Rückmeldungen der Lernenden und Beobachtenden zusammengefasst. An Station 3 wurde das Experiment zur Absorption von Kohlenstoffdioxid in Natronlauge durchgeführt (vgl. 4.4.2.3). Sowohl Lernende als auch Beobachtende in den Jahren 2023 und 2024 stimmten vollständig zu, dass das Experiment durchführbar sei und eine klare Beobachtung lieferte (vgl. Item S1/2 und B7/8).

Das Modellexperiment zur geologischen Speicherung von Kohlenstoffdioxid in Kohleflözen (vgl. 4.4.2.5) wurde an Station 4 erprobt. In den SommerUni-Kursen 2023 und 2024 konnte das Experiment von den Lernenden durchgeführt werden und lieferte eine klare Beobachtung (vgl. Item S1/B14 und S2/B15). Dies traf ebenfalls für die Station 5 mit dem Modellexperiment zur Absorption mit verschiedenen alkalischen Lösungsmitteln zu (vgl. Item S1/B14 und S2/B15).

Aus den Rückmeldungen der Beobachtenden und Lernenden kann auf eine generelle Eignung der ausgewählten Experimente für das intendierte Setting geschlossen werden. Da die untersuchten Kohorten sehr unterschiedliche experimentelle Vorerfahrungen hatten, mussten die Betreuenden bei den Erprobungen teilweise Hilfestellungen leisten. Diese bezogen sich im Besonderen auf experimentelle Gerätschaften und Arbeitsweisen, die den Lernenden aus dem Regelunterricht nicht bekannt waren, z.B. der Umgang mit Parafilm, Dreiwegehähnen, Spritzentechnik und Gasbeuteln. Bei der Überarbeitung der Materialien wurden bebilderte Anleitungen zur Handhabung dieser Gerätschaften inkludiert und die betreuenden Studierenden vor einer erneuten Erprobung für potentielle Hürden sensibilisiert.

(FF2) Waren die Materialien aus der Perspektive der Lernenden übersichtlich und verständlich gestaltet?

In den Erprobungen der Jahre 2023 und 2024 stimmten die befragten Lernenden an den untersuchten Stationen 3, 4 und 5 diesen Aussagen zu. Sie schätzten die entwickelten Materialien als übersichtlich und verständlich gestaltet ein (vgl. Item S9 und S10). Die Umgestaltung der Materialien in Form eines digitalen E-Books im Jahr 2024 wirkte sich kaum auf die Einschätzungen der Lernenden aus. Die Mehrheit der Lernenden schätze das Material weiterhin als übersichtlich und verständlich gestaltet ein. Auf Grund der positiven Rückmeldungen der Lernenden und der problemlosen Implementierung der digitalen E-Books an den einzelnen Stationen, wurden die Lernmaterialien für das bilinguale Schülerlaborangebot in Form eines interaktiven E-Books weiterentwickelt.

(FF3) Werden mehr sprachliche und inhaltliche Hilfestellungen für die Lernenden benötigt?

An allen Stationen waren sich Beobachtende und Lernende einig, dass sie eher keine weiteren sprachlichen und inhaltlichen Hilfestellungen benötigt hätten. Bei den Einschätzungen zur Nutzung der Hilfestellungen und der Schwierigkeiten bei der Beantwortung der Auswertungsfragen divergieren die Wahrnehmungen von Lernenden und Beobachtenden teilweise sehr stark. Die Beobachtenden vermerken meist, dass den Lernenden die Beantwortung der Auswertungsfragen teilweise schwerfiel (vgl. Item B10/17) und sie sowohl sprachliche als auch inhaltliche Hilfestellungen in Anspruch genommen haben (vgl. Item B11/12 und B18/19). Die Wahrnehmung der Lernenden ist meist eine andere. Sie geben eher an, weniger sprachliche und inhaltliche Hilfestellungen (vgl. Item S4/5) in Anspruch genommen zu haben und schätzen die Schwierigkeit der Beantwortung der Auswertungsfragen geringer ein als die Beobachtenden (vgl. Item S3). Hier kann ein Antwortverhalten mit gewissen Tendenzen (*response bias*¹⁹⁹) nicht ausgeschlossen werden.

¹⁹⁹ **Response bias** bzw. **set** nach Definition von: <https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/response-set> (letzter Zugriff 05.05.25).

Diese Verzerrungen im Antwortverhalten können bei der Beantwortung von Fragebögen auftreten, um sich selbst und die eigenen Leistungen besser darzustellen, als sie objektiv waren.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass die Lernenden Antworten gegeben haben, die sie als sozial erwünscht einschätzen. Sie erwarten eine höhere Akzeptanz, wenn sie angeben, dass sie kaum Schwierigkeiten bei der Bearbeitung der Aufgaben hatten und nur wenige Hilfestellungen in Anspruch genommen haben.

Aus den Rückmeldungen der Lernenden und Beobachtenden lassen sich folglich hierzu nur schwer Aussagen generieren. Trotzdem wurden verstärkt die Rückmeldungen der Beobachtenden bei der Adaption der Materialien berücksichtigt, da sie im Gegensatz zu den Lernenden eine distanziertere (wenngleich auch subjektive) Beobachtung und Einschätzung vornehmen konnten.

Lehrkräftefortbildungen (deutschsprachige und bilinguale Materialien)

(FF4) Wie schätzen die Lehrkräfte die Anbindbarkeit der Thematik an den aktuellen KLP ein?

Bei den schriftlichen Befragungen stimmten alle elf Teilnehmenden im Fragebogen zu, dass das Thema CCS zum aktuellen Oberstufenlehrplan des Landes NRW passt. Diese Aussagen stützen die weiter oben begründete Anbindbarkeit der Thematik an den Kernlehrplan und den Regelunterricht (vgl. 4.1.1).

(FF5) Wie schätzen die Lehrkräfte die Eignung der Thematik für verschiedene schulische Bereiche ein?

Als mögliche Einsatzbereiche von CCS wurden im Besonderen Projekttag/-wochen, fächerübergreifender Unterricht und ein Ausflug in ein Schülerlabor angegeben. Diese Aussagen stützen das Potential des Themas für BNE (vgl. 4.3.2) und dessen Realisation im Schülerlabor (vgl. 4.3). Grund hierfür sind die Komplexität der Thematik und der begrenzte Zeitrahmen im Regelunterricht. In Plenumsphasen der Fortbildungen wurden außerdem Bedenken von den Lehrpersonen geäußert, dass sie sich nicht ausreichend informiert fühlen würden diese Inhalte selbst in ihrem Unterricht anzusprechen.

(FF6) Würden Lehrkräfte die entwickelten Materialien und Experimente in ihrem eigenen Unterricht einsetzen?

Nach einer Einschätzung der Mehrheit der teilnehmenden Lehrkräfte würden sie alle gesichteten Materialien und Experimente in ihrem Unterricht einsetzen. Viele Versuche wurden auf Grund ihrer einfachen Geling- und Durchführbarkeit und sichtbaren Effekten gelobt. Der Adsorptionsversuch von Kohlenstoffdioxid an Aktivkohle sollte mit dem von den Lehrkräften favorisierten Aufbau mit Kolbenprobern durchgeführt werden. Die Gestaltung des bilingualen E-Books wurde als zeitgemäß und motivierend eingeschätzt. Darüber hinaus gab es keine detaillierteren Rückmeldungen.

5.4 Dritter Iterationszyklus (2024-2025)

In der dritten Iterationsschleife sollte das Schülerlaborangebot in seiner Gesamtheit untersucht werden. Bevor der Kurs mit mehreren intendierten Zielgruppen erprobt werden konnte (vgl. 5.4.3), wurde er zuvor mit einer Studierendenkohorte (vgl. 5.4.1) und einer Schulklasse (vgl. 4.5.2) durchgeführt, um etwaige Stolpersteine zu identifizieren und die weiterentwickelte Forschungsmethodik zu erproben.

Zielsetzung der Erhebungen des dritten Iterationszyklus war es, objektivere Testinstrumente (C-Test, Wissenstest) mit subjektiveren Befragungen (Schülerfragebogen, CLIL-Beobachtungsbogen) zu kombinieren. Dabei sollte sowohl die Perspektive der Lernenden auf das Kursangebot, als auch das der Lehrenden mit einbezogen werden (vgl. Abbildung 160).

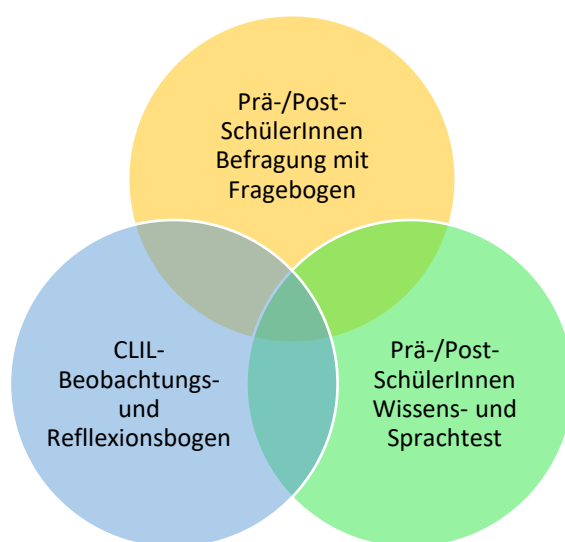


Abbildung 160. Erhebungsinstrumente des dritten Iterationszyklus

Dafür wurde ein neues Forschungsinstrument etabliert, welches es ermöglichte, zentrale pädagogische Ziele von CLIL-Lernsettings zu identifizieren. Diese sollten sich in beobachtbaren Merkmalen bzw. Indikatoren zur Erreichung dieser Ziele widerspiegeln. Als Vorlage wurde die *CLIL planning and observation checklist for professional dialogue between CLIL educators* von Mehisto, Marsh und Frigols verwendet [122, S.232-237]. Sie gilt als Tool zur Sicherung der Unterrichtsqualität und Feedbackkultur zwischen Lehrkräften, die bilingualen Unterricht gestalten. Für das Schülerlaborsetting wurde die Checkliste übersetzt, gekürzt und angepasst. Fokus der Adaption war die Umformulierung der Schwerpunktsetzung von der anfänglichen Ausrichtung auf das Verhalten der Lehrperson hin zu dem verwendeten Material im Schülerlaborsetting. Die Kriterien des CLIL-Beobachtungsbogens wurden außerdem mit den Kriterien zur Materialentwicklung in bilingualen Lernsettings für CLIL-Materialien (vgl. 4.5.2) abgeglichen und darauf abgestimmt. Grundsätzlich sei angemerkt, dass kein Unterricht und kein Lernsetting zu jeder Zeit alle Lernziele und Kompetenzen oder Kriterien vollständig erfüllen kann. Folglich wurde auch hier eine Auswahl an Kriterien vorgenommen, die realistisch in den organisatorischen Rahmenvorgaben umzusetzen sind.

Die konzipierte Checkliste sollte als Beobachtungsbogen in den Erprobungen dienen (vgl. Abbildung 161 und 162). Um die Phase der Beobachtung vorzuentlasten, wurde der Bogen in zwei Teile aufgegliedert. Vor der Erprobung sollte Teil 1 des Bogens von den Beobachtenden bearbeitet werden. Die Beobachtenden erhielten darin den Auftrag, das Arbeitsmaterial der Lernumgebung zu analysieren. Während der Erprobung nutzten die Beobachtenden Teil 2 des Bogens. Schwerpunkt des zweiten Teils war die Analyse der Lernumgebung während der Erhebung. Innerhalb der Beobachtungsbögen werden verschiedene Kriterien und Indikatoren für CLIL-Lernsettings angesprochen. Die Beobachtenden hatten die Aufgabe anzugeben, ob sie die Indikatoren beobachten konnten oder nicht. Außerdem erhielten sie die Möglichkeit, zu jedem Indikator in einem Freitext Bemerkungen anzugeben. Der vollständige Beobachtungsbogen ist im Anhang 6 einsehbar.

Teil 1: Analyse des Materials vor der Erprobung

Bitte nehmen Sie sich 60 Minuten vor der Erprobung Zeit und analysieren Sie das Ihnen zur Verfügung stehende Material mit Hilfe der Kriterien des Beobachtungsbogens. Arbeiten Sie allein und geben Sie Ihren Bogen ab, bevor Sie mit Teil 2 beginnen. Vielen Dank.

Analysiertes Material: ☐ Station 1: Carbon Capture

☐ Station 2: Carbon Storage

☐ Station 3: Carbon Utilisation

Datum: _____

Das CLIL-Material ...	Indikatoren	(+) beobachtet/ (-) nicht beobachtet	Kommentare
1. integriert Inhalts- und Sprachenlernen.			
1.1 enthält authentische Texte und Materialien, um Inhalts- und Sprachenlernen zu vermitteln.	Einige, der erwähnten Elemente sind im Lernsetting vorhanden.		
1.2 integriert Aufgabenstellungen, die inhaltlich und sprachlich dem Niveau der Lernenden entsprechen.	Die Aufgabenstellungen sind klar und präzise formuliert. Die Lernenden sollten in der Lage sein den Aufgabenstellungen erfolgreich zu folgen und Aufgaben vollständig bearbeiten. Die verwendete Sprache ist nicht zu schwer.		
2. erzeugt eine (lern)reiche Lernumgebung.			
2.1 bietet Lernenden einen umfangreichen Sachfachinhalt.	Inhalt ist für die SuS herausfordernd, mit relevanten Kontexten verbunden und so gestaltet, dass sie in Aufgaben erfolgreich von den SuS angewendet werden können.		
2.2 ermöglicht Lernenden mündlichen und schriftlichen sprachlichen Input.	Schriftlicher, sprachlicher Input wird zur Verfügung gestellt oder kann mit Hilfe von digitalen Medien bzw. Erklärfilmen (z.B. Glossar, Annotationen) nachgeschaut werden. Mündlicher, sprachlicher Input erfolgt durch Videos oder Audiotexte.		

Abbildung 161. Auszug aus dem CLIL-Beobachtungsbogen Teil 1

Teil 2: Analyse der Lernumgebung während der Erprobung

Die folgenden sechs Kategorien und deren Beschreibungen kennzeichnen zentrale pädagogische Ziele von CLIL-Lernsettings. Die Indikatoren illustrieren mögliche zu beobachtende Merkmale für die Erreichung von Lernzielen. Bitte achten Sie während der Erprobung darauf, welche Merkmale Sie beobachten können und kommentieren Sie Ihre Entscheidungen ausführlich. Arbeiten Sie allein und tauschen Sie sich erst nach Abgabe des Bogens mit anderen Beobachtenden aus. Vielen Dank für Ihre Mithilfe.

Klassenstufe: _____ Zahl der Lernenden: _____ Datum: _____ Zeitrahmen: _____ Uhr bis _____ Uhr

Analysierte Station: ☒ Station 1: Carbon Capture ☒ Station 2: Carbon Storage ☒ Station 3: Carbon Utilisation

In der CLIL-Lernumgebung ...	Indikatoren	(+) beobachtet/ (-) nicht beobachtet	Kommentare
1. wird Inhalts- und Sprachenlernen integriert.			
1.1 wird ein Lernsetting realisiert, dass inhaltlich und sprachlich dem Niveau der Lernenden entspricht.	SuS können erfolgreich Aufgabenstellungen folgen und Aufgaben vollständig bearbeiten. Die verwendete Sprache ist nicht zu schwer.		
1.2 wird die Lernprogression in einer klar strukturierten Sequenz ermöglicht.	Einstieg, Erarbeitung, Sicherung und Transferphase sind vorhanden.		
2. wird ein (lern)reiches Setting gestaltet.			
2.1 wird den Lernenden mündlicher und schriftlicher (mutter-) sprachlicher Input gegeben.	Schriftlicher, sprachlicher Input wird zur Verfügung gestellt oder kann mit Hilfe von digitalen Medien nachgeschaut werden. Mündlicher sprachlicher Input erfolgt durch die Lehrperson, Videos oder Audiotexte.		
2.2 haben die SuS viele Möglichkeiten zu sprechen und zu schreiben.	Lernende sprechen mehr als Lehrperson. Kooperative Sozialformen ermöglichen angemessene Beteiligung. SuS verdeutlichen ihren Verständnisprozess in schriftlichen Aufgaben.		

Abbildung 162. Auszug aus dem CLIL-Beobachtungsbogen Teil 2

Die subjektive Perspektive und bedingte Aussagekraft des Beobachtungsbogens müssen bei der Auswertung und Interpretation der Daten berücksichtigt werden. Es ist jedoch ein erster Versuch literaturbasiert einen Beobachtungsbogen zu konzipieren, der für zukünftige Begutachtungen von bilingualen Materialien herangezogen werden kann. Dieser erste Ansatz kann als Beitrag zur Weiterentwicklung in stärker empirisch fokussierten Arbeiten weiter erforscht und ausgeschärft werden. Darüber hinaus kann der Bogen für die Planung und zur Konzeption von weiteren bilingualen Lernangeboten genutzt werden.

Im dritten Iterationszyklus sollten die Lernenden in einem Prä/Post-Design zu ihrer Fachsprachenkompetenz in der deutschen und englischen Sprache befragt werden. Dazu wurde ein C-Test für die Lernumgebung konzipiert. Ein traditioneller C-Test umfasst mehrere kurze Texte, bei denen ein Teil eines jeden zweiten Wortes gelöscht wird. Die daraus entstehenden Lückentexte ermöglichen die Feststellung des Sprachstands der Lernenden [298, S.211].

Um Fachsprachenkompetenz zu diagnostizieren, wird in der Forschung zu Deutsch als Zweitsprache oft auf Teilfertigkeitenorientierte Tests (TF-Tests) [299, S.569] zurückgegriffen. Die Grundlage für diese Tests bilden Lehrwerktexte, in denen die erste Hälfte jedes dritten Wortes getilgt wird. Dies ist für die Diagnose von Fachbegrifflichkeiten besonders wichtig, weil diese in der ersten Hälfte des Wortes den „bedeutungstragend[en]“ Inhalt [300, S.32] aufweisen. Der Test ermöglicht Rückschlüsse zu semantischen und orthografischen Fähigkeiten der Lernenden. Grammatische Fähigkeiten können durch den Test nicht abgebildet werden. In der Chemiedidaktik gilt der C-Test als Instrument zur Diagnose von Fachsprache [300, S.31].

Özcan hat in ihrer Dissertation C-Tests für den Anfangsunterricht zum Inhaltsfeld Stoffgemischen und Stofftrennung entwickelt [301], welche die Orientierung für die Konzeption und Auswertung der C-Tests für dieses Forschungsvorhaben bilden.

Zur Erhebung der Fachsprachenkompetenz wurden zwei deutsche und zwei englische Lehrwerkstexte ausgewählt. In der deutschen Variante wurden Texte zum Kohlenstoffkreislauf und Treibhauseffekt ausgesucht, da sich diese auf im Unterricht behandelte Inhalte beziehen (vgl. Abbildung 163). In den Texten wurden die zentralen Fachbegriffe identifiziert. Im Anschluss wurde die erste Hälfte der Begriffe herausgelöscht. Bei den englischen Texten enthält der erste Text Informationen zum Stoff Kohlenstoffdioxid, der zweite für die Lernenden unbekannte Inhalte zu CCS. Um den Schwierigkeitsgrad zu minimieren, wurde im Gegensatz zu den deutschen Texten in der englischen Variante die zweite Hälfte der Begriffe eliminiert. Teilweise finden sich zu Beginn der Worte nur 1-2 Buchstaben. Alle vier Texte weisen zwanzig Lücken auf. Der erste und letzte Satz ist jeweils vollständig ausformuliert, um einen Kontext zu gewährleisten. Alle vier Texte wurden in Voruntersuchungen mit Muttersprachlern getestet [298, S.216] und anschließend für den Einsatz mit der App BookWidgets adaptiert (siehe Anhang 6).

FRAGE 2 ☆

2

C-Test 1 von 4 Deutsch Treibhauseffekt

In den folgenden Texten finden Sie lückenhafte Alltags- und Fachbegriffe, die Sie bitte sinnvoll durch Wortteile ergänzen. Lesen Sie sich die Texte aufmerksam durch, versuchen Sie Zusammenhänge zu erkennen und dadurch die Lücken zu füllen. Die Lücken, die Sie nicht ausfüllen können, lassen Sie einfach leer.

Hier ein Beispiel: Susi hat _____ en kleinen _____ nd.

Ausgefüllte Lösung: Susi hat *einen* kleinen *Hund*.

Kohlenstoffdioxid fungiert als Treibhausgas. Trifft _____ rahlung auf die Erde, wird diese teilweise _____ tiert und teilweise absorbiert und in Wärmestrahlung _____ ndelt. Die Treibhausgase _____ ieren einen großen Teil der Wärmestrahlung und _____ ten Sie wie in einem _____ haus fest. Ohne diesen _____ icken Treibhauseffekt läge die _____ stemperatur der Erde nicht bei 15 °C, sondern bei -18°C. Leben, wie wir es _____ nen, wäre dann nicht _____ lich. Durch das _____ rennen fossiler _____ eträger durch den _____ schen, wird zusätzliches _____ ffdioxid emittiert, was eine weitere _____ mung des _____ eten zur _____ lge hat. Dieser _____ opogene Treibhauseffekt ist vom Menschen _____ cht. Er führt dazu, dass in Summe mehr Kohlenstoffdioxid _____ tiert als abgebaut wird. Dieses Phänomen hat eine übermäßige Erderwärmung zur Folge.

Abbildung 163. Einblick in einen deutschen C-Test zum Schülerlaborangebot

Für die Erhebung des deklarativen Wissenszuwachses werden in der Fachliteratur für das Schülerlabor geschlossene Aufgabenformate (wie z.B. Multiple-Choice-Tests und Lückentexte) als favorisiert beschrieben [302, S.122-123]. Dabei ist der Einsatz von eigens entwickelten Wissenstests, die die Zielsetzung einer Lernerfolgskontrolle verfolgen, im Rahmen von Triangulationsforschungsvorhaben in der Chemiedidaktik üblich [303, S.110]. Folglich wurde für das vorliegende Forschungsvorhaben ein Wissenstest entwickelt und im Prä-/Post-Design realisiert. Zur Überprüfung der Fachkenntnisse wurde ein Multiple-Choice Test mit jeweils vier Antwortoptionen pro Frage konzipiert. Den Lernenden wird vor Beginn des Tests kommuniziert, dass nur eine der vier Antwortoptionen richtig ist. Als fünfte Antwortmöglichkeit wurde das Item „Ich weiß es nicht“ integriert, um falsche Antworten von Nichtwissen abzugrenzen (vgl. Abbildung 164). Der Test umfasst insgesamt 14 Fragen.

Die ersten fünf Fragen widmen sich inhaltlich dem Vorwissen der Lernenden zu Kohlenstoffdioxid, daran schließen sich 11 Fragen zu den Inhalten des Laborangebots an. Der Wissenstest wird in der deutschen Sprache abgefragt, da das Vorwissen der Lernenden einbezogen werden sollte. Dieses wurde im Chemieunterricht bei allen Lernenden nicht in der englischen Sprache vermittelt, weshalb eine bilinguale oder rein englische Abfrage nicht zielführend gewesen wäre. Der Wissenstest wird mit Hilfe des Programms LimeSurvey erhoben und ist Teil des Fragebogens.

<p>*</p> <p>2. Man kann Kohlenstoffdioxid mit der _____ nachweisen.</p> <p><i>Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:</i></p> <p><input type="radio"/> Knallgasprobe</p> <p><input type="radio"/> Glimmspanprobe</p> <p><input type="radio"/> Kalkwasserprobe</p> <p><input type="radio"/> Fehlingprobe</p> <p><input type="radio"/> Ich weiß es nicht.</p>	<p>*</p> <p>9. Direct Air Capture (DAC) ist ein Prozess bei dem</p> <p><i>Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:</i></p> <p><input type="radio"/> Kohlenstoffdioxid in Erdschichten verpresst wird.</p> <p><input type="radio"/> Kohlenstoffdioxid zur Züchtung von Algen genutzt wird.</p> <p><input type="radio"/> Kohlenstoffdioxid in Salzsäure eingeleitet wird.</p> <p><input type="radio"/> Kohlenstoffdioxid aus der Luft gefiltert wird.</p> <p><input type="radio"/> Ich weiß es nicht.</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Abbildung 164. Exemplarische Fragen aus dem Wissenstest

Neben dem Wissenstest werden die Lernenden vor und nach der Intervention zu ihren Erfahrungen befragt. Im Prä-Fragebogen wurde eine soziodemografische Abfrage integriert. Im Post-Fragebogen findet sich neben dem Wissenstest eine Befragung zu den bearbeiteten Stationen (siehe Anhang 6). Daran anschließend werden die Lernenden gebeten, mit einer vierstufigen Likert-Skala zu dem digitalen Lernbegleiter und den Arbeitsmaterialien sowie zu dem Kursangebot Einschätzungen vorzunehmen. Zum Abschluss besteht außerdem die Gelegenheit, in einem Anmerkungsfeld freie Rückmeldungen zu geben. Einige Items des Post-Fragebogens weisen gezielt Überschneidungen mit Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen auf. Dies ermöglicht bei der Auswertung für einzelne Experimentierstationen einen Abgleich der Angaben von Beobachtenden und Lernenden. Durch die Vielfalt der Erhebungsinstrumente und die damit einhergehende Menge der erhobenen Daten, kann in dieser Arbeit nur auf bestimmte Schwerpunkte eingegangen werden.

Folglich wird in 5.4.1-5.4.3 eine Auswahl der Forschungsergebnisse präsentiert, die für die Beantwortung der Forschungsfragen (FF) für den dritten Iterationszyklus relevant sind.

Für die Erprobungen des dritten Iterationszyklus werden folgende Forschungsfragen für die entwickelte Schülerlaboreinheit „What to do with CO₂?“ formuliert:

Forschungsmethode teilnehmende Beobachtung: Bewertung des Arbeitsmaterials und der Lernumgebung mittels CLIL-Beobachtungsbogen (Lehrkräfte)

(FF7) Erfüllt das entwickelte Arbeitsmaterial laut dem adaptierten Beobachtungsbogen die pädagogischen Ziele einer bilingualen Schülerlaboreinheit?

(FF8) Erfüllt die gestaltete Lernumgebung laut dem Beobachtungsbogen die pädagogischen Ziele einer bilingualen Schülerlaboreinheit?

Forschungsmethode: Wissenstest

(FF9) Findet bei den Lernenden ein Fachwissenszuwachs durch die Intervention statt?

Forschungsmethode: C-Test

(FF10) Führt die Intervention zu einer Steigerung der englischen Fachsprachkompetenz bei den Lernenden?

5.4.1 Erprobung des Schülerlabors mit Studierenden (19.04.2024)

Um einen reibungslosen Ablauf zu realisieren, wurde das finale Schülerlaborangebot zunächst mit einer Studierendenkohorte (n = 10) erprobt. Dabei sollten im Besonderen die organisatorischen Rahmenbedingungen wie z.B. die intendierten Zeitbedarfe und Abläufe sowie die Praktikabilität der Erhebungsinstrumente evaluiert werden. Darüber hinaus sollten die Studierenden die Handhabung des digitalen E-Books erproben.

Zehn Studierende des Masterstudiengangs Gymnasiallehramt Chemie nahmen an dieser ersten Form der Erhebung teil. 20% von ihnen verfügten über Erfahrungen mit bilinguaem Unterricht. Die Studierenden absolvierten den Kurs in einem vierstündigen Zeitrahmen (vgl. Tabelle 59). Zu Beginn wurde eine Prä-Erhebung mit Fragebogen, Wissens- und C-Test durchgeführt.

Daran anschließend fand der Wechsel in die englische Sprache und der thematische Einstieg über die „Carbon Clock“²⁰⁰ und das darin modellierte verringerte CO₂-Budget der Erde statt. Als mögliche Lösungsansätze wurden dann in arbeitsteiliger Gruppenarbeit die verschiedenen Bereiche der CCS-Prozesskette erarbeitet. Vier Studierende absolvierten Station 1, vier Studierende Station 2 und zwei Studierende beschäftigten sich mit der Station 3. Einige Eindrücke aus der Erprobung sind in Abbildung 165 festgehalten. Mit Hilfe der Inhalte des digitalen E-Books füllten die Studierenden gemeinsam ihre ExpertCard aus und stellten ihre Ergebnisse im Anschluss in der Präsentationsphase vor. Daran schloss sich eine Diskussion und gemeinsame Evaluation der erarbeiteten Technologieoptionen im Hinblick auf deren Zukunftsfähigkeit an. Nach einer kurzen Pause wurde die Post-Erhebung mit Fragebogen, sowie C- und Wissenstest durchgeführt.

²⁰⁰ Carbon Clock des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung: <https://www.pik-potsdam.de/de/institut/abteilungen/klimaoekonomie-und-politik/verbleibendes-co2-budget> (letzter Zugriff 07.05.25).

Tabelle 59. Zeitlicher Ablauf der Erhebung



Zeit [Uhr]	Phase	Sprache	Inhalte
09:00-09:40	Ankommen in der Lernumgebung		Prä-Erhebung
09:40-09:45	Kurze Pause		
09:45-10:00	Inhaltlicher Einstieg		<ul style="list-style-type: none"> • inhaltliche Einführung Carbon Clock • technische Einführung Lernbegleiter
10:00-12:00	Carbon Capture, Utilisation and Storage		arbeitsteilige Arbeit im Labor Station 1: Carbon Capture Station 2: Carbon Storage Station 3: Carbon Utilisation Erarbeitung der Inhalte der Module und Erstellung einer englischen Expert Card Optionale Stationen
12:00-12:30	Mittagspause		
12:30-13:10	Sicherung	 	<ul style="list-style-type: none"> • Präsentation der Expert Cards der Stationen 1-3 in den Gruppen • Einordnung der Technologien in CCUS-Übersicht • Auswahl einer Technologie für BNE-Zukunftstag • Formulierung von Handlungsoptionen
13:10-13:40	Anwendung		<ul style="list-style-type: none"> • Präsentation der Ergebnisse im Plenum • Diskussion und gemeinsame Evaluation der Zukunftsfähigkeit der verschiedenen Technologien
13:40-13:45	Kurze Pause		
13:45-14:25	Nach der Intervention		Post-Erhebung



Abbildung 165. Impressionen aus der Erprobung mit Studierenden

Ergebnisse

Mit Hilfe des CLIL-Beobachtungsbogens wurde eine externe Lehrperson²⁰¹ mit Erfahrungen im Bereich BCU gebeten, die Materialien vor der Erprobung zu analysieren. Außerdem füllte die unterrichtende Lehrkraft den ersten Teil des Bogens aus. In beiden Beobachtungsbögen lassen sich hauptsächlich positive Rückmeldungen zu den Materialien finden. Die Mehrheit der Indikatoren für gute CLIL-Materialien wurde von beiden Personen als beobachtet (+) auf dem Bogen vermerkt. Ausgewählte Items des Bogens sind in Tabelle 60 dargestellt.

Tabelle 60. Ausgewählte Items des CLIL-Beobachtungsbogen Teil 1

CLIL-Beobachtungsbogen	Beobachtende Station 1-3	Lehrkraft Station 1-3
Teil 1: Analyse des Materials vor der Erprobung		
Das CLIL-Material ...		
Item 1.2 integriert Aufgabenstellungen, die inhaltlich und sprachlich dem Niveau der Lernenden entsprechen. Indikatoren: Die Aufgabenstellungen sind klar und präzise formuliert.	(?) Das hängt sehr von der Lerngruppe ab. In der Erprobung schien es zu passen.	(+) je nach Gruppe und Vorkenntnissen Abweichungen möglich
Item 5.2 enthält verschiedene Formen der Binnendifferenzierung, um stärkere und schwächere SuS zu motivieren. Indikatoren: z.B. Sprinter-Aufgaben für stärkere SuS, sprachliche Scaffolds (Annotationen, Satzanfänge, Word Banks) und inhaltliche Scaffolds (Infokästen, Definitionen, inhaltliche Audiozusammenfassungen)	(+) <ul style="list-style-type: none"> • Early finisher, help cards • linearer Aufbau mit optionalen Elementen 	(+)
Item 7.1 nutzt Schülerexperimente, um die Inhalte handlungsorientiert zu vermitteln. Indikatoren: Das Material initiiert Schülerexperimente, die einen authentischen Sprachanlass bieten und von den Lernenden eigenständig durchgeführt werden können.	(+)	(+)
CLIL-Beobachtungsbogen	Beobachtende Station 1-3	Lehrkraft Station 1-3
Item 7.2 enthält gestufte Auswertungsfragen, um die SuS schrittweise und selbstständig zur Auswertung der Versuche anzuleiten. Indikatoren: Die Aufgaben bauen aufeinander auf und ermöglichen den Lernenden das inhaltliche Verständnis des Versuchs sowie den Bezug zur behandelten Technologieoption.	(+)	(+)
Item 8.2 stellt Bezüge zum Alltag der Lernenden her. Indikatoren: In den Materialien finden sich Anknüpfungspunkte zur Lebenswelt der Lernenden.	(+)	(+)

²⁰¹ Der Begriff „extern“ bezieht sich hierbei auf eine Lehrperson, die nicht in die Betreuung oder Durchführung des Angebots involviert ist.

CLIL-Beobachtungsbogen	Beobachtende Station 1-3	Lehrkraft Station 1-3
<p>Item 8.3 initiiert Lerngelegenheiten, um die Bewertungskompetenz und das kritische Denken der SuS zu schulen.</p> <p>Indikatoren: Schulung der Bewertungskompetenz durch z.B. Einsatz von SOCMEs, Diskussionen, klare Positionierung zu Thematiken, Äußerung von eigenen Ansichten und Meinungen, Einschätzungen auf Grundlage gewonnenen der Kenntnisse.</p>	(+)	<p>(+)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Äußerungen von eigenen Aussagen • Einschätzung [zu verschiedenen Technologieoptionen] werden vorgenommen

Mit Hilfe des zweiten Teils des CLIL-Beobachtungsbogens wurde die Analyse der bilingualen Lernumgebung während der Erhebung durchgeführt. Die externe Lehrperson beobachtete schwerpunktmäßig Station 2, während die Lehrkraft Station 3 in den Blick nahm. **Station 2** wurde ausgewählt, weil vorherige Erprobungen gezeigt hatten, dass sie für Lernende experimentell anspruchsvoll ist. Station 3 wurde ausgewählt, weil sie in vorangegangenen Iterationszyklen noch nicht detailliert erhoben wurde. Auf Grund der Erfahrungen aus vorangegangenen Erprobungen (vgl. 5.3.1) wurde die teilnehmende Beobachtung jeweils auf eine Station mit maximal vier Teilnehmenden beschränkt. Bedingt durch die vielschichtigen, parallel ablaufenden Gruppenprozesse war eine umfassende Beobachtung anderweitig schwer realisierbar. Sowohl die externe Lehrperson und als auch die unterrichtende Lehrkraft vermerkten alle angeführten Indikatoren als in der Lernumgebung beobachtbar. Für Station 2 sind ausgewählte Items der beobachtenden Person (B) mit inhaltlich überschneidenden Items aus dem Post-Fragebogen der Studierenden (S) in Tabelle 61 dargestellt. Das sprachliche und inhaltliche Niveau war für die Teilnehmenden angemessen (vgl. Itemkategorie 1.1). Durch das schriftliche Lernprodukt der Expert Card wurden sowohl schriftliche als auch mündliche Sprachanlässe gegeben (vgl. Itemkategorie 2.2). Die Lernenden konnten die neuen Inhalte mit ihrem Vorwissen verknüpfen (vgl. Itemkategorie 3.2) und waren in der Lage in der Gruppenarbeitsphase je nach Bedarf code-switching zwischen der englischen und deutschen Sprache zu realisieren (vgl. Itemkategorie 6.2).

Tabelle 61. Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen Teil 2 für Station 2

Items für Station 2 Carbon Storage Externer Beobachter (B) Studierende (S) n = 4	Antworten (+) beobachtet Ø Mittelwert der Angaben (1) ich stimme zu – (4) ich stimme nicht zu
Teil 2: Analyse des bilingualen Lernangebots während der Erprobung In der CLIL-Lernumgebung ...	
1.1 wird ein Lernsetting realisiert, das inhaltlich und sprachlich dem Niveau der Lernenden entspricht.	
B-Indikatoren: SuS können erfolgreich Aufgabenstellungen folgen und Aufgaben vollständig bearbeiten. Die verwendete Sprache ist nicht zu schwer.	(+) im Wesentlichen gut möglich/individuell verschieden
S9: Ich konnte den Aufgabenstellungen folgen und diese vollständig bearbeiten.	Ø 1,25
S10: Die verwendete Sprache war <i>nicht</i> zu schwer.	Ø 1,25
2.2 haben die SuS viele Möglichkeiten zu sprechen und zu schreiben.	
B-Indikatoren: Lernende sprechen mehr als Lehrperson. Kooperative Sozialformen ermöglichen angemessene Beteiligung. SuS verdeutlichen ihren Verständnisprozess in schriftlichen Aufgaben.	(+) <ul style="list-style-type: none"> durch gewähltes Setting automatisch gegeben hilfreich ist die Aufgabe, dass ein Produkt (Expert Card) generiert werden soll, damit ist die Notwendigkeit der Verschriftlichung gegeben
S11: In der Gruppenarbeit konnte ich mich angemessen mündlich beteiligen.	Ø 1,25
S12: Die schriftlichen Aufgaben haben mir geholfen, die Inhalte besser zu verstehen.	Ø 1,5
3.2 wird Bezug auf Vorwissen und Vorerfahrungen der Lernenden genommen.	
B-Indikatoren: SuS werden aufgefordert, neu Gelerntes mit bekannten Lerninhalten zu verbinden.	(+)
S13: Ich konnte mein Vorwissen aus dem Chemieunterricht mit dem neu Gelernten verbinden.	Ø 1,0
6.2 können Lernende in Gruppenarbeitsphasen <i>code-switching</i> anwenden.	
B-Indikatoren: Die Kommunikation zwischen den Lernenden in den Gruppenphasen erfolgt auf Deutsch und auf Englisch, je nach Verständigungsbedarf.	(+) <ul style="list-style-type: none"> private Gespräche und funktionelle Kommunikation auf Deutsch inhaltbezogene Kommunikation von E-Book her auf Englisch, dann weiter ins Deutsche driftend
S14: In der Gruppe haben wir auf Deutsch und auf Englisch geredet, je nach Bedarf.	Ø 1,25
Freitext Beobachtende Person <ul style="list-style-type: none"> Der Fragebogen erfasst (herkunftsbedingt) nicht das experimentelle Vorgehen. Die Umsetzung von Vorgaben in experimentelles Handeln funktioniert aber im Wesentlichen. Studierende <ul style="list-style-type: none"> Lernbegleiter sind sowohl optisch besser aufbereitet als die jetzigen Labothek-Begleiter. Ebenso ist die Aufgabe schön gestuft, das heißt am Ende werden die Informationen zusammengetragen und es macht „Klick“. 	

Ausgewählte Items für **Station 3** aus dem Beobachtungsbogen der Lehrperson (B) und inhaltlich überschneidenden Items aus dem Post-Fragebogen der Studierenden (S) sind in Tabelle 62 dargestellt. Grundlegend wurden etwas weniger sprachliche als experimentelle Hürden festgestellt (vgl. Item Freitext). In der Gruppenarbeit wurde versucht Englisch zu sprechen, nach einer Weile jedoch zunehmend in die deutsche Sprache gewechselt (vgl. Itemkategorie 6.2).

Das inhaltliche und sprachliche Niveau (vgl. Itemkategorie 1.1) war sehr schwer zu beurteilen, da die beobachtenden Studierenden sehr unterschiedlich leistungsstark waren. Die Möglichkeit des kooperativen Arbeitens mit schriftlichen und mündlichen Lerngelegenheiten wurde von den Studierenden positiv bewertet (vgl. Itemkategorie 2.2). Neu gelernte Inhalte konnten mit Vorwissen verknüpft werden (vgl. Itemkategorie 3.2). In der abschließenden Plenumsphase gelang es allen Teilnehmenden sehr gut, den Sprachwechsel von der englischen in die deutsche Sprache zu vollziehen (vgl. Item Freitext). Mit Hilfe ihrer erarbeiteten englischen Expert Card waren die Lernenden in der Lage, die Inhalte auf Deutsch zu verbalisieren. In der sich anschließenden Diskussion zu möglichen Handlungsoptionen und der Zukunftsfähigkeit der Technologien wurden von der gesamten Kohorte vielfältige Vorschläge und Impulse zu möglichen Lösungswegen eingebracht.

Tabelle 62. Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen Teil 2 für Station 3

Items für Station 3: Carbon Utilisation	
Lehrperson (B)	Antworten
Studierende (S) n = 2	(+) beobachtet Ø Mittelwert der Angaben (1) ich stimme zu – (4) ich stimme nicht zu
Teil 2: Analyse des bilingualen Lernangebots während der Erprobung	
In der CLIL-Lernumgebung ...	
1.1 wird ein Lernsetting realisiert, das inhaltlich und sprachlich dem Niveau der Lernenden entspricht.	
B-Indikatoren: SuS können erfolgreich Aufgabenstellungen folgen und Aufgaben vollständig bearbeiten. Die verwendete Sprache ist nicht zu schwer.	(+) einige Studierende haben Probleme bei der Formulierung ihrer mündlichen und schriftlichen Antworten
S9: Ich konnte den Aufgabenstellungen folgen und diese vollständig bearbeiten.	Ø 2
S10: Die verwendete Sprache war <i>nicht</i> zu schwer.	Ø 2
2.2 haben die SuS viele Möglichkeiten zu sprechen und zu schreiben.	
B-Indikatoren: Lernende sprechen mehr als Lehrperson. Kooperative Sozialformen ermöglichen angemessene Beteiligung. SuS verdeutlichen ihren Verständnisprozess in schriftlichen Aufgaben.	(+)
S11: In der Gruppenarbeit konnte ich mich angemessen mündlich beteiligen.	Ø 1,5
S12: Die schriftlichen Aufgaben haben mir geholfen, die Inhalte besser zu verstehen.	Ø 1,5
3.2 wird Bezug auf Vorwissen und Vorerfahrungen der Lernenden genommen.	
B-Indikatoren: SuS werden aufgefordert, neu Gelerntes mit bekannten Lerninhalten zu verbinden.	(+) Konzept Photosynthese durch Infokarte vorentlastet
S13: Ich konnte mein Vorwissen aus dem Chemieunterricht mit dem neu Gelernten verbinden.	Ø 1,5

Items für Station 3: Carbon Utilisation Lehrperson (B) Studierende (S) n = 2	Antworten (+) beobachtet Ø Mittelwert der Angaben (1) ich stimme zu – (4) ich stimme nicht zu
6.2 können Lernende in Gruppenarbeitsphasen <i>code-switching</i> anwenden.	
B-Indikatoren: Die Kommunikation zwischen den Lernenden in den Gruppenphasen erfolgt auf Deutsch und auf Englisch, je nach Verständigungsbedarf.	(+) <ul style="list-style-type: none"> in der Gruppenarbeitsphase wird versucht Englisch zu sprechen, bei Unklarheiten wird [oft] ins Deutsche gewechselt
S14: In der Gruppe haben wir auf Deutsch und auf Englisch geredet, je nach Bedarf.	Ø 3,5
Freitext Beobachtende Lehrperson <ul style="list-style-type: none"> [Betreuende müssen] gezielt auf sprachliche Hilfestellungen hinweisen tw. scheitern die Lernenden an experimentellen Schwierigkeiten und nicht an der Sprache abschließender Sprachwechsel funktioniert sehr gut; Studierende können sich mit englischen Notizen sehr gut auf Deutsch ausdrücken BNE-Aspekt bewerten wird im Abschluss von Studierenden selbst angebahnt und vielfältige Handlungsoptionen als Lösungsweg vorgeschlagen Studierende <ul style="list-style-type: none"> keine Angaben 	

Trotz des kurzen Interventionszeitraums konnten sowohl im Wissens- als auch im C-Test Lernzuwächse bei den Studierenden festgestellt werden. Die Zahl der richtigen Antworten steigerte sich von Prä- zu Post-Test von 69% auf 89% (vgl. Abbildung 166). Auch die Falschantworten und die Antworten im Bereich „ich weiß es nicht“ konnten reduziert werden.

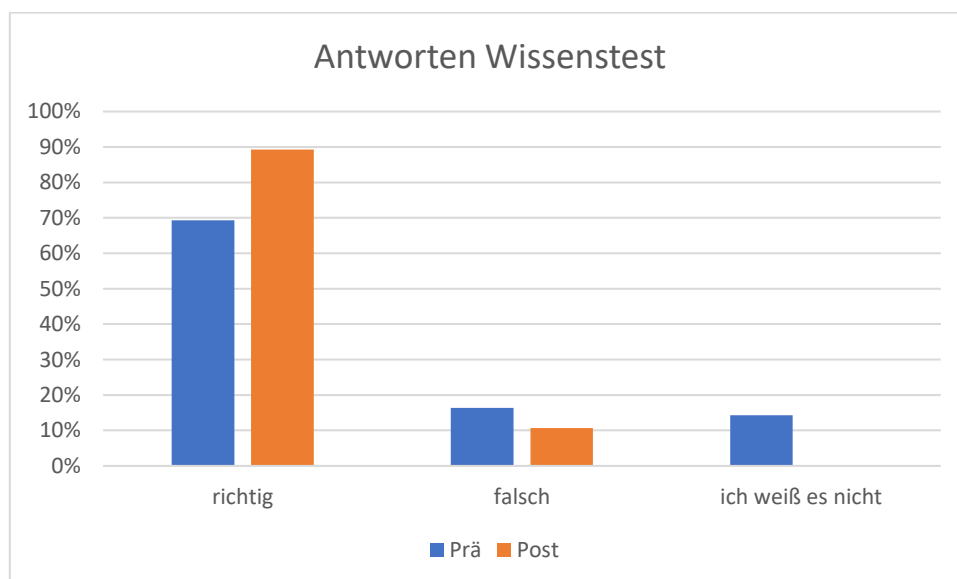


Abbildung 166. Ergebnisse Wissenstest Studierende

Die C-Tests wurden mit Hilfe eines selbst konzipierten Manuals ausgewertet (siehe Anhang 6: Erhebungsinstrumente). Dieses wurde in Anlehnung an die Publikationen von Özcan [301, S.135-141] und Rupprecht [304, S.101] entwickelt. Im Manual wird zwischen dem Richtig/Falsch-Wert (R/F), dem Worterkennungswert (WE), dem Differenzwert (W), einem semantischen Fehler (SF) und fehlenden Antworten (X) unterschieden.

Der Richtig/Falsch-Wert (R/F) ergibt sich aus der Anzahl der richtig ausgefüllten Lücken. Eine Antwort wird als richtig gewertet, wenn die Lücke nach Musterlösung semantisch, orthografisch und grammatikalisch korrekt ergänzt wurde. Wird das zu ergänzende Wort semantisch erkannt, enthält aber orthografische Fehler, wird es als Worterkennungswert (WE) gewertet. Der Wert, der hierbei erzielt wird, lässt auf die Fähigkeiten des Textverständnisses schließen (z.B. Textsinn erkannt, jedoch falsch ausgefüllt). Der Differenzwert (W) ergibt sich aus dem Vergleich von R/F-Werten und WE-Werten. Der Unterschied zwischen den beiden Werten spiegelt das Verhältnis zwischen produktiven und rezeptiven Fähigkeiten der SchülerInnen wider. Ein großer Differenzwert (ca. >12) lässt z.B. darauf schließen, dass ein Textverständnis vorhanden ist, dass jedoch Schwierigkeiten in der formalsprachlich korrekten Umsetzung (Orthografie) bestehen.

Enthält der Text eine sprachlich richtige Antwort, die jedoch fachlich eine andere Bedeutung hat, wird dies als semantischer Fehler (SF) kodiert. Fehlende Antworten werden mit (X) kodiert. Insgesamt gab es pro Text zwanzig zu füllende Lücken.

In den deutschen Texten (Text 1 und Text 2) können kleinere Steigerungen zwischen Prä- und Post-Erhebung sowohl beim R/F-Wert als auch beim WE-Wert festgestellt werden (vgl. Abbildung 167 und 168). Diese geringe Steigerung war erwartbar, da ein Großteil der Intervention auf Englisch und nicht auf Deutsch erfolgte und sich die Inhalte der Tests auf das Vorwissen der Lernenden beziehen.

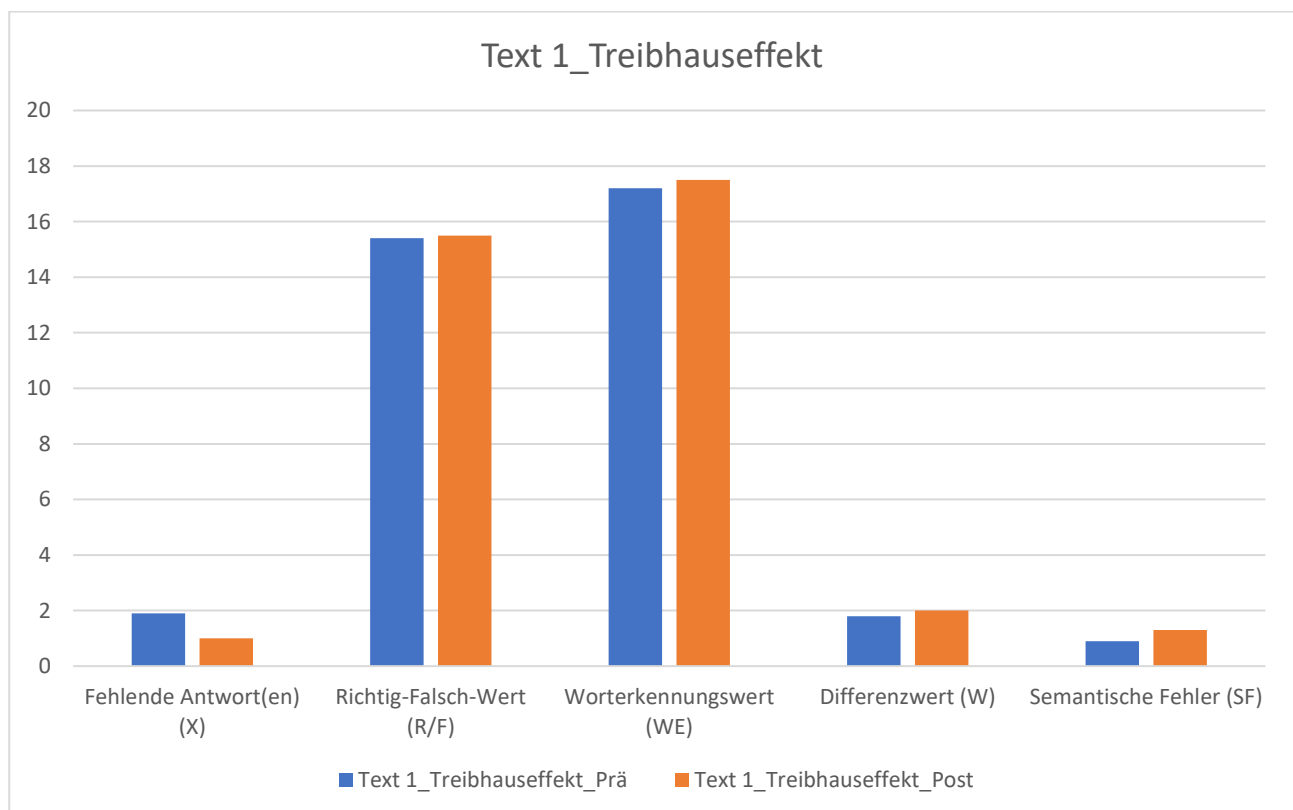


Abbildung 167. Auswertung C-Test Text 1 Studierendenkohorte

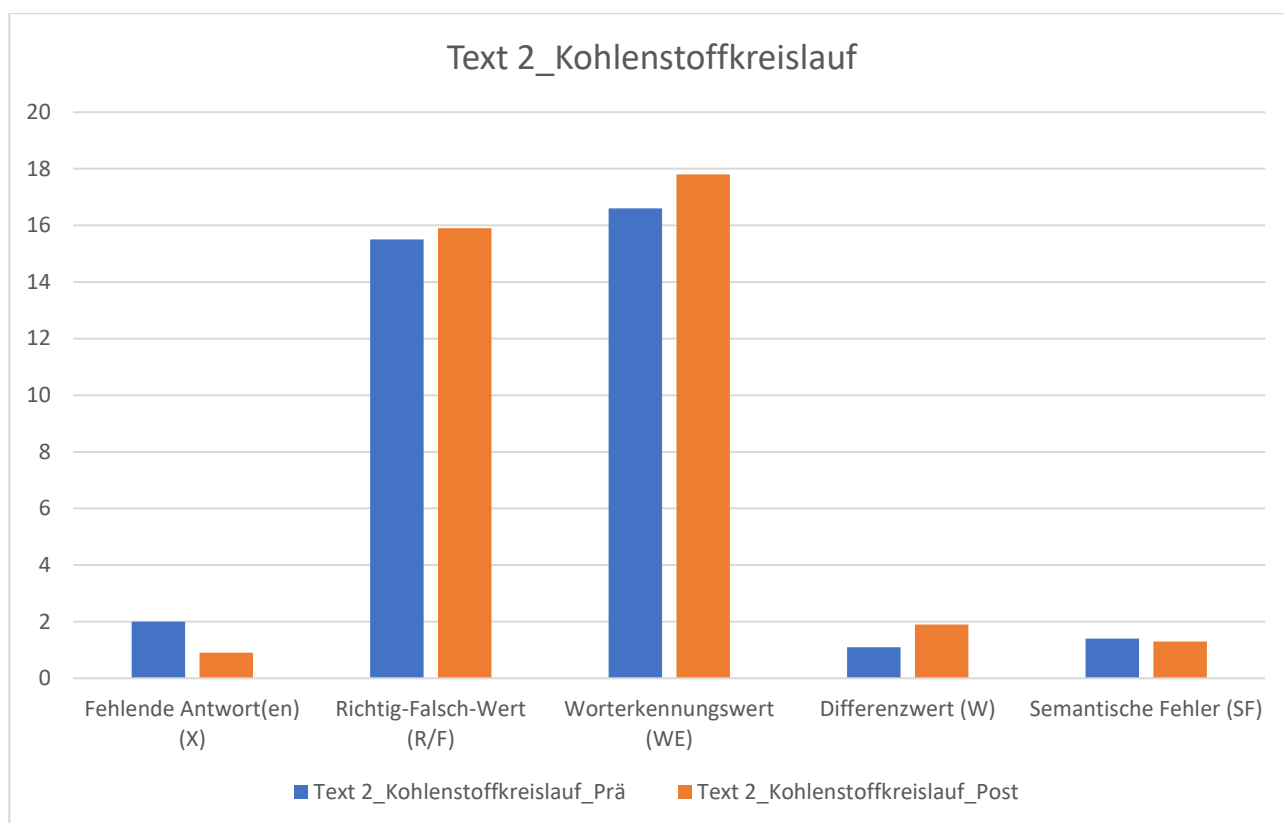


Abbildung 168. Auswertung C-Test 2 Studierendenkohorte

In der englischen Sprache (Text 3 und 4) schnitten die Studierenden insgesamt schlechter ab. Nichtsdestotrotz konnten beim R/F-Wert als auch beim WE-Wert Steigerungen zwischen Prä- und Post-Test festgestellt werden (vgl. Abbildung 169 und 170). Dies ist besonders deutlich im Bereich des Textes 4, der die neuen Fachbegriffe und Inhalte des Schülerlabors enthält.

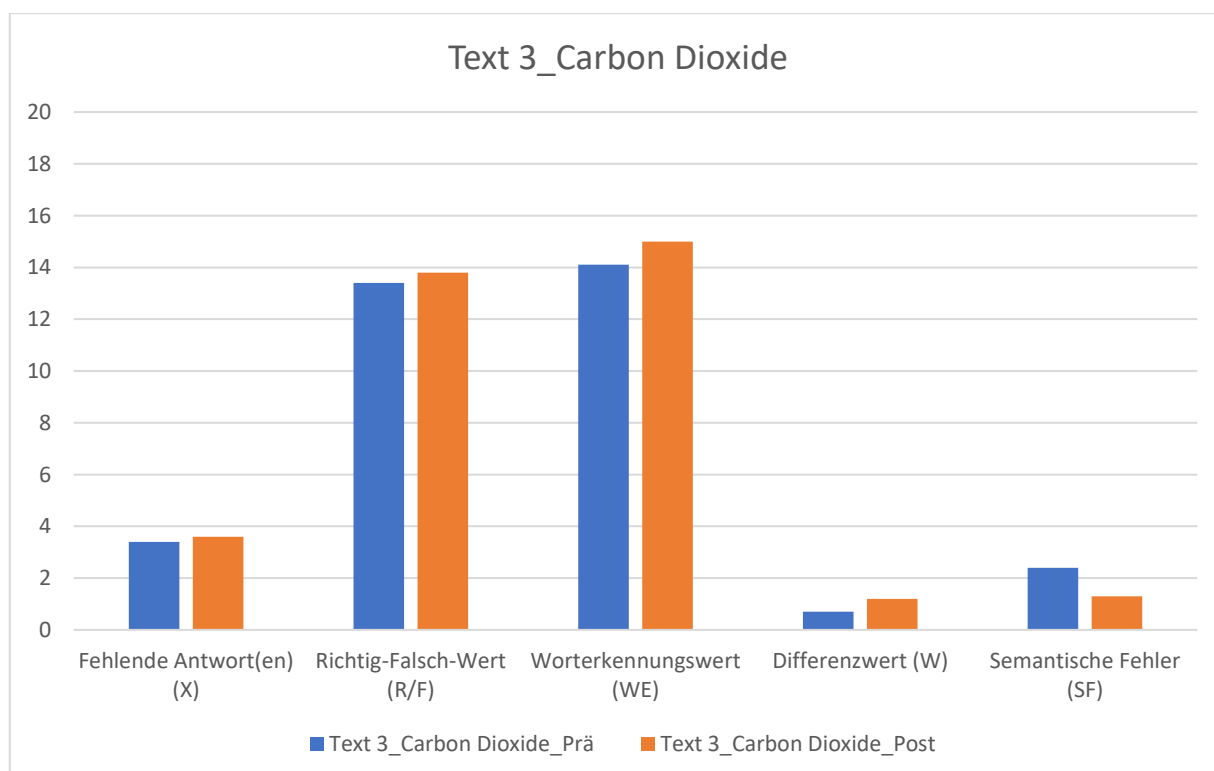


Abbildung 169. Auswertung C-Test Text 3 Studierendenkohorte

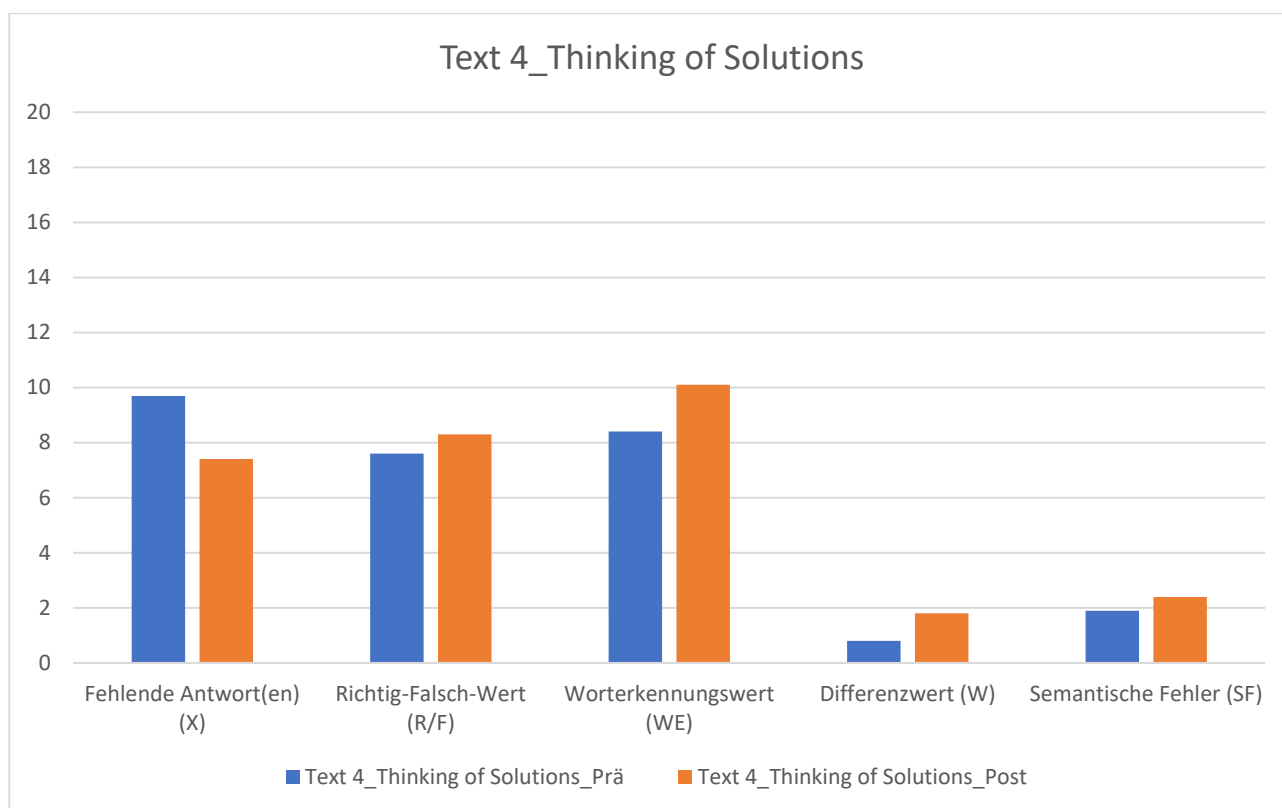


Abbildung 170. Auswertung C-Test Text 4 Studierendenkohorte

Insgesamt ließen sich durch die Erhebungsinstrumente Steigerungen im Prä- und Post-Wissenstest feststellen. Trotz des kurzen Interventionszeitraums waren geringfügig positive Trends in der Steigerung der Kenntnisse der Studierenden sowohl im Bereich Fachwissen als auch bei den Fachbegrifflichkeiten erfassbar. Die Rückmeldungen zu den beobachtenden Stationen waren sowohl aus Studierenden- als auch aus Beobachtenden-Perspektive positiv.

Auftretende experimentelle Schwierigkeiten (z.B. Umgang mit Kolbenprobern, Gasbeuteln, Schrittfolge der Durchführung) oder Optimierungsmöglichkeiten der digitalen E-Books wurden durch die Erhebungsinstrumente nicht erfasst. Jedoch wurden von den Studierenden bzw. Beobachtenden Auffälligkeiten (wie z.B. Tippfehler, Fehler bei Verlinkungen) zurückgemeldet und für die folgenden Kohorten angepasst. Das Laborangebot konnte innerhalb des antizipierten Zeitrahmens durchgeführt werden, so dass der geplante Ablauf für die nachfolgenden Schülergruppen beibehalten wurde.

5.4.2 Erprobung des Schülerlabors mit einer Lernendengruppe (29.01.2025)

Infolge der Corona Pandemie waren die Anmeldezahlen im Schülerlabor rückläufig, weshalb im Jahr 2024 keine Erprobungen realisiert werden konnten. Gründe für die verhaltenen Anmeldungen waren zum einen die Einschränkungen für die Genehmigung von Exkursionen zu außerschulischen Lernorten, zum anderen gab es trotz vielfältiger Werbungsmaßnahmen Lehrkräfte, die Vorbehalte und Ängste bezüglich eines bilingualen Angebots äußerten. Ab dem Jahr 2025 konnten dann vermehrt Schülergruppen für das Laborangebot gewonnen werden.

Dieser Sachverhalt lässt sich wahrscheinlich auf die im Lernangebot behandelte Thematik und die Zielgruppe Einführungsphase zurückführen. Im Januar 2025 wurde die erste Erprobung des Laborangebots mit einer Lernendengruppe durchgeführt.

Als erste Gruppe absolvierte ein Q2-Kurs eines Gymnasiums das neu entwickelte Angebot (vgl. Abbildung 171). Die Kohorte setzte sich aus elf Teilnehmenden eines Grund- und Leistungskurses zusammen. 18% der Lernenden hatten bereits in ihrer Schullaufbahn Erfahrungen mit bilingualen Unterricht in anderen Fächern gesammelt. Der Labortag verlief analog zu den Schilderungen aus 5.4.1., d.h. mit arbeitsteiligen Gruppenarbeitsphasen. Der Kurs wurde von einer Lehrperson geleitet und moderiert. Außerdem übernahm sie die Beobachtung der Experimentierstation 2 mit Hilfe des CLIL-Beobachtungsbogens. Zur Betreuung der Stationen wurden drei Lehramtsstudierende eingesetzt. Die Betreuung eines solchen Schülerlaborangebots ist in der Didaktik der Chemie an der Bergischen Universität Wuppertal Teil der Ausbildung von Lehramtsstudierenden. Vor und nach der Intervention wurden die Lernenden über einen Fragebogen zu ihren Eindrücken befragt. Außerdem wurde ein Wissens- und C-Test durchgeführt.



Abbildung 171. Impressionen aus der Erprobung mit dem Q2-Kurs

Ergebnisse

Die Erkenntnisse der teilnehmenden Beobachtung zu **Station 1** wurden mit passenden Items aus dem Post-S-Fragebogen gegenübergestellt (vgl. Tabelle 63).

Tabelle 63. Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen Teil 2 für Station 1

Items für Station 1: Carbon Capture Lehrperson (B) Schülerinnen und Schüler (S) n = 4		Antworten (+) beobachtet Ø Mittelwert der Angaben (1) ich stimme zu – (4) ich stimme nicht zu
Teil 2: Analyse des bilingualen Lernangebots während der Erprobung In der CLIL-Lernumgebung ...		
1.1 wird ein Lernsetting realisiert, das inhaltlich und sprachlich dem Niveau der Lernenden entspricht.		
B-Indikatoren: SuS können erfolgreich Aufgabenstellungen folgen und Aufgaben vollständig bearbeiten. Die verwendete Sprache ist nicht zu schwer.	(+) nutzen lab equipment poster und Annotations	
S9: Ich konnte den Aufgabenstellungen folgen und diese vollständig bearbeiten.	Ø 1,0	
S10: Die verwendete Sprache war <i>nicht</i> zu schwer.	Ø 1,25	
2.2 haben die SuS viele Möglichkeiten zu sprechen und zu schreiben.		
B-Indikatoren: Lernende sprechen mehr als Lehrperson. Kooperative Sozialformen ermöglichen angemessene Beteiligung. SuS verdeutlichen ihren Verständnisprozess in schriftlichen Aufgaben.	(+) einige [inhaltliche und experimentelle] Hinweise durch Betreuende nötig [Hilfe- und Infokarten werden auch auf mehrmaligen Hinweis hin nicht in Anspruch genommen]	
S11: In der Gruppenarbeit konnte ich mich angemessen mündlich beteiligen.	Ø 1,25	
S12: Die schriftlichen Aufgaben haben mir geholfen, die Inhalte besser zu verstehen.	Ø 1,75	
3.2 wird Bezug auf Vorwissen und Vorerfahrungen der Lernenden genommen.		
B-Indikatoren: SuS werden aufgefordert, neu Gelerntes mit bekannten Lerninhalten zu verbinden.	(+) mündlicher Austausch mit Betreuer	
S13: Ich konnte mein Vorwissen aus dem Chemieunterricht mit dem neu Gelernten verbinden.	Ø 1,25	
6.2 können Lernende in Gruppenarbeitsphasen <i>code-switching</i> anwenden.		
B-Indikatoren: Die Kommunikation zwischen den Lernenden in den Gruppenphasen erfolgt auf Deutsch und auf Englisch, je nach Verständigungsbedarf.	(+) kurze Wechsel deutsch/englisch	
S14: In der Gruppe haben wir auf Deutsch und auf Englisch geredet, je nach Bedarf.	Ø 1,75	
Freitext Beobachtende Lehrperson <ul style="list-style-type: none">• Lernende lesen nicht richtig → falsche Versuchsdurchführung, unaufmerksam• Experimentell unsicherer und langsamer als SommerUni-Kohorten• Lernende tw. hinweisresistent → nehmen Anmerkungen der Betreuenden nicht auf• [bei einigen Lernenden] geringe Gesamtmotivation Lernende <ul style="list-style-type: none">• Ich fand den Kurs sehr interessant und konnte altes Wissen mit neuem Wissen gut verknüpfen. Die Hilfsstudenten waren ebenfalls sehr freundlich, hilfsbereit und konnten Fragen beantworten, wenn welche aufgetreten sind. Ich würde den Kurs weiterempfehlen.• Die Lernbegleiter [hier sind die betreuenden Studierenden gemeint] mussten oft helfen, um Aufgabenstellungen und Experimentierschritte nachzuvollziehen.• Die Studenten waren alle sehr nett und hilfsbereit, sowie die Leiterin.• Danke		

Die beobachteten Lerner in dieser Gruppe waren experimentell sehr unsicher. Dies bestätigen auch Angaben der Schülerinnen und Schüler aus dem Prä-Fragebogen. Sieben von 11 Lernenden stimmten dem Item „Beim Experimentieren im CheU fühle ich mich oft unsicher“ überwiegend (1 Nennung) oder teilweise zu (6 Nennungen). In Station 1 äußerten sich diese Unsicherheiten laut Rückmeldungen der Lehrperson durch unzureichendes Lesen der Versuchsanleitungen, langsames Experimentiertempo und unzureichende Inanspruchnahme der zahlreichen Hilfestellungen (vgl. Item-Kategorie 2.2 und Freitext). Bei einigen Lernenden konnte auch eine geringe Gesamtmotivation beobachtet werden. Das verwendete Sprachniveau in den Arbeitsmaterialien wurde jedoch von Beobachter und Lernenden als nicht zu schwer eingeschätzt (vgl. Itemkategorie 1.1). Durch zielgerichtete Anleitung der studentischen Betreuer konnten die Lernenden die Station trotz gewisser Hemmnisse bearbeiten (vgl. Item Freitext). Die Schülerinnen und Schüler gaben an, ihr Vorwissen mit dem neu Erlernten verbinden zu können (vgl. Itemkategorie 3.2 und Freitext).

Im Post-Fragebogen merkten die drei Teilnehmenden der Station 3 ihre Unzufriedenheit mit dem eingesetzten Experiment an. In diesem Durchgang wurde die Option 2 des Experiments zur Photosynthese (vgl. 4.4.2.6) an der Station durchgeführt. Dabei versetzen die Lernenden Wasserproben mit Bromthymolblaulösung und Wasserpest und stellen einen Ansatz ins Dunkle und bestrahlen einen anderen Ansatz für ca. 90 Minuten mit Licht. Die Lernenden empfanden den Versuch als zu einfach und nicht zielführend für die eigentliche Technologie der Algenkultivierung (vgl. S-Post-Freitext). Die Lernenden empfanden die Station außerdem als zu theoretisch. Diese Rückmeldung müssen natürlich auch in Bezug auf die Jahrgangsstufe der Kohorte eingeschätzt werden. Sie sind zwei Jahr älter als die intendierte Zielgruppe und verfügen über mehr Hintergrundwissen zu den Inhalten, weshalb ihnen die Bearbeitung der Station wahrscheinlich leichter fällt. Trotzdem wurden die Rückmeldungen ernst genommen. Das Experiment wurde überarbeitet. In den Folgekohorten wurde die Option 3 des Experiments mit digitaler Messtechnik und angepassten Auswertungsfragen implementiert.

Neben Bemerkungen zu den Einzelstationen gaben die Lernenden auch allgemeine Rückmeldungen zum Laborangebot in ihrem Fragebogen ab. Im Freitextfeld des Fragebogens wurde von einem Lernenden zurückgemeldet: „Ich fand den Kurs sehr interessant und konnte altes Wissen mit neuem Wissen gut verknüpfen. Die Hilfsstudenten [*Anmerkung: hier sind die Betreuer an den Stationen gemeint*] waren ebenfalls sehr freundlich, hilfsbereit und konnten Fragen beantworten, wenn welche aufgetreten sind. Ich würde den Kurs weiterempfehlen.“ Im Post-Fragebogen meldeten 73% der Lernenden zurück, dass sie den Kurs interessant fanden.

Neben der Erhebung der Lernendenperspektive durch den Prä/Post-Fragebogen und der Erhebung Perspektive der Lehrkraft mit Hilfe einer teilnehmenden Beobachtung, wurden zusätzlich noch ein Wissenstest und ein C-Test mit den Lernenden durchgeführt.

Beim Wissenstest konnten Steigerungen zwischen Prä- und Posttest festgestellt werden. Die Lernenden verbesserten den Prozentsatz von richtigen Antworten von 57% auf 86%. Außerdem konnten falsche und „ich weiß es nicht“-Antworten vom Prä- zum Post-Test reduziert werden (vgl. Abbildung 172).

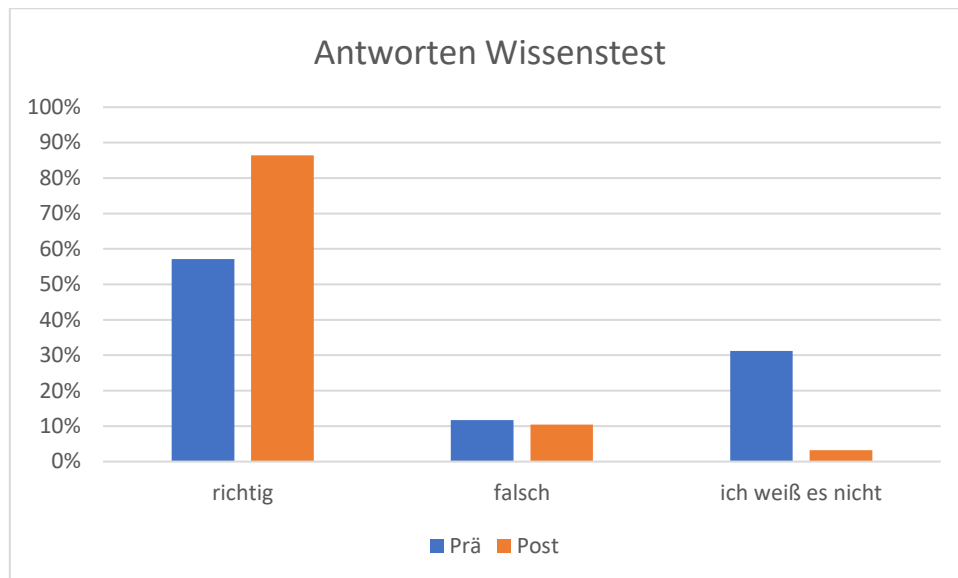


Abbildung 172. Ergebnisse des Prä-/Post-Wissenstest der Q2-Kohorte

Im C- Test ließen sich sowohl in der deutschen als auch der englischen Sprache geringfügige Steigerungen im R/F- und Worterkennungswert identifizieren (vgl. Abbildung 173 -176). Besonders deutlich sind diese Unterschiede zwischen Prä- und Posttest im Text 4, der englischen Fachbegriffe aus dem Kursangebot abprüft (vgl. Abbildung 176).

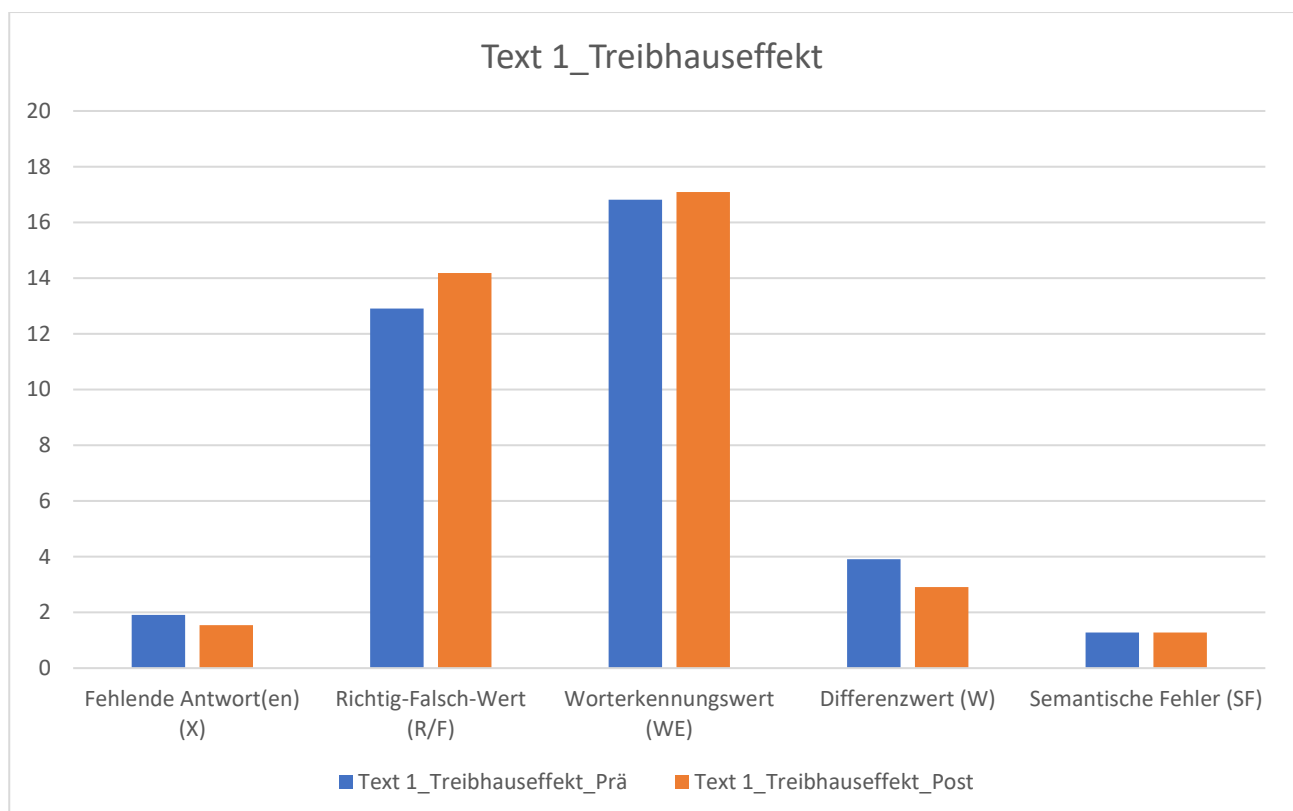


Abbildung 173. C-Test Ergebnisse des Textes 1 (deutsch) der Q2-Kohorte

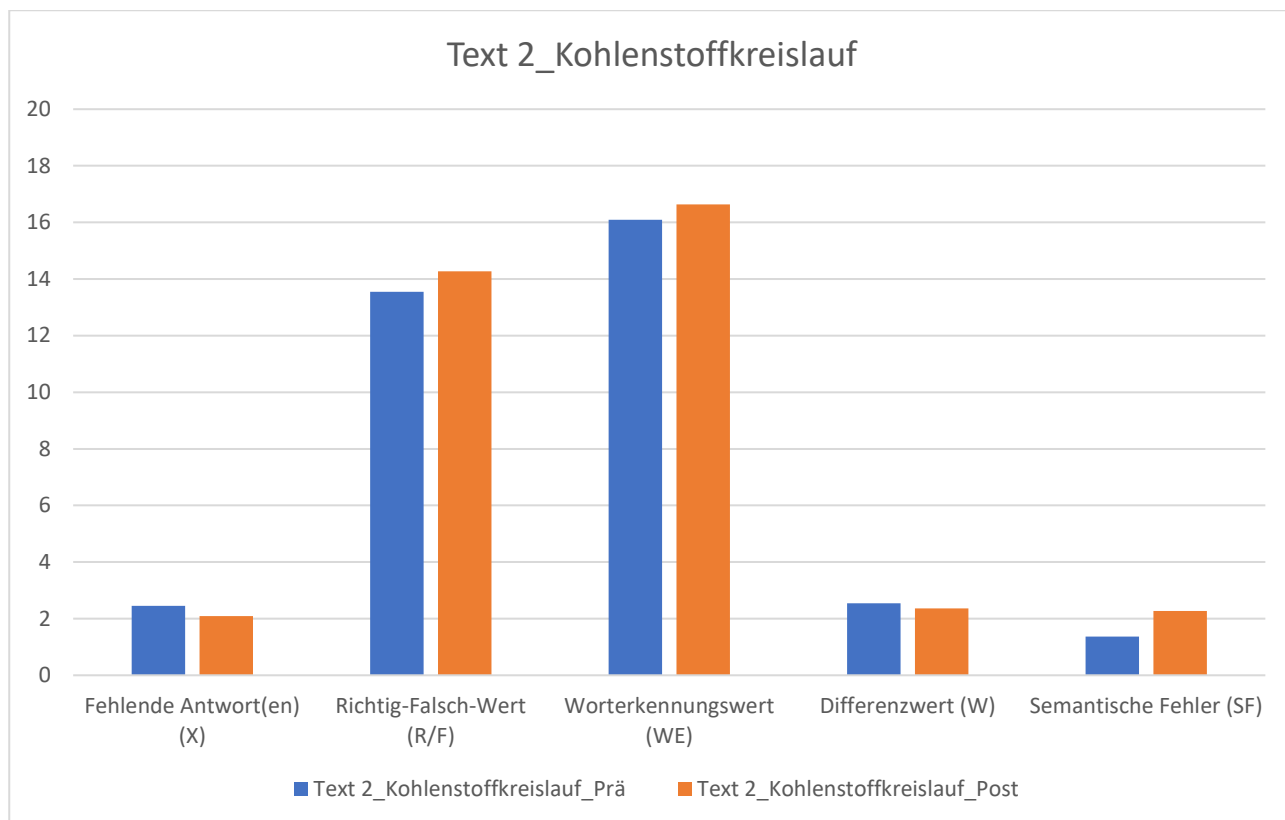


Abbildung 174. C-Test Ergebnisse des Textes 2 (deutsch) der Q2-Kohorte

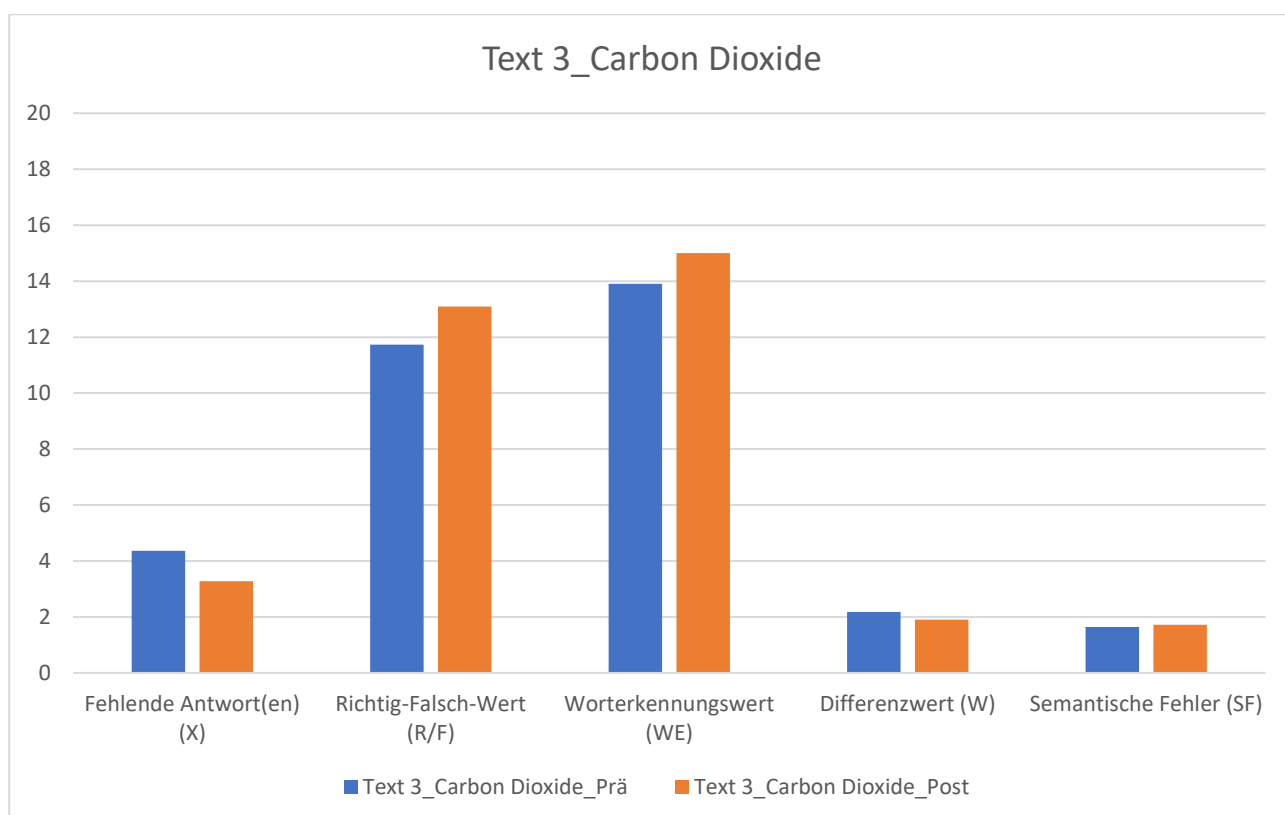


Abbildung 175. C-Test Ergebnisse Text 3 (englisch) der Q2-Kohorte

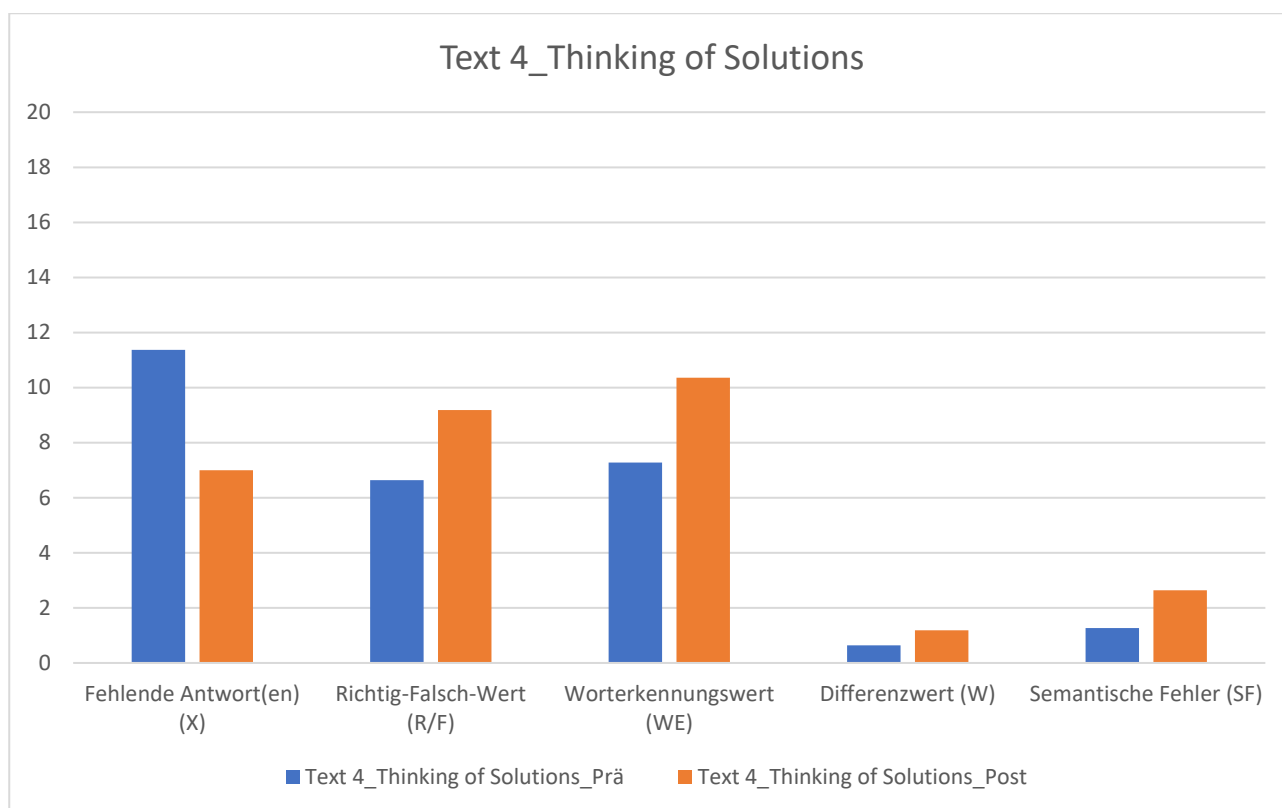


Abbildung 176. C-Test Ergebnisse Text 4 (englisch) der Q2-Kohorte

Insgesamt ließen sich durch die Erhebungsinstrumente, wie auch bei der Studierendenerprobung, Steigerungen zwischen Prä- und Posttest im Wissens- und C-Test feststellen. Die Rückmeldungen zu den beobachtenden Stationen waren sowohl aus Lernenden- als auch aus Beobachtenden-Perspektive zum größten Teil positiv. Auftretende Optimierungsmöglichkeiten (z.B. im Experiment der Station 3) wurden für die Erprobungen mit Kohorten der Jahrgangsstufe EF überarbeitet und angepasst (vgl. 5.4.3). Das Laborangebot konnte innerhalb des antizipierten Zeitrahmens durchgeführt werden, so dass der geplante Ablauf und das didaktische Konzept als finales Angebot für die nachfolgenden Schülergruppen beibehalten wurde.

5.4.3 Erprobungen mit EF-Kohorten (April-Mai 2025)

In den Monaten April und Mai wurden abschließende Untersuchungen mit Lernenden der Jahrgangsstufe EF durchgeführt (vgl. Tabelle 64). Die Gruppen hatten sehr unterschiedliche bilinguale Vorerfahrungen und besuchten Gesamtschulen bzw. Gymnasien. Den Lehrkräften wurde vier Wochen vor dem Besuch ein optionales Vorbereitungsmodul zur inhaltlichen und sprachlichen Vorbereitung zur Verfügung gestellt. Nur die letzte Gruppe nahm dieses Angebot wahr. Auf Grund der Rückmeldungen der Q2-Lernendengruppe (vgl. 5.4.2) wurde das Experiment der Station 3 überarbeitet und der Einsatz von digitaler Messtechnik forciert. Dafür wurden mehrere Versuchsaufbauten und Messinstrumente getestet. Die finale Version des Versuchs ist unter 4.4.2.6 beschrieben. Auf Grund der Etablierung von neuen Versuchsinhalten bei der Erprobung, wurde Station 3 bei allen drei Kohorten durch die Lehrkraft teilnehmend beobachtet. Anschließend wurden die Lernmaterialien und die Versuchsdurchführung nach jeder Kohorte bei Bedarf angepasst.

Tabelle 64. Übersicht der untersuchten EF-Kohorten

	09.04.2025	12.05.2025	28.05.2025
Teilnehmende	n = 15	n = 27	n = 18
Schulform	Gesamtschule	Gymnasium	Gymnasium
Lernende mit allgemeinen Vorerfahrungen im bilingualen Unterricht	8%	7%	61 %
Optionales Vorbereitungsmodul bearbeitet	nein	nein	12 von 18
inhaltliche Adaptionen für die Erprobung	Station 3: Versuchsdurchführung mit digitaler Messtechnik (vgl. 4.4.2.6)	Station 3: Versuchsaufbau und Durchführung ohne pH- Messung	Station 3: Anpassung der Versuchsdurch- führung, Ergänzung Fotofunktion, Anpassung einiger Aufgabenstellungen
teilnehmende Beobachtung	Station 3	Station 2 und 3	Station 1 und 3

Sofern es die organisatorischen Rahmenbedingungen zuließen, wurde eine weitere Station von einer wissenschaftlichen Hilfskraft beobachtet. Darüber hinaus wurden die Lernenden analog zu den bisherigen Erhebungen der dritten Iterationsschleife im Prä/Post-Design über einen Fragebogen mit integriertem Wissenstest befragt und mussten einen C-Test absolvieren. Einen Einblick in die Erprobungen bieten die Fotos in Abbildung 177. Neben der Lehrkraft wurden die Lernenden von drei Studierenden an den unterschiedlichen Stationen betreut.



Abbildung 177. Impressionen aus den Erprobungen vom 09.04. und 28.05.25.

Wissenstest

Im deutschsprachigen Wissenstest wurden die Zahl der Antworten der Lernenden in Prozent erfasst. In der dazu erstellten Auswertungsgrafik wird zwischen den richtigen und falschen Antworten und der Kategorie „ich weiß es nicht“ farblich unterschieden (vgl. Abbildung 179). Die Ergebnisse von Prä- und Post-Test sind nebeneinander für jede Kohorte aufgetragen.

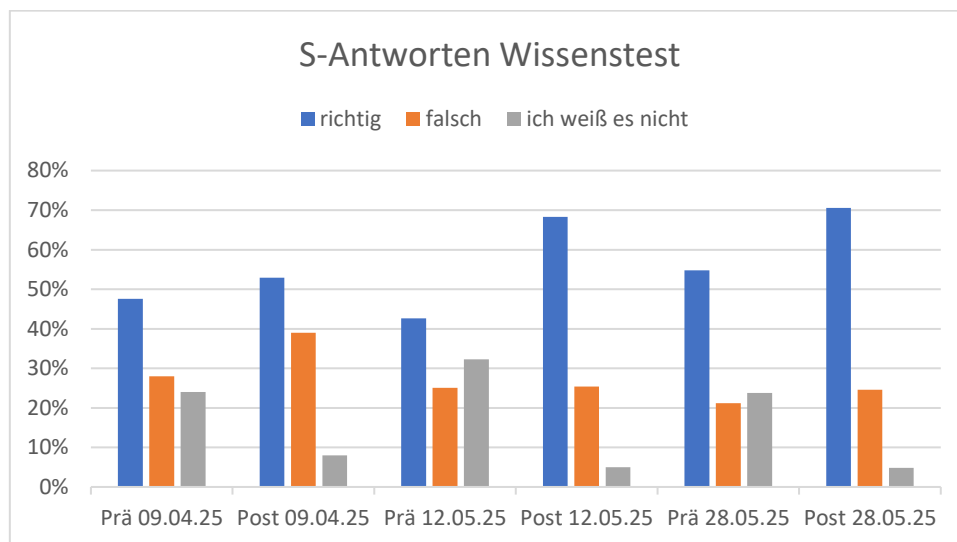


Abbildung 178. S-Antworten Wissenstest in Prozent

Bei allen Kohorten lässt sich eine Steigerung der richtigen Antworten vom Prä- zum Posttest feststellen. Diese Steigerung ist bei der Kohorte vom 12.05.25 mit 25% am höchsten. In allen drei Gruppen reduziert sich der Prozentsatz an „Ich weiß es nicht“-Antworten vom Prä- zum Posttest. Dafür steigert sich die Zahl der Falschantworten im Post-Test. Diese Effekte sind bei den Gymnasialkohorten als geringfügig einzustufen und liegen bei der Gruppe vom 12.05. bei 0,29% und der Gruppe vom 28.05. bei 3,4%. Bei der Gesamtschulkohorte vom 09.04.25 lässt sich eine Steigerung der Falschantworten von Prä- zum Posttest um 11% beobachten. In der Präsentationsphase der Gruppe wurde deutlich, dass Fehlvorstellungen im Vorwissen bestanden und auch neu erlernte Inhalte falsch wiedergegeben wurden. Es ist ein Indiz dafür, dass (bestehende) Fehlvorstellungen in einer kurzen Intervention schwer veränderbar sind. Bei allen Kohorten wäre deshalb eine thematische Nachbereitung des Schülerlaborbesuchs im Chemieunterricht empfehlenswert. Aus diesem Grund wurden den Lehrkräften die ausgefüllten Lernprodukte²⁰² der Lernenden zur Verfügung gestellt, damit sie diese in ihrem Unterricht erneut aufgreifen konnten.

In allen drei EF-Gruppen lässt sich eine Steigerung der richtigen Antworten durch die Intervention feststellen. Dies deutet auf einen Zuwachs an Fachwissen durch die Intervention hin. Trotz vergleichbarer begleitender Betreuung bilden die Daten Leistungsunterschiede der Kohorten in Abhängigkeit von der Schulform ab. Die gymnasiale Gruppe mit bilingualer Vorerfahrung schnitt erwartungsgemäß am besten ab und beantwortete im Posttest 71% der Fragen richtig, dicht gefolgt von der gymnasialen Gruppe vom 12.05.25 mit 65%.

²⁰² Allen Lehrkräften wurden nach der Intervention die ausgefüllten digitalen E-Books als exportierte pdf-Dateien zur Verfügung gestellt.

Die Gesamtschulkohorte vom 09.04.25 erreichte 53% richtige Antworten im Post-Test. In dieser Kohorte meldeten 33% der Schülerinnen und Schüler im Prä-Fragebogen zurück, dass sie das Fach Englisch nicht mögen und 47% bestätigten eine ähnliche Abneigung gegenüber dem Fach Chemie. Dies könnte neben der Schulformzugehörigkeit eine Erklärung für die abweichenden Ergebnisse sein.

C-Test

Nach dem Wissenstest wurde von den Lernenden aller drei Kohorten vor und nach der Intervention ein C-Test ausgefüllt. Die Schülerinnen und Schüler mussten dazu zwei deutsche und zwei englischsprachige Lückentexte bearbeiten. Der Test wurde durchgeführt, um Veränderungen im Sprachstand der englischen und deutschen Fachsprache festzustellen.

Um die drei zu untersuchenden Kohorten zur Auswertung gegenüberzustellen, wurde die Präsentation der generierten Daten auf den Richtig/Falsch-Wert (R/F)²⁰³ und den Worterkennungswert (WE)²⁰⁴ beschränkt. In den erstellten Balkendiagrammen sind alle drei Erprobungskohorten nebeneinander in unterschiedlichen Farben dargestellt. Die Daten für den Prä-Test sind im Datensatz links und für den Post-Test immer rechts dargestellt. Jedes Diagramm enthält die Daten für einen Lückentest. Die (R/F)-Werte sind auf der linken Hälfte der Darstellung zu finden, die Ergebnisse für die (WE)-Werte finden sich rechtsseitig.

Die Datenwerte geben die Anzahl der richtig ausgefüllten Lücken des Lückentextes wieder (vgl. Abbildung 179-182). In jedem Text konnten maximal 20 Lücken ausgefüllt werden. Wird eine Lücke richtig ausgefüllt, erhalten die Lernenden sowohl einen Punkt für den (R/F)-Wert und den (WE)-Wert. Da sie sowohl richtig ergänzt als auch semantisch erkannt worden ist (vgl. Anhang 6: Erhebungsinstrumente, Manual). Wurde das Wort erkannt, aber falsch geschrieben, wird nur ein Punkt für den (WE)-Wert vergeben (z.B. an[t]ropogen statt anthropogen). Folglich sind die Gesamt-(WE)-Werte in allen vier Lückentexten höher als die (R/F)-Werte.

Insgesamt lassen sich vom Prä- zum Post-Test in allen vier Lückentexten Steigerungen sowohl im (R/F)- als auch im (WE)-Wert erkennen. Die größten Steigerungen zwischen Prä- und Post-Test sind bei allen Kohorten in Text 4 zu verzeichnen. Dabei handelt es sich um den Text mit den neuen Fachbegriffen aus dem Laborangebot (vgl. Abbildung 182). Diese Steigerungen deuten auf die neu erlernten Fachbegrifflichkeiten während der Intervention hin. Es lässt sich vorsichtig schlussfolgern, dass die Lernenden neue Begrifflichkeiten zu den Themenbereichen des Schülerlaborangebots erworben haben.

Darüber hinaus zeigen die Graphen sehr deutlich die unterschiedlichen Leistungsniveaus der untersuchten Kohorten. Die Gruppe mit bilingualer Erfahrung und absolvierten Vorbereitungsmodul (SuS_28.05.2025) schneidet erwartungsgemäß in allen Texten im (R/F)- als auch im (WE)-Wert am besten ab. Die Gesamtschulgruppe (SuS_09.04.2025) erreicht schlechtere Ergebnisse als die gymnasialen Kohorten. Im direkten Vergleich mit ähnlicher bilingualer Vorerfahrung, schneidet die Gymnasialkohorte (SuS_12.05.2025) besser ab als die Gesamtschulkohorte (SuS_09.04.2025).

²⁰³ **Richtig/Falsch-Wert (R/F):** gibt die Anzahl der richtig ausgefüllten Lücken an. Eine Antwort wird als richtig gewertet, wenn die Lücke nach Musterlösung semantisch, orthografisch und grammatikalisch korrekt ergänzt wurde.

²⁰⁴ **Worterkennungswert (WE):** das Wort wurde erkannt und semantisch korrekt ergänzt. Es enthält aber z.B. orthografische Fehler.

Dafür lassen sich bei der Gesamtschulkohorte im Besonderen bei Text drei und anteilig auch bei Text vier (vgl. Abbildung 181 und 182) starke Steigerungen in der englischen Sprache durch die bilinguale Intervention feststellen. Obwohl 33% der Schülerinnen und Schüler zurückmeldeten, das Fach Englisch nicht zu mögen, lässt sich doch ein Lernzuwachs durch die Intervention feststellen. Dieser ist möglicherweise besonders im Bereich der sprachlichen Grundlagen des Themenbereichs auswertbar, die in Text drei abgefragt werden. Ein Grund für die deutlichen Steigerungen könnte sein, dass die Lernenden im Vergleich zu den anderen Kohorten weniger Vorerfahrungen und Kenntnisse in der englischen Fachsprache mitbrachten und somit durch die Intervention viele neue Grundlagen vermittelt bekommen haben. Im Posttest des Texts 3 schnitt (vgl. Abbildung 181) die Gesamtschulgruppe sogar im (WE)-Wert geringfügig besser ab als die Gymnasialkohorte (SuS_12.05.25). Für Text 3 konnten die Gesamtschullernenden die bestehenden Defizite aus dem Prätest innerhalb der Intervention aufholen und schnitten im Posttest sowohl in (R/F)- als auch im (WE)-Wert ähnlich ab wie die gymnasiale Kohorte mit vergleichbaren bilingualen Vorkenntnissen.

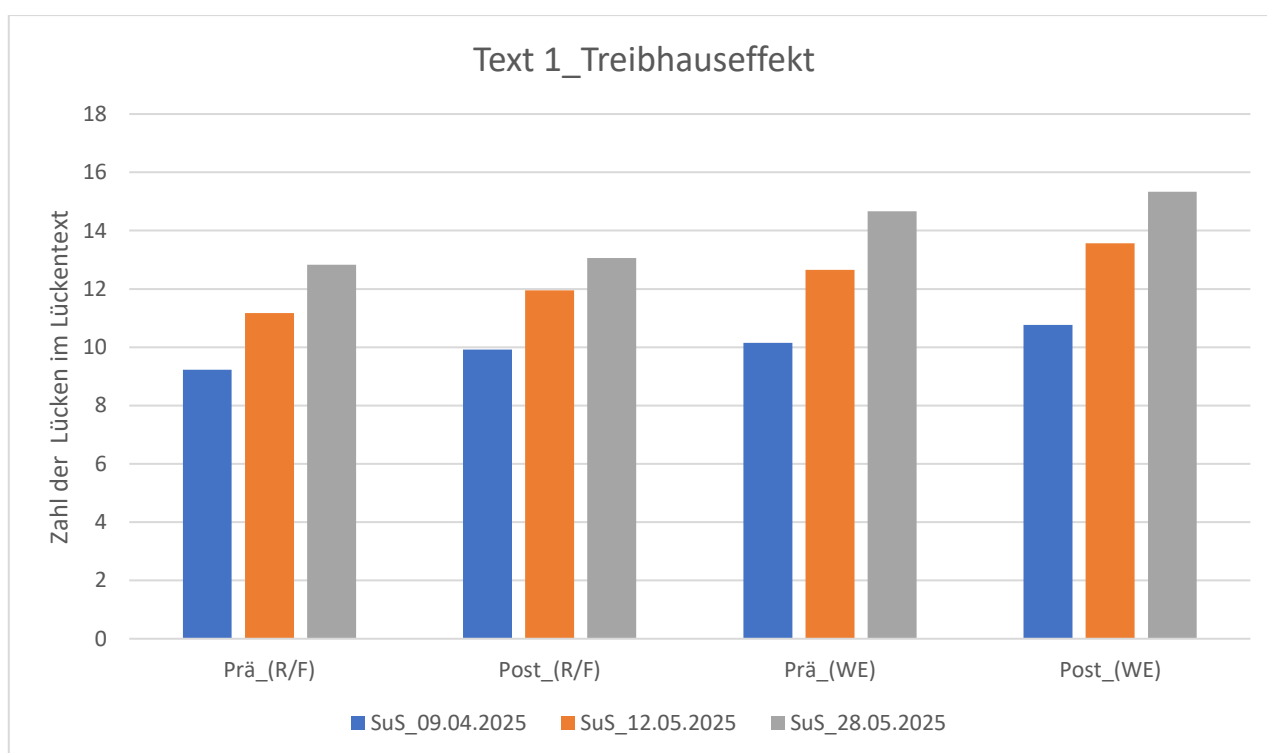


Abbildung 179. C-Test-Ergebnisse Text 1 EF-Kohorten

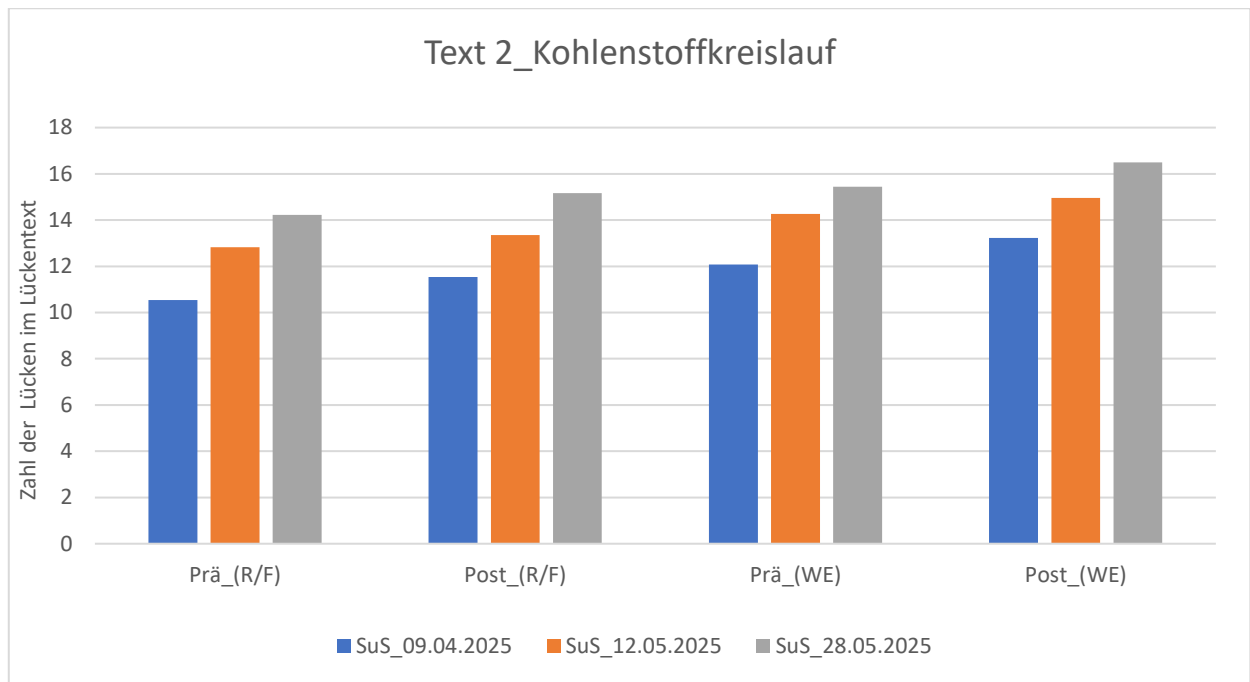


Abbildung 180. C-Test-Ergebnisse Text 2 EF-Kohorten

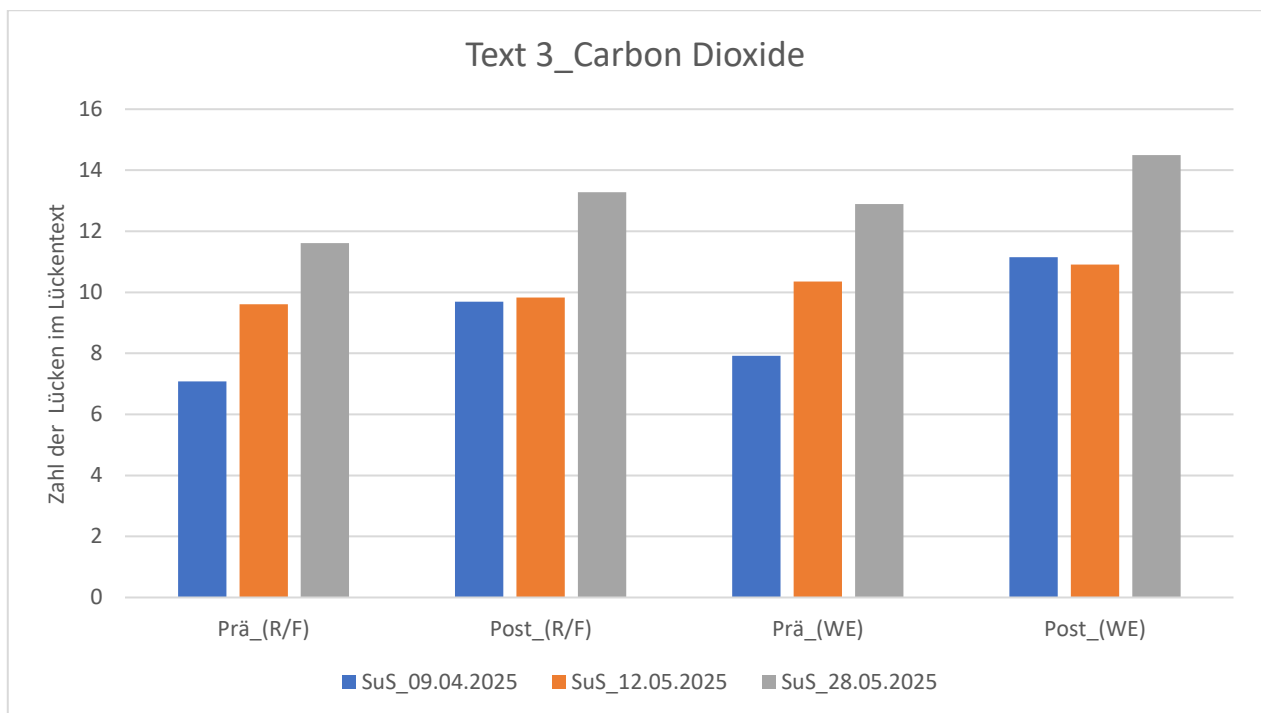


Abbildung 181. C-Test Ergebnisse Text 3 EF-Kohorten

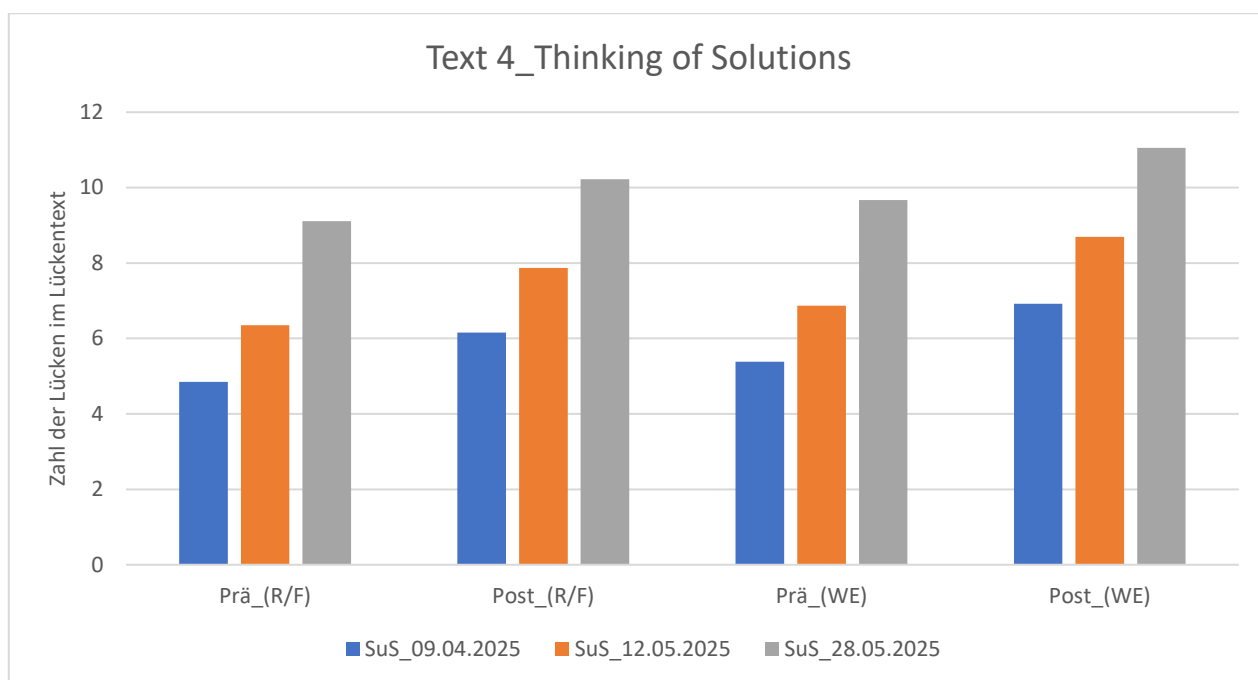


Abbildung 182. C-Test Ergebnisse Text 4 EF-Kohorten

Beobachtungsbögen und Lernenden-Fragebögen

Die Beobachtungsbögen wurden in allen Kohorten in der Mehrheit der Kategorien von den beobachtenden Personen mit einem „(+) beobachtet“ ausgefüllt. Je nach Gruppe wurden bestimmte Stationen schwerpunktmäßig betrachtet (vgl. Tabelle 64). Die Beobachtenden beaufsichtigten je nach Kohortengröße 4-10 Lernende gleichzeitig an den Stationen. Im Folgenden werden nur die überschneidenden Items von Beobachtungsbogen und Post-Schülerfragebogen dargestellt.

Die **erste Gruppe** vom **09.04.25** zeichnete sich durch besondere Angaben in ihrem Prä-Fragebogen aus. 47% der Lernenden gaben an, dass sie Schwierigkeiten beim Verstehen englischer Texte haben. Darüber hinaus gaben 27% der Teilnehmenden an, experimentell unsicher zu sein. In der Kohorte verfügten nur 8% der Lernenden über Vorerfahrungen mit bilingualen Unterricht. Das Vorbereitungsmodul wurde von der Gruppe nicht bearbeitet.

In Tabelle 65 sind die überschneidenden Items von Beobachtern und Lernenden zu **Station 3** zusammengetragen. In dieser Station wurde auf Grund der Rückmeldungen der Q2-Kohorte (vgl. 5.4.2) das Experiment zur Wasserpest überarbeitet und durch eine Variante mit digitaler Messtechnik ersetzt (siehe Anhang 6: digitale E-Books). Für die Forschenden bestand deshalb ein besonderes Interesse daran, wie die Lernenden mit den neu gestalteten Inhalten umgehen würden.

Tabelle 65. Kohorte 09.04.2025- Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen für Station 3

Items für Station 3: Carbon Utilisation Lehrperson (B) Schülerinnen und Schüler (S) n = 4		Antworten (+) beobachtet Ø Mittelwert der Angaben (1) ich stimme zu – (4) ich stimme nicht zu
Teil 2: Analyse des bilingualen Lernangebots während der Erprobung In der CLIL-Lernumgebung ...		
1.1 wird ein Lernsetting realisiert, das inhaltlich und sprachlich dem Niveau der Lernenden entspricht.		
B-Indikatoren: SuS können erfolgreich Aufgabenstellungen folgen und Aufgaben vollständig bearbeiten. Die verwendete Sprache ist nicht zu schwer.	(+) kleinere Nachfragen, sonst ruhige Kohorte	
S9: Ich konnte den Aufgabenstellungen folgen und diese vollständig bearbeiten.	Ø 2	
S10: Die verwendete Sprache war <i>nicht</i> zu schwer.	Ø 2,3	
2.2 haben die SuS viele Möglichkeiten zu sprechen und zu schreiben.		
B-Indikatoren: Lernende sprechen mehr als Lehrperson. Kooperative Sozialformen ermöglichen angemessene Beteiligung. SuS verdeutlichen ihren Verständnisprozess in schriftlichen Aufgaben.	(+)	
S11: In der Gruppenarbeit konnte ich mich angemessen mündlich beteiligen.	Ø 1,5	
S12: Die schriftlichen Aufgaben haben mir geholfen, die Inhalte besser zu verstehen.	Ø 3,3	
3.2 wird Bezug auf Vorwissen und Vorerfahrungen der Lernenden genommen.		
B-Indikatoren: SuS werden aufgefordert, neu Gelerntes mit bekannten Lerninhalten zu verbinden.	(+) gelingt, aber nicht bei allen SuS; Photosynthese bei einigen Lernenden unklar	
S13: Ich konnte mein Vorwissen aus dem Chemieunterricht mit dem neu Gelernten verbinden.	Ø 2	
6.2 können Lernende in Gruppenarbeitsphasen <i>code-switching</i> anwenden.		
B-Indikatoren: Die Kommunikation zwischen den Lernenden in den Gruppenphasen erfolgt auf Deutsch und auf Englisch, je nach Verständigungsbedarf.	(+) flexibel und gewinnbringend, versuchen zu einem großen Teil auf Englisch zu sprechen	
S14: In der Gruppe haben wir auf Deutsch und auf Englisch geredet, je nach Bedarf.	Ø 1,3	
Freitext Beobachtende Lehrperson <ul style="list-style-type: none">pH-Messgeräte funktionieren nicht bzw. liefern in einer Teilgruppe falsche Messwerte → Überarbeitung, erneute Testung im Labor nötig Lernende <ul style="list-style-type: none">-		

Der Großteil der Teilnehmenden der Station 3 kam mit den Aufgabenstellungen zurecht und konnte diese bearbeiten (vgl. B-Item 1.1, S-Item 9). Die Lernenden konnten sich in der Gruppenarbeit beteiligen (vgl. B-Item 2.2, S-Item 11). Die Kommunikation erfolgte flexibel je nach Gesprächssituation auf Deutsch oder auf Englisch (Vgl. B-Item 6.2, S-Item 14).

Experimentell gestaltete sich im Besonderen die Messung der pH-Werte herausfordernd. Die eingesetzten Messgeräte lieferten teilweise falsche Messwerte (vgl. B-Item Freitext). Für die darauffolgenden Kohorten wurde deshalb auf den Einsatz eines pH-Sensors verzichtet.

Auf Grund der Rückmeldungen der Lernenden zu den schriftlichen Aufgaben (vgl. S-Item 12), wurden die experimentellen Auswertungsfragen auf die neue Versuchsvorschrift angepasst und die sprachlichen Hilfestellungen der WordBank passgenau zu den neuen Aufgabenstellungen umformuliert (vgl. Anhang: 6 digitale E-Books).

Die **zweite EF-Gruppe** absolvierte den Kurs am **12.05.2025**. Mit 27 Schülerinnen und Schülern war es die größte der untersuchten Kohorten. Etwa 7% der Lernenden der Gruppe verfügten nach eigenen Angaben über Erfahrungen mit bilingualem Unterricht. Zwei Schülerinnen hatten Erfahrungen durch einen längeren Aufenthalt im englischsprachigen Ausland. Die Teilnehmenden absolvierten kein Vorbereitungsmodul vor Beginn des Kurses. 70% der Lernenden stimmten im Prä-Fragebogen teilweise zu, experimentell unsicher zu sein. In dieser Erprobung wurden die Stationen 3 und 2 teilnehmend beobachtet.

Eine Auswahl der korrelierenden Items der **Station 3** sind in Tabelle 66 dargestellt. Auf Grund der Größe der Kohorte wurde die Station dreifach aufgebaut und die Lernenden arbeiteten in Dreier- und Vierergruppen. Die Lehrperson beobachtete die drei Gruppen parallel, die konzentriert und ruhig arbeiteten. Die Schülerinnen und Schüler konnten den Aufgabenstellungen folgen und die verwendete Sprache in den Materialien war angemessen (vgl. B-Item 1.1, S-Item 9, 10). Die Gruppen kommunizierten auf Deutsch und Englisch und beteiligten sich aktiv (B-Item 2.2, 6.2, S-Item 11, 14). Die schriftlichen Aufgaben im Lernbegleiter wurden von den meisten Lernenden verstanden und erledigt (B-Item 2.2, S-Item 12). Bei der Aktivierung des Vorwissens hatte die Gruppe jedoch einige Schwierigkeiten und konnte zuvor im Unterricht behandelte Inhalte, wie das chemische Gleichgewicht, nicht rekapitulieren und auf den neuen Kontext anwenden (vgl. B-Item 3.2, S-Item 13). Experimentell traten während der Erprobung bei einigen Gruppen Probleme beim Umgang mit der Wasserpest auf. Die Bläschenbildung an der Pflanze war nur bei einer von drei Gruppen beobachtbar (vgl. B-Item Freitext). Wahrscheinlich hing dies mit dem zuvor erfolgten mehrstündigen Dunkelstellen der Pflanze oder dem verwendeten Wasser zusammen. Folglich musste die Vorbereitung der Elodea und die Versuchsdurchführung für die Folgekohorte erneut angepasst werden (vgl. Anhang: 6 digitale E-Books).

Tabelle 66. Kohorte 12.05.2025- Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen für Station 3

Items für Station 3: Carbon Utilisation Lehrperson (B) Schülerinnen und Schüler (S) n = 10		Antworten (+) beobachtet Ø Mittelwert der Angaben (1) ich stimme zu – (4) ich stimme nicht zu
Teil 2: Analyse des bilingualen Lernangebots während der Erprobung In der CLIL-Lernumgebung ...		
1.1 wird ein Lernsetting realisiert, das inhaltlich und sprachlich dem Niveau der Lernenden entspricht.		
B-Indikatoren: SuS können erfolgreich Aufgabenstellungen folgen und Aufgaben vollständig bearbeiten. Die verwendete Sprache ist nicht zu schwer.	(+) ruhige Kohorte, arbeitet konzentriert	
S9: Ich konnte den Aufgabenstellungen folgen und diese vollständig bearbeiten.	Ø 1,6	
S10: Die verwendete Sprache war <i>nicht</i> zu schwer.	Ø 1,5	
2.2 haben die SuS viele Möglichkeiten zu sprechen und zu schreiben.		
B-Indikatoren: Lernende sprechen mehr als Lehrperson. Kooperative Sozialformen ermöglichen angemessene Beteiligung. SuS verdeutlichen ihren Verständnisprozess in schriftlichen Aufgaben.	(+)	
S11: In der Gruppenarbeit konnte ich mich angemessen mündlich beteiligen.	Ø 1,6	
S12: Die schriftlichen Aufgaben haben mir geholfen, die Inhalte besser zu verstehen.	Ø 2,2	
3.2 wird Bezug auf Vorwissen und Vorerfahrungen der Lernenden genommen.		
B-Indikatoren: SuS werden aufgefordert neu Gelerntes mit bekannten Lerninhalten zu verbinden.	(+) tw. können SuS behandelte Inhalte [zum chemischen Gleichgewicht] nicht rekapitulieren	
S13: Ich konnte mein Vorwissen aus dem Chemieunterricht mit dem neu Gelernten verbinden.	Ø 2,4	
6.2 können Lernende in Gruppenarbeitsphasen <i>code-switching</i> anwenden.		
B-Indikatoren: Die Kommunikation zwischen den Lernenden in den Gruppenphasen erfolgt auf Deutsch und auf Englisch, je nach Verständigungsbedarf.	(+) switchen bei Bedarf	
S14: In der Gruppe haben wir auf Deutsch und auf Englisch geredet, je nach Bedarf.	Ø 1,3	
Freitext Beobachtende Lehrperson <ul style="list-style-type: none">Durchführung anpassen (erst Trichter, dann Sensor), Gasbildung auch nach 50 Min bei beiden Gruppen sehr gering, nur eine Gruppe hat eine sinnvolle CO₂-Kurve aufgenommen Lernende <ul style="list-style-type: none">Meiner Meinung nach war der Aufbau des Dokuments nicht klar genug, ähnlich wie !teilweise! die Aufgabenstellung (hätte präziser sein können). Die Gespräche in der Gruppe im Nachhinein haben geholfen, die Themen besser zu verstehen und zu verdeutlichen (so konnte man nochmal lernen).		

An **Station 2** arbeiteten ebenfalls zehn Lernende an drei Aufbauten des Experiments. Die betreuende Beobachterin verfolgte die Bearbeitung dieser Gruppen parallel und notierte ihre Eindrücke, die in Tabelle 67 mit korrelierenden Schüleritems dargestellt sind. Die Lernenden waren experimentell etwas unsicher und auf die Rückversicherung und positive Bestärkung des betreuenden Studierenden angewiesen (vgl. B-Item 1.1, Freitext). Durch die Unsicherheiten wurden die visuellen Unterstützungsmöglichkeiten z.B. bebilderte Versuchsanleitungen des Lernangebots vermehrt genutzt (vgl. B-Item Freitext). Die Lernenden konnten den Aufgaben folgen und diese bearbeiten.

Eine angemessene mündliche Beteiligung innerhalb der Gruppe war realisierbar (vgl. B-Item 1.1, 2.2, S-Item 9, 11). Die Schülerinnen und Schüler waren in der Lage, ihr Vorwissen mit den neu gelernten Inhalten zu verbinden (vgl. B-Item 3.2, S-Item 13). Der Wechsel zwischen der deutschen und englischen Sprache erfolgte in der Gruppe je nach Verständigungsbedarf (vgl. B-Item 6.2, S-Item 14).

Tabelle 67. Kohorte 12.05.2025- Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen für Station 2

Items für Station 2: Carbon Storage Betreuende Beobachterin (B) Schülerinnen und Schüler (S) n = 10		Antworten (+) beobachtet Ø Mittelwert der Angaben (1) ich stimme zu – (4) ich stimme nicht zu
Teil 2: Analyse des bilingualen Lernangebots während der Erprobung In der CLIL-Lernumgebung ...		
1.1 wird ein Lernsetting realisiert, das inhaltlich und sprachlich dem Niveau der Lernenden entspricht.		
B-Indikatoren: SuS können erfolgreich Aufgabenstellungen folgen und Aufgaben vollständig bearbeiten. Die verwendete Sprache ist nicht zu schwer.	(+) fragen auch nach, wenn sie Inhalte schon verstanden haben, Unsicherheiten beim Umgang mit den Geräten	
S9: Ich konnte den Aufgabenstellungen folgen und diese vollständig bearbeiten.	Ø 1,5	
S10: Die verwendete Sprache war nicht zu schwer.	Ø 1,4	
2.2 haben die SuS viele Möglichkeiten zu sprechen und zu schreiben.		
B-Indikatoren: Lernende sprechen mehr als Lehrperson. Kooperative Sozialformen ermöglichen angemessene Beteiligung. SuS verdeutlichen ihren Verständnisprozess in schriftlichen Aufgaben.	(+)	
S11: In der Gruppenarbeit konnte ich mich angemessen mündlich beteiligen.	Ø 1,3	
S12: Die schriftlichen Aufgaben haben mir geholfen, die Inhalte besser zu verstehen.	Ø 2	
3.2 wird Bezug auf Vorwissen und Vorerfahrungen der Lernenden genommen.		
B-Indikatoren: SuS werden aufgefordert, neu Gelerntes mit bekannten Lerninhalten zu verbinden.	(+)	
S13: Ich konnte mein Vorwissen aus dem Chemieunterricht mit dem neu Gelernten verbinden.	Ø 1,8	
6.2 können Lernende in Gruppenarbeitsphasen code-switching anwenden.		
B-Indikatoren: Die Kommunikation zwischen den Lernenden in den Gruppenphasen erfolgt auf Deutsch und auf Englisch, je nach Verständigungsbedarf.	(+) Ersetzung des Begriffs durch deutsches Wort im englischen Satz, z.T. auch der Versuch mehrere Begriffe einzusetzen	
S14: In der Gruppe haben wir auf Deutsch und auf Englisch geredet, je nach Bedarf.	Ø 1,7	
Freitext Betreuende Beobachterin		
<ul style="list-style-type: none">starke Nutzung von Abbildungen (Lab Equipment Poster, bebilderte Versuchsanleitung)spontane Sprachwechsel durch Betreuende „It’s Dreiwegehahn in German“		
Lernende		
<ul style="list-style-type: none">[xy] war ein guter Lehrer - Die Lerneinheit war vielfältig und es war eine gute Mischung aus eigener Beteiligung und lernen. - Weitermachen, da es ein essentielles Thema ist um die Welt in Zukunft bewohnbar zu erhalten.[xy] hat einen sehr guten job gemacht und uns geholfen ohne uns die Lösung vorzusagen		

Die **letzte EF-Kohorte** absolvierte den Kurs am **28.05.2025**. Die Gruppe unterschied sich von den anderen, da an ihrer Schule bilingualer Unterricht in den Fächern Biologie und Geschichte angeboten wird. Deswegen gaben 61% der Teilnehmenden an, über Vorerfahrungen im bilingualen Unterricht zu verfügen. Darüber hinaus wurde von einem Teil der Kohorte (66,67%) das Vorbereitungsmodul zum Kurs absolviert. Bei diesem Durchgang wurden die Station 1 und erneut Station 3 beobachtet. Letztere im Besonderen, um Wirksamkeit der Änderungen in der Versuchsdurchführung und den Aufgabenstellungen zu beurteilen.

Die korrelierenden Items für **Station 1** sind in Tabelle 68 dargestellt. Die Lernenden arbeiteten nach Angaben der beobachtenden Person sehr zurückhaltend und langsam (vgl. B-Item 1.1, Freitext), waren jedoch sehr bemüht, miteinander Englisch zu sprechen (vgl. B-Item 2.2, 6.2, S-Item 14) und konnten den Aufgabenstellungen folgen und diese bearbeiten (vgl. B-Item 1.1, S-Item 9). Die Lernenden waren in der Lage, ihr Vorwissen mit den neuen Inhalten der Lernumgebung zu verbinden (vgl. B-Item 3.2, S-Item 13).

Tabelle 68. Kohorte 28.05.2025- Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen für Station 1

Items für Station 1: Carbon Capture Betreuende Beobachterin (B) Schülerinnen und Schüler (S) n = 6	Antworten (+) beobachtet Ø Mittelwert der Angaben (1) ich stimme zu – (4) ich stimme nicht zu
Teil 2: Analyse des bilingualen Lernangebots während der Erprobung	
In der CLIL-Lernumgebung ...	
1.1 wird ein Lernsetting realisiert, das inhaltlich und sprachlich dem Niveau der Lernenden entspricht.	
B-Indikatoren: SuS können erfolgreich Aufgabenstellungen folgen und Aufgaben vollständig bearbeiten. Die verwendete Sprache ist nicht zu schwer.	(+) [sehr schüchterne Gruppe] zunächst viel Rückversicherung nötig
S9: Ich konnte den Aufgabenstellungen folgen und diese vollständig bearbeiten.	Ø 1,3
S10: Die verwendete Sprache war <i>nicht</i> zu schwer.	Ø 1,2
2.2 haben die SuS viele Möglichkeiten zu sprechen und zu schreiben.	
B-Indikatoren: Lernende sprechen mehr als Lehrperson. Kooperative Sozialformen ermöglichen angemessene Beteiligung. SuS verdeutlichen ihren Verständnisprozess in schriftlichen Aufgaben.	(+) bemühen sich auch miteinander Englisch zu sprechen
S11: In der Gruppenarbeit konnte ich mich angemessen mündlich beteiligen.	Ø 1,3
S12: Die schriftlichen Aufgaben haben mir geholfen, die Inhalte besser zu verstehen.	Ø 1,6
3.2 wird Bezug auf Vorwissen und Vorerfahrungen der Lernenden genommen.	
B-Indikatoren: SuS werden aufgefordert, neu Gelerntes mit bekannten Lerninhalten zu verbinden.	(+) exotherm, endotherm
S13: Ich konnte mein Vorwissen aus dem Chemieunterricht mit dem neu Gelernten verbinden.	Ø 1,2
6.2 können Lernende in Gruppenarbeitsphasen <i>code-switching</i> anwenden.	
B-Indikatoren: Die Kommunikation zwischen den Lernenden in den Gruppenphasen erfolgt auf Deutsch und auf Englisch, je nach Verständigungsbedarf.	(+) hauptsächlich Englisch
S14: In der Gruppe haben wir auf Deutsch und auf Englisch geredet, je nach Bedarf.	Ø 1,2

Freitext Betreuende Beobachterin <ul style="list-style-type: none"> • sehr langsames Arbeitstempo • verwenden Online-Wörterbuch • erfragen Erklärungen auf Englisch bei Betreuungsperson Lernende <ul style="list-style-type: none"> • -

Die Aspekte zur beobachteten **Station 3** sind in Tabelle 69 dargestellt. In Station 3 konnten die Änderungen im Lernbegleiter erfolgreich genutzt werden (vgl. B-Item Freitext). Die Versuchsbeobachtungen wurden mit Hilfe einer neu integrierten Fotofunktion von den Lernenden dokumentiert (siehe Anhang: 6 digitale E-Books). Im Gegensatz zur Gruppe in Station 1 waren die Teilnehmenden sehr unruhig und hatten wenig Interesse an der Laborarbeit und dem Experimentieren (vgl. B-Items 1.1, Freitext). Sie verbrachten, nach Erlaubnis der begleitenden Lehrperson, einen großen Teil ihrer Lernzeit im Seminarraum, wo sie die Ihnen gestellten Aufgaben nur sehr oberflächlich und wenig zeiteffizient bearbeiteten (vgl. B-Items 2.2, Freitext, S-Item 12, 9). Dieses Verhalten steht entgegen der vorher getätigten Angaben der Lernenden zur Einstellung gegenüber dem Chemie- und Englischunterricht im Prä-Fragebogen. Die Schülerinnen und Schüler gaben mehrheitlich an beide Fächer zu mögen. Die fehlende Arbeitsmotivation könnte natürlich auch den gesonderten Rahmenbedingungen eines außerschulischen Lernorts geschuldet sein, der sich vom Regelunterricht z.B. auch durch vermehrtes selbstständiges Arbeiten und fehlende Leistungsbewertung unterscheidet.

Die Vorkenntnisse zur Photosynthese waren bei den Lernenden vorhanden, sie konnten aber nicht vollständig auf die neu erlernten Inhalte angewendet werden (vgl. B-Item 3.2, S-Item 13), weshalb die Kommunikation auch oft ins Deutsche wechselte (vgl. B-Item 6.2, S-Item 14).

Tabelle 69. Kohorte 28.05.2025- Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen für Station 3

Items für Station 3: Carbon Utilisation Lehrperson (B) Schülerinnen und Schüler (S) n = 6	Antworten (+) beobachtet Ø Mittelwert der Angaben (1) ich stimme zu – (4) ich stimme nicht zu
Teil 2: Analyse des bilingualen Lernangebots während der Erprobung In der CLIL-Lernumgebung ...	
1.1 wird ein Lernsetting realisiert, das inhaltlich und sprachlich dem Niveau der Lernenden entspricht.	
B-Indikatoren: SuS können erfolgreich Aufgabenstellungen folgen und Aufgaben vollständig bearbeiten. Die verwendete Sprache ist nicht zu schwer.	(+) Gruppe sehr unruhig
S9: Ich konnte den Aufgabenstellungen folgen und diese vollständig bearbeiten.	Ø 2,2
S10: Die verwendete Sprache war <i>nicht</i> zu schwer.	Ø 1,6
2.2 haben die SuS viele Möglichkeiten zu sprechen und zu schreiben.	
B-Indikatoren: Lernende sprechen mehr als Lehrperson. Kooperative Sozialformen ermöglichen angemessene Beteiligung. SuS verdeutlichen ihren Verständnisprozess in schriftlichen Aufgaben.	(+) viel Zeit im Seminarraum, wenig im Labor
S11: In der Gruppenarbeit konnte ich mich angemessen mündlich beteiligen.	Ø 1,5

Items für Station 3: Carbon Utilisation Lehrperson (B) Schülerinnen und Schüler (S) n = 6	Antworten (+) beobachtet Ø Mittelwert der Angaben (1) ich stimme zu – (4) ich stimme nicht zu
S12: Die schriftlichen Aufgaben haben mir geholfen, die Inhalte besser zu verstehen.	Ø 2,8
3.2 wird Bezug auf Vorwissen und Vorerfahrungen der Lernenden genommen.	
B-Indikatoren: SuS werden aufgefordert, neu Gelerntes mit bekannten Lerninhalten zu verbinden.	(+) haben Vorkenntnisse zur Photosynthese, aber nicht fehlerfrei
S13: Ich konnte mein Vorwissen aus dem Chemieunterricht mit dem neu Gelernten verbinden.	Ø 2,0
6.2 können Lernende in Gruppenarbeitsphasen <i>code-switching</i> anwenden.	
B-Indikatoren: Die Kommunikation zwischen den Lernenden in den Gruppenphasen erfolgt auf Deutsch und auf Englisch, je nach Verständigungsbedarf.	(+) wenn sie eigenständig arbeiten, sprechen die Lernenden Deutsch
S14: In der Gruppe haben wir auf Deutsch und auf Englisch geredet, je nach Bedarf.	Ø 1,3
Freitext Beobachtende Lehrperson <ul style="list-style-type: none"> • sehr sprunghaft, tw. fehlende Selbstorganisation • nach Erlaubnis der begleitenden Lehrperson: Raumwechsel in Seminarraum, ein S verschwindet, um sich einen Snack zu organisieren; verpassen Zeit zur Versuchsbeobachtung • wenig Interesse an (Labor)arbeit, wenig Nachfragen • andere Aufgaben werden tw. oberflächlich bearbeitet • langsamer im Vergleich zu den anderen Gruppen (Expert Card ist am Ende der Laborphase nur von zwei SuS ausgefüllt) • Änderungen im E-Book: Versuchsdurchführung und Fotofunktion erfolgreich Lernende <ul style="list-style-type: none"> • - 	

Feedback zum Vorbereitungsmodul

Befragt nach der Nutzung des Vorbereitungsmoduls gab nur eine der drei Kohorten an, das Modul zur Vorbereitung auf den Labortag genutzt zu haben. In der Lernendengruppe mit bilingualer Vorerfahrung vom 28.05.2025, bearbeiteten nur 12 der insgesamt 18 Schülerinnen und Schüler das Modul²⁰⁵. Daran anschließend wurden sie im Post-Fragebogen befragt (vgl. Anhang 6: LimeSurvey-Post-Fragebogen EF Kohorten), ob sie die Materialien zur inhaltlichen und sprachlichen Vorbereitung hilfreich fanden. Im Freitext gaben die Lernenden sehr positive Rückmeldungen: „Fand die Aufgaben gut!“, „Von der Sprache her hat es einen gut vorbereitet“ und „Die Materialien waren gut zur Wiederholung der Inhalte, die wir im Unterricht aufgegriffen haben. Zudem haben die Arbeitsblätter zur Sprache geholfen, wichtige Begriffe sowohl auf Deutsch als auch auf Englisch zu lernen“. Diese Rückmeldungen und das gute Abschneiden der Kohorte in Wissens- und C-Test deuten auf die Sinnhaftigkeit der Vorbereitung des Laborbesuchs durch das entwickelte Vorbereitungsmodul hin.

²⁰⁵ Dies liegt darin begründet, dass sich die Kohorte aus zwei verschiedenen EF-Kursen zusammensetzte und nur einer der beiden Kurse das Vorbereitungsmodul bearbeitet hatte.

Bilanz zum Laborangebot

In den Post-Fragebögen der Lernenden wurden die EF-Schülerinnen und Schüler zu ihrer Einschätzung bezüglich des Gesamtangebots befragt. Die Rückmeldungen der verschiedenen Kohorten sind in Abbildung 183 dargestellt. Die verschiedenen Lerngruppen sind mit unterschiedlichen Farben dargestellt. Die Rückmeldungen sind in Prozent angegeben. Die Mehrheit der Lernenden stimmt zu oder stimmt überwiegend zu, dass der Kurs für sie interessant war.

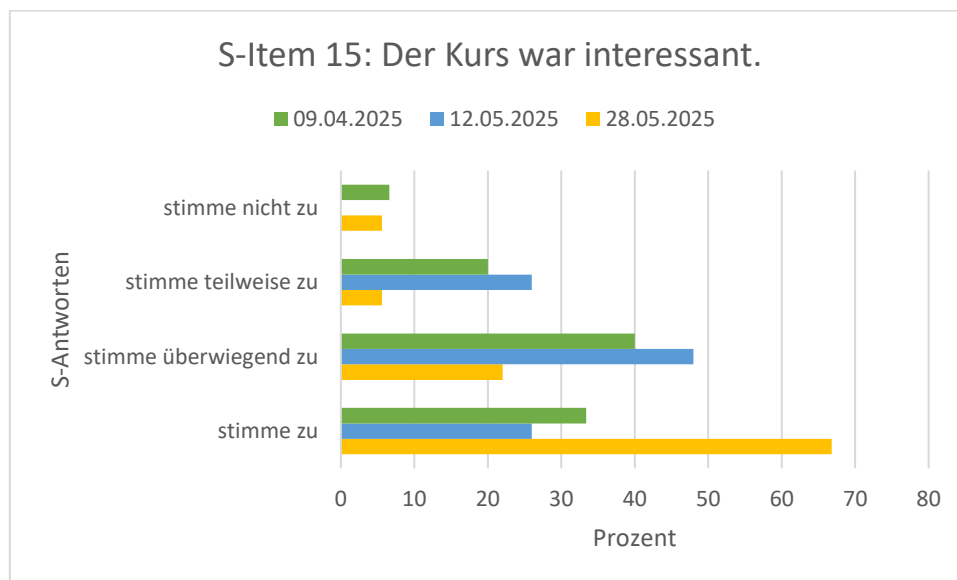


Abbildung 183. Ergebnisse S-Item 15 beantwortet von allen EF-Kohorten

Befragt danach, ob sie durch den Kurs viel gelernt haben, gaben die Lernenden je nach Kohorte unterschiedliche Einschätzungen (vgl. Abbildungen 184). Dabei ist interessant festzustellen, dass je schwächer die Kohorte in Wissenstest und C-Test abgeschnitten hat, desto schlechter schätzt sie ihren Lernerfolg ein. So stimmt die Mehrheit der Gesamtschullernenden der Aussage nur teilweise zu, während die Mehrheit der Gymnasialkohorte vom 28.05.25 zustimmt bzw. überwiegend zustimmt.

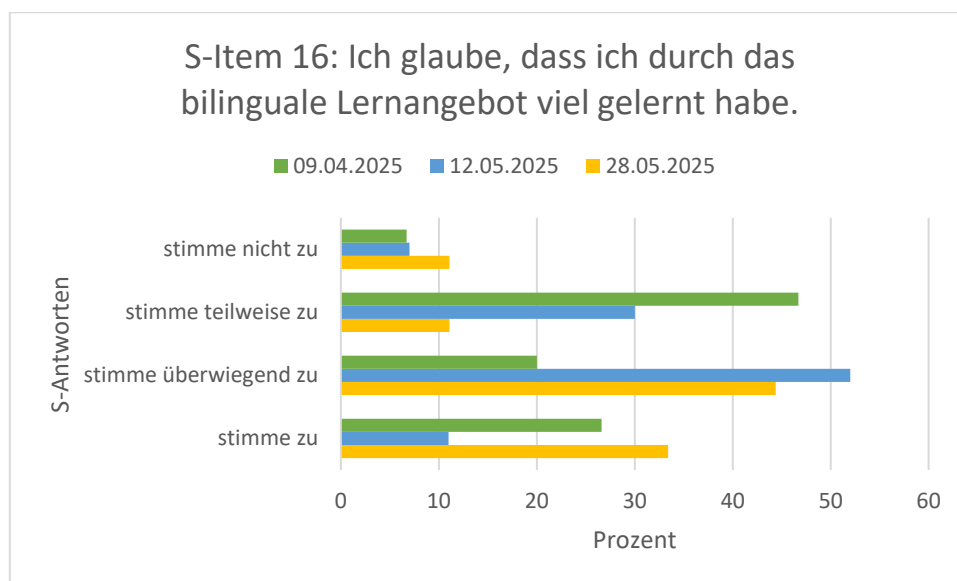


Abbildung 184. Ergebnisse S-Item 16 beantwortet von allen EF-Kohorten

Am Ende des Fragebogens wurden die Teilnehmenden gebeten freiwillig, persönliche Anmerkungen zum Kurs zu geben. Die größtenteils positiven Rückmeldungen sind in Tabelle 70 zusammengestellt.

Tabelle 70. Freitextantworten zum Laborangebot „What to do with CO₂?“

	09.04.25	12.05.2025	28.05.2025
Teilnehmende	n = 15	n = 27	n = 18
Schulform	Gesamtschule	Gymnasium	Gymnasium
Freitext (Rückmeldungen der Lernenden im unveränderten Wortlaut)	<ul style="list-style-type: none"> • Super • Nette Studenten die geholfen haben 	<ul style="list-style-type: none"> • Hat Spaß gemacht und war eine gute Abwechslung • Wenn ich etwas nicht verstanden habe, dann eigentlich nur wegen meinem persönlichen Mangel an naturwissenschaftlichem Vorwissen oder Verständnis. • Danke für das Angebot vlt. habt ihr mich überredet doch zu studieren 	<ul style="list-style-type: none"> • Danke für die tolle Möglichkeit. • Ich finde, wenn wir mehr Zeit hätten, dann hätte noch mehr gelernt, weil wir mussten am Ende die Experimente schnell machen. Sonst fand ich das gut strukturiert, zeitlich habe wir auch alles geschafft und die Sprache war verständlich. Hat Spaß gemacht:) • Ich fand es schön, dass man verschiedene Wege erkennen könnte, um CO₂-Emissionen zu lagern oder schaffen. • Es war interessant aber diese chemischen Wörter auf Englisch waren schon kompliziert zu verstehen oder von deutschen ins englische zu übersetzen. • Bitte nächstes Mal kein Englisch :)

In Gänze betrachtet verliefen die Erprobungen mit den drei EF-Kohorten sehr erfolgreich. Die Materialien waren verständlich und die Lernenden konnten mit dem digitalen E-Book und den Experimenten gut umgehen. Die abschließende Präsentation der Lernprodukte und die gemeinsame Plenumsdiskussion war in allen Gruppen produktiv und sinnstiftend. Diese erfolgreiche Durchführung ist entscheidend, weil das Angebot primär für diese Klassenstufe entwickelt wurde (vgl. 4.3.2) und somit für die Altersgruppe geeignet zu sein scheint.

In den Interventionen hat sich jedoch deutlich gezeigt, wie unterschiedlich die Lernenden in Abhängigkeit von ihren Schulformen, ihren bilingualen Vorerfahrungen und ihren fachlichen Vorkenntnissen in der Lernumgebung zurechtkamen. Die größtenteils positiven Rückmeldungen der Lernenden und Beobachtenden weisen darauf hin, dass die bereitgestellten Arbeitsmaterialien durch ihre initiierten Sprachwechsel und vielseitigen Differenzierungsmaßnahmen einen gewissen Teil der Heterogenität der Kohorten ausgleichen konnten. Nichtsdestotrotz bleibt es eine herausfordernde Aufgabe ein Lernsetting zu entwickeln, welches so vielen unterschiedlichen Lerngruppen gerecht werden kann.

5.4.4 Ergebnisse

Für die Erprobungen des dritten Iterationszyklus werden folgende Forschungsfragen (FF) für die entwickelte Schülerlaboreinheit „What to do with CO₂?“ formuliert:

Forschungsmethode teilnehmende Beobachtung: Bewertung des Arbeitsmaterials und der Lernumgebung mittels CLIL-Beobachtungsbogen (Lehrkräfte)

(FF7) Erfüllt das entwickelte Arbeitsmaterial laut dem adaptierten Beobachtungsbogen die pädagogischen Ziele einer bilingualen Schülerlaboreinheit?

Innerhalb des adaptierten Beobachtungsbogens werden verschiedene Kriterien und Indikatoren für CLIL-Lernsettings angesprochen. Beobachtende (n= 2) mit bilingualer Lehrerfahrung hatten die Aufgabe, mit Hilfe des ersten Teils des Beobachtungsbogens das entwickelte Arbeitsmaterial der Lernumgebung zu analysieren. Die Mehrheit der Indikatoren für gute CLIL-Materialien wurde von beiden Personen als beobachtet (+) auf dem Bogen vermerkt. Einschränkungen fanden sich bei dem Item 1.2²⁰⁶, bei dem abgefragt wurde, ob die Aufgabenstellungen inhaltlich und sprachlich dem Niveau der Lernenden entsprechen. Dies ist in einem Schülerlaborsetting mit sehr heterogenen Kohorten schwierig zu realisieren, da die Lerngruppe und deren Fähigkeiten vor dem Besuch des außerschulischen Lernorts nicht bekannt ist. Bei den Möglichkeiten zur individuellen Förderung wurden bei Item 5.1²⁰⁷ Einschränkungen notiert. Die eigene Auswahl von Aufgabenstellungen und Aktivitäten durch Lernende passend zum eigenen Lernniveau ist in einem Schülerlabor nicht leicht umsetzbar. Dennoch wurden die Materialien so gestaltet, dass einfachere Aufgaben zu Beginn aufgeführt werden und eine Vielzahl an möglichen Aufgabentypen zur Verfügung steht, die verschiedene Lernende ansprechen. Auf Grund der Kürze der Intervention müssen jedoch alle Aufgaben bearbeitet werden, um einen umfassenden Einblick in die Thematik zu erhalten. Die Schülerinnen und Schüler können sich jedoch die Reihenfolge der Bearbeitung selbstständig aussuchen. Darüber hinaus sind verschiedene Formen der Binnendifferenzierung integriert (z.B. Sprinteraufgaben, Hilfekarten, Annotationen, optionale Stationen), um der Heterogenität der Kohorten gerecht zu werden.

Auf Grund der geringen Zahl an Beobachtenden (n = 2) sind die Ergebnisse nur begrenzt nutzbar (siehe dazu auch 6.2 und 6.3). Es konnte jedoch festgestellt werden, dass sich der adaptierte Beobachtungsbogen gut als Planungstool für entsprechende Settings und Arbeitsmaterialien eignet. Trotz der genannten Einschränkungen kann geschlussfolgert werden, dass die zuvor durch den Beobachtungsbogen definierten pädagogischen Ziele mit entsprechenden Indikatoren in der Lernumgebung „What to do with CO₂“ erreicht werden können und diese laut den Beobachtungen der Lehrkräfte erfüllen.

²⁰⁶ **Item 1.2:** Das CLIL-Material integriert Aufgabenstellungen, die inhaltlich und sprachlich dem Niveau der Lernenden entsprechen. (*Indikator 1.2:* Die Aufgabenstellungen sind klar und präzise formuliert. Die Lernenden sollten in der Lage sein den Aufgabenstellungen erfolgreich zu folgen und Aufgaben vollständig bearbeiten. Die verwendete Sprache ist nicht zu schwer.).

²⁰⁷ **Item 5.1:** Das CLIL-Material nutzt eine Varietät von Lernaktivitäten, die es den SuS ermöglicht, für sich selbst Aufgaben auszuwählen, die für ihr Lernniveau adäquat sind. (*Indikator 5.1:* Lernende können sich Aktivitäten aussuchen. Einfachere Aufgabenstellungen sind zu Beginn aufgeführt. Es gibt eine Vielzahl an Aufgaben, die verschiedene Lerntypen ansprechen.

(FF8) Erfüllt die gestaltete Lernumgebung laut dem Beobachtungsbogen die pädagogischen Ziele einer bilingualen Schülerlaboreinheit?

Diese Fragestellung bezieht sich auf den zweiten Teil des Beobachtungsbogens, den die Beobachtenden (n= 7) während des Interventionszeitraums im Rahmen einer teilnehmenden Beobachtung an verschiedenen Stationen genutzt haben. Schwerpunkt war die Analyse der Lernumgebung zu primär sprachfokussierten Aspekten (vgl. Anhang 6: Erhebungsinstrumente, CLIL-Beobachtungsbogen, Teil 2). Die Beobachtungen wurden von externen Beobachtenden und der Lehrperson des Kurses durchgeführt.

Sowohl die externen Beobachtenden als auch die unterrichtende Lehrkraft vermerkten unabhängig von der beobachteten Station alle angeführten Indikatoren als in der Lernumgebung beobachtbar (+).

In einigen Kohorten wurden die Items 4.2²⁰⁸ und 5.2²⁰⁹, die sich mit Lehrkräftesprache und Feedback in Gruppenphasen beschäftigen nicht beobachtet. In der Studierendenkohorte konnte der Einsatz einer vereinfachten Sprache durch die betreuenden Personen nicht beobachtet werden. Dies ist mit dem Alter und dem Vorwissen der Teilnehmenden in der Kohorte erklärbar. Dagegen konnte in den EF-Kohorten das Item 5.2, welches auf die Bestärkung von inhaltlichen Äußerungen der Lernenden vor deren grammatikalischer Richtigkeit (message before accuracy) abzielte, nicht beobachtet werden. Um dies zu realisieren wurde in dem Lernangebot eine klare Phasierung vorgenommen und in den entsprechenden Unterrichtsphasen eine dominante Sprache etabliert (vgl. 4.3.3). Durch gezielte Sprachwechsel innerhalb des Kursangebots (vgl. 4.3.2 und 4.5.2 Kriterium 11) werden die Lernenden bestärkt überwiegend in der für die Phase intendierten Sprache zu sprechen und das code-switching so gering wie möglich zu halten. Auf Grund der Kürze der Intervention, ist die primäre Intention eine Bestärkung der Lernenden sich in der passenden Sprache auszudrücken und weniger eine Fokussierung auf grammatikalischer Richtigkeit.

Auf Grund der Heterogenität der Kohorten ist es erwartbar, dass nicht alle Indikatoren in einer Intervention beobachtet werden können. Dennoch konnten bei allen teilnehmenden Beobachtungen die Mehrheit der definierten pädagogischen Ziele (z.B. Item 1: Integration von Inhalts- und Sprachenlernen oder Item 5: Gestaltung von verständlichem Input) durch die passenden Indikatoren identifiziert werden. Folglich können durch die entwickelte Lernumgebung, die durch den Beobachtungsbogen definierten, pädagogischen Ziele z.B. durch den Bezug auf das Vorwissen der Lernenden (vgl. Item 3.2) oder die Durchführung einer klar strukturierten Sequenz (vgl. Item 1.2) erreicht werden.

Auf Grund der geringen Zahl an Beobachtenden (n = 7) sind die Ergebnisse nur begrenzt nutzbar (siehe dazu auch 6.2 und 6.3). Es konnte jedoch festgestellt werden, dass sich der zweite Teil des adaptierten Beobachtungsbogens für teilnehmende Beobachtungen bei Erprobungen von entsprechenden Lernsettings eignet und weiter genutzt werden kann.

²⁰⁸ **Item 4.2:** In der CLIL-Lernumgebung spricht die Lehrperson langsamer und vereinfacht Sprache, wenn dies notwendig ist. (*Indikator 4.2:* Impulse und Botschaften der Lehrkräfte werden auf verschiedene Weise wiederholt, ohne lauter zu werden.).

²⁰⁹ **Item 5.2:** In der CLIL-Lernumgebung wird beim Feedback verstärkt der Inhalt der Redebeiträge adressiert. (*Indikator 5.2:* Lernende bekommen mündliche Bestärkung zu inhaltlichen Äußerungen und weniger zur Grammatik oder der Art und Weise wie sie formuliert sind, z.B. I like that idea. How might you say that more precisely?).

Forschungsmethode: Wissenstest

(FF9) Findet bei den Lernenden ein Fachwissenszuwachs durch die Intervention statt?

In allen Kohorten der dritten Iterationsschleife lässt sich eine Steigerung der richtigen Antworten vom Prä- zum Posttest beobachten. Bei den meisten Gruppen gehen auch die Anteile der Antwortoptionen „Ich weiß es nicht“ im Post-Test deutlich zurück. Auf Grund des Antwortverhaltens kann festgehalten werden, dass alle Gruppen einen fachlichen Wissenszuwachs erfahren haben. Dieser fällt jedoch je nach Vorwissen und Vorbereitung der Kohorte unterschiedlich deutlich aus.

Die Studierenden (vgl. 5.4.1 Abbildung 166) erreichten vom Prä- zum Post-Test eine Steigerung der richtigen Antworten um 20%, die Q2-Kohorte (vgl. 5.4.2 Abbildung 172) sogar von 29%. Diese guten Ergebnisse sind erwartbar, weil sie sich auf Grund des Alters und der höheren Qualifikationsstufe auf eine höher Kompetenz bzw. Vorwissen der Lerngruppe zurückführen lassen.

In den EF-Kohorten (vgl. 5.4.3 Abbildung 178) schnitt die Gesamtschulkohorte mit einer Steigerung um 5% am schlechtesten ab. Die Gymnasialkohorte mit der größten bilingualen Vorerfahrung erreichte eine Steigerung der richtigen Antworten um 16%. Am besten schnitt die gymnasiale Gruppe vom 12.05.25 mit einer Steigerung um 20% vom Prä- zum Post-Test ab. Folglich kann durch die Intervention ein kurzzeitiger Fachwissenszuwachs festgestellt werden. Die Ergebnisse spiegeln die allgemeinen Beobachtungen innerhalb des deutschen Bildungssystems wider, bei denen die Leistungen der Lernenden stark von der Schulform abhängig sind.

Forschungsmethode: C-Test

(FF10) Führt die Intervention zu einer Steigerung der englischen Fachsprachkompetenz bei den Lernenden?

In den durchgeführten Erhebungen des dritten Iterationszyklus ist in allen Kohorten eine Steigerung der (R/F)- und (WE)-Werte vom Prä- zum Posttest feststellbar. Die Lernenden schneiden sowohl im Prä- als auch im Post-Test in den deutschen Texten besser ab als in den englischen. Dies ist mit der deutschsprachigen Instruktion des vorausgegangenen Chemieunterrichts zu erklären.

Obwohl einige Lernende mündlich zurückmeldeten, dass ihnen die Beantwortung der englischen Lückentexte leichter fiel als die der deutschen, stimmen diese Einschätzungen nicht mit den generierten Ergebnissen überein. Dennoch konnten in beiden englischen Texten Verbesserungen der sprachlichen Kenntnisse nach der Intervention festgestellt werden. Da die Lernenden nur geringe, bis keine Vorkenntnisse mit bilinguaem Chemieunterricht hatten, kann dieser Effekt auf die vermittelten Inhalte in der Intervention zurückgeführt werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Relevanz des Themas

Die Prozesskette um Carbon Capture and Storage (CCS) hat in den letzten Jahren auf Grund der sichtbarwerdenden Veränderungen durch die Klimakrise und des rasanten Anstiegs der Kohlenstoffdioxid-Emissionen in der Atmosphäre an Bedeutung gewonnen und ist in den Fokus der öffentlichen Diskussion gerückt. Ihr wird zugeschrieben, durch den Einsatz technischer Möglichkeiten zur Reduzierung von CO₂-Emissionen beizutragen. Sollte CCS als ein technischer Teil von Klimaschutzmaßnahmen etabliert werden, müssen lock-In-Effekte und die damit einhergehende verlängerte Nutzung fossiler Energieträger verhindert werden [102, S.23]. Dies bedarf einer klaren Carbon Management Strategie mit politischen Rahmenbedingungen und klaren Definitionen von schwer vermeidbaren Emissionen.

Im aktuellen Koalitionsvertrag der neuen Bundesregierung aus CDU, CSU und SPD wird CCS als Möglichkeit beschrieben, die Wirtschaft in Deutschland zu stärken. Durch ein Gesetzespaket soll der Einsatz bei schwer vermeidbaren Emissionen des Industriesektors (z.B. Stahl und Zement) und für Gaskraftwerke ermöglicht werden [305, S.9]. Neben der bereits eingeführten offshore-Speicherung soll nun auch die geologische Speicherung auf dem Festland in geologisch geeigneten Gebieten realisiert werden. Darüber hinaus wird *Direct Air Capture* im Koalitionsvertrag als Technologie der Zukunft angesehen, um die Menge an Negativemissionen zu steigern [305, S.28].

Um eine erfolgreiche Integration von CCS im Sinne von BNE im Chemieunterricht zu ermöglichen, müssen mehrdimensionale Faktoren, sowie Vor- und Nachteile und offene Unklarheiten abgewogen werden. Bisher gibt es auf viele Fragen noch keine zufriedenstellenden Antworten und weitere Forschungsbestrebungen sind essentiell, um das Potential der Technologie, deren Wirtschaftlichkeit und deren Auswirkungen auf die Umwelt umfassend einschätzen zu können.

Das Umweltbundesamt schlägt die Integration von CCS insbesondere in Bereichen vor, in denen Restemissionen langfristig nicht vermeidbar sind, wie z.B. in der Zementherstellung [102, S.17]. Potential wird in Industriezweigen gesehen, in denen man keine fossilen Energieträger nutzt, wie z.B. in der thermischen Abfallbehandlung [102, S.24]. Das unter dem Namen WACCS (Waste Carbon Capture and Storage) bekannte Verfahren ermöglicht die Abscheidung von Kohlenstoffdioxid-Emissionen bei der Müllverbrennung. Laut Angaben des Umweltbundesamtes könnte die Technologie, sofern zeitnah eingesetzt, zu Negativemissionen führen und bietet daher ein hohes Potential als technische Senkenstrategie [102, S.17].

Die Reduktion der Treibhausgas-Emissionen und der Ausbau von erneuerbaren Energien sowie der Ausbau der Kapazitäten der natürlichen Senken sollten weiterhin oberste Zielsetzung bleiben. Aus wissenschaftlicher Perspektive ist das Potential von technischen Senken wie CCS begrenzt und sollte nur für unvermeidbare Emissionen eingesetzt werden [102, S.17]. Im Sinne der Generationengerechtigkeit sollte mit Bedacht abgewogen werden, welche Emissionen technisch gespeichert werden müssen, um zukünftige Handlungsspielräume und Bedarfe nicht einzuschränken [102, S.8]. Darüber hinaus bedarf es bei all den Überlegungen zur Integration der Technologieoptionen gesellschaftliche und wirtschaftliche Akzeptanz, um diese überhaupt umsetzen zu können.

Aus den vorangestellten Schilderungen kann entnommen werden, dass es sich bei CCS um eine kontrovers diskutierbare, innovative und zukunftsrelevante Thematik handelt. Sie eignet sich ideal um mit den Lernenden eine mehrdimensionale, fächerübergreifende und mehrperspektivische Betrachtung im Sinne von BNE anzubahnen.

Obwohl die Thematik CCS in bildungspolitischen Vorgaben für das Fach Chemie wenig explizite Erwähnung findet, lassen sich jedoch in den meisten Bundesländern Anknüpfungspunkte finden (vgl. 4.1). Für das Bundesland Nordrhein-Westfalen könnte die Thematik im Inhaltsfeld „Reaktionsgeschwindigkeit und chemisches Gleichgewicht“ der Einführungsphase (Klassenstufe 11) [197] verortet werden. Da sich jedoch keine explizite Erwähnung oder Umschreibung im Kernlehrplan findet, eignet es sich, CCS als Exkurs innerhalb des Regelunterrichts oder als Inhalt eines außerschulischen Lernangebots. Letzteres wird in der BNE Leitlinie NRW explizit als authentisch und sinnstiftend aufgeführt [186, S.36].

6.2 Zentrale Ergebnisse der Arbeit

Innerhalb dieser Dissertation wurde das innovative Thema Carbon Capture and Storage (CCS) gemäß den Grundsätzen der curricularen Innovationsforschung für den Einsatz in einem bilingualen Schülerlaborangebot didaktisch aufbereitet. Dabei wurden für die Lernenden Arbeitsmaterialien entwickelt, die die bilinguale Diskurskompetenz in beiden Sprachen (Deutsch und Englisch) durch den Einsatz gezielter Sprachwechsel fördern und mit Hilfe von mehrdimensionalen Betrachtungsweisen einen Beitrag zur Bildung für nachhaltige Entwicklung leisten. Die Erprobung, Evaluation und Optimierung der Laboreinheit und der Materialien wurde in Anlehnung an die partizipative fachdidaktischen Aktionsforschung in drei Iterationszyklen durchgeführt.

Die Intention des entwickelten Schülerlaborangebot ist es, einen Impuls für weitere Forschungsbestrebungen in diesem Bereich zu initiieren und eine chemiedidaktische Unterstützung der bilingual unterrichtenden Lehrkräfte und den Lernenden durch die Etablierung eines außerschulischen, bilingualen Lernangebots zu realisieren.

Zur Umsetzung eines bilingualen Lernangebots zu CCS, welches die Fachinhalte adäquat repräsentiert, müssen die Lernenden zahlreiche **Vorkenntnisse** mitbringen (vgl. 4.2). Neben Grundkenntnissen zu Kohlenstoffdioxid, sollten sie über Vorwissen zu Stoffkreisläufen, der Photosynthese, sowie dem natürlichen und anthropogenen Treibhauseffekt verfügen. Die fremdsprachlichen Kenntnisse der Lernenden im Fach Englisch sollten mindestens dem Niveau B1-B2 entsprechen. Die für den bilingualen Chemieunterricht nötigen grammatikalischen Strukturen und Texterschließungsstrategien sollten den Schülerinnen und Schülern bekannt sein. Da die meisten Lernenden keine Erfahrungen mit bilingualem Chemieunterricht haben, ist davon auszugehen, dass sie über einen sehr gering ausgeprägten Fachwortschatz in der Fremdsprache verfügen. Die Integration von Verstehenshilfen und Scaffoldingmaßnahmen ist daher zentraler Baustein der konzipierten Arbeitsmaterialien, um etwaige sprachlich auftretende Hürden zu überwinden (vgl. 4.5.2 Kriterium 3).

Im gemeinsamen Austausch werden niederschwelligere, mündliche Kommunikationsstrategien wie das *code-switching*, *message before accuracy* und der Einsatz von language tutors bei der Umsetzung des Kursangebots eingebracht. Da eine vollständige Antizipation aller Lerngruppen und deren individueller Bedarfe schwer umsetzbar ist, es aber sinnvoll ist, eine gewisse inhaltliche Vorentlastung vorzunehmen, wurde ein **Vorbereitungsmodul** mit leicht angebahnten Sprachwechseln konzipiert (vgl. 4.2.3). Dieses verfolgt die Zielsetzung, an das Vorwissen der Lernenden anzuknüpfen und Inhalte zu wiederholen. Der Laborbesuch kann auf diese Weise mit Hilfe des Vorbereitungsmoduls inhaltlich und sprachlich vorentlastet werden, weil die konzipierten Aufgabenstellungen an Vorkenntnisse der Lernenden anknüpfen und thematisch zum Lernangebot hinführen. Da die Materialien den begleiteten Lehrkräften vor dem Besuch als optionales Angebot zur Verfügung gestellt werden, können diese die Notwendigkeit und den Umfang des Einsatzes abwägen und an die individuellen Lernvoraussetzungen ihrer Gruppe anpassen.

Das **Schülerlaborangebot** wurde als kompetenzorientiertes Unterrichtsvorhaben mit Hilfe des 4C-Frameworks [109] konzipiert. Es werden sowohl Kompetenzen des Sachfachs Chemie als auch die bilinguale Diskurskompetenz geschult (vgl. 4.3.1). Auf Grund des vorgegebenen Formats und Zeitrahmens des Schülerlaborangebots und der intendierten Zielgruppe, mussten in Bezug auf die Vermittlung der Fachthematik Schwerpunkte gesetzt werden. Um die Komplexität der involvierten Prozesse wie *Post-Combustion Capture* oder *DAC* zu reduzieren, wurden didaktische Reduktionsmaßnahmen vorgenommen (vgl. 4.3.2 Tabelle 22). Im Besonderen wurde ein inhaltlicher Fokus auf spezielle Bereiche der Prozesskette gelegt, um sie für die Lernenden in dem kurzen Interventionszeitraum verständlich zu machen. Weitere didaktische Anpassungen wurden auf Grund der Verfügbarkeit von passenden Experimenten und deren Durchführbarkeit im intendierten Zeitrahmen vorgenommen. Um eine bilinguale Diskurskompetenz in beiden Sprachen anzubahnen, wurden die einzelnen Lernsequenzen sprachlich miteinander verwoben, indem gezielt Sprachwechsel eingesetzt werden (vgl. 4.3.2). Deutsch- und englischsprachige Anteile wechseln sich geplant und begründet ab (vgl. 4.5.2 Kriterium 11). Außerdem wird der Sprachwechsel durch die Etablierung einer authentischen Lernaufgabe im Kontext einer internationalen, wissenschaftlichen Konferenz legitimiert (vgl. 4.5.2. Kriterium 1).

Das entwickelte Lernangebot umfasst drei Pflichtstationen und vier optionale Stationen, die nach der Phasierung einer konstruktivistischen Lernschleife angelegt wurden, um die Fachsystematik, den Kontext und die beiden verwendeten Sprachen miteinander zu verbinden (vgl. 4.3.3). Es schließt thematisch an internationale und nationale Rahmenvorgaben an und versucht in allen Modulen dimensionsbezogene Schwerpunkte zu ökologischen, ökonomischen und politischen Aspekten zu etablieren. Die Lernenden sollen so besonders im Bereich der Bewertungskompetenz geschult werden, um später in der Lage zu sein, etwaige Handlungsoptionen formulieren zu können (vgl. 4.5.2. Kriterium 6). Dazu enthalten die Arbeitsmaterialien neben Fachinhalten auch zusätzliche Informationen zu den Technologieoptionen, die über Videos und Infotexte zur Verfügung gestellt werden.

Experimentell wurde auf Grund der Komplexität der Inhalte, auf besonders alltagsnahe, einfache Handversuche und **Modellexperimente** zurückgegriffen, um die Lernenden an die Thematik heranzuführen, sowie die grundlegenden Abläufe und chemischen Prozesse zu erläutern (vgl. 4.4.1- 4.4.2).

Als experimentelle Hilfestellungen wurden für die Lernenden inhaltlich gestufte Hilfskarten, vorstrukturierte Beobachtungstabellen, Auswertungsfragen und Infokarten mit Abbildungen als Unterstützung integriert. Als sprachliche Hilfestellungen wurden Beschriftungen des Versuchsaufbaus Annotationen, Formulierungshilfen, Word Banks und ein Lab Equipment Poster zur Verfügung gestellt (vgl. 4.5.2 Kriterium 3).

Die entwickelten **Materialien** wurden mit Hilfe wohlüberlegter Aufgaben, der passenden und authentischen Textauswahl, der Integration von gezieltem Scaffolding, sowie durch die Integration von Formen des kooperativen Lernens und funktionaler Sprachwechsel ausgearbeitet (vgl. 4.5.2). Mit Hilfe der Umsetzung der Arbeitsmaterialien in ein **digitales E-Book**-Format, konnten die Kriterien für die Materialgestaltung noch zielgerechter umgesetzt werden (vgl. 4.5.3). Durch den Einsatz des E-Books konnte die Förderung des selbstständigen Arbeitens der Lernenden im eigenen Tempo (vgl. 4.5.2 Kriterium 4), die Möglichkeit der Integration von Differenzierungsangeboten (vgl. 4.5.2 Kriterium 3) und die Gestaltung von individuellen Lernwegen für Schülerinnen und Schüler (vgl. 4.5.2 Kriterium 5) ohne Medienbruch realisiert werden. Das E-Book begleitet die Lernenden bei ihrem Lernprozess, unterstützt sie als Werkzeug beim Experimentieren und ermöglicht eine Anreicherung der Lerninhalte durch verschiedene Medienangebote und interaktive Aufgabenformate. Das E-Book-Format gestattet die Integration von Audio- und Videodateien, einem Glossar und Aufgaben zur Selbstkorrektur in einem einzigen Lerngegenstand.

Die Experimente und Materialien wurden über vier Jahre hinweg in **drei Iterationszyklen** in Anlehnung an Aktionsforschungsansätze mit Lernenden, Studierenden und Lehrkräften erprobt (vgl. 5.2-5.4). Die Rückmeldungen der Beteiligten zu den Lernangeboten wurden in verschiedenen Lernumgebungen über einen Zeitraum von 2020-2025 erhoben und der iterativen Optimierung zugrunde gelegt. Insgesamt wurden innerhalb der drei Iterationszyklen Erhebungen mit 20 Lehrkräften, 12 Studierenden und 168 Lernenden durchgeführt (vgl. 5, Tabelle 36).

Neben der konzipierten Schülerlaboreinheit *What to do with CO₂?* (vgl. Anhang 6: Digitale E-Books), wurde auch eine deutschsprachige Unterrichtsreihe zur „*Klimawirksamkeit von Kohlenstoffdioxid*“ mit sieben Modulen und passenden Arbeitsmaterialien entwickelt. Darüber hinaus wurde ein digitales, deutschsprachiges E-Book für die Station „*Carbon Capture and Storage – Wohin mit den CO₂-Emissionen?*“ für das deutsche Schülerlaborangebot „*Wege aus der Klimakrise*“ gestaltet. Letztgenannte Materialien sind im Anhang 7 unter *weitere Materialien* zu finden. Eine Übersicht aller entwickelten Materialien kann Kapitel 4.5.2 Tabelle 31 entnommen werden. Die **deutschsprachigen Materialien** wurden ebenfalls mit Lehrkräften, Studierenden und Lernendengruppen innerhalb der drei Iterationszyklen erprobt (vgl. 5, Tabelle 36). Zusätzlich wurden zu drei Versuchen (vgl. 4.4.2.4-4.4.2.6) in Zusammenarbeit mit Dr. Nico Meuter deutsch- und englischsprachige **Versuchsvideos** erstellt (vgl. Anhang 7: Versuchsvideos).

Innerhalb des Dissertationsprojektes (2019-2025) wurden elf **Publikationen** verfasst (vgl. Publikationen)²¹⁰. In drei Fachvorträgen wurden verschiedene Bereiche des Projektes auf Fachtagungen vorgestellt. Es wurden sechs Posterbeiträge zu Fachtagungen verfasst, wovon eines mit dem Posterpreis der GDCh FG Chemieunterricht-Tagung 2021 prämiert wurde. Darüber hinaus wurden vier Lehrkräftefortbildungen und fünf Workshops konzipiert und durchgeführt.

6.3 Kritische Reflexion des Forschungsansatzes

Die verschiedenen Iterationszyklen wurden mit unterschiedlichen Forschungsinstrumenten durchgeführt. Diese Forschungsinstrumente, z.B. Fragebögen und Beobachtungsbögen, wurden in Anlehnung an Triangulationsansätze eingesetzt, um die Untersuchungen so gut wie möglich zu dokumentieren und eine „intersubjektive Nachvollziehbarkeit“ [23, S.48] zu gewährleisten. Die Forschungsinstrumente und Ergebnisse wurden im partizipativen Austausch erfahrener Lehrpersonen einer „kommunikativen Validierung“ [239, S.49] unterzogen. Dieses Vorgehen ermöglicht die Konzeption und Beforschung einer Lerneinheit, die auf die Bedürfnisse der schulischen Praxis und deren Lernender zugeschnitten ist [291, S.213]. Das entwickelte Laborangebot kann so einen Beitrag zur Zugänglichkeit von außerschulischen bilingual-chemischen Lernorten leisten. Die im Projekt entwickelten Forschungsinstrumente können zur Evaluation von weiteren bilingual-chemischen Lerneinheiten genutzt werden.

Diese Art des Forschungsvorhabens ist komplex in der Durchführung, da das Lernangebot sehr spezifisch und die zu beforschenden Interventionen sehr kurz sind. Die teilnehmenden Kohorten sind schwer vergleichbar und haben unterschiedlichste Bedarfe. Folglich kann nicht auf etablierte Forschungsinstrumente zurückgegriffen werden. Für die verschiedenen Zyklen und Lerngruppen musste die Mehrheit der Instrumente basierend auf validierten Forschungsinstrumenten eigenständig angepasst werden, um den Anforderungen gerecht zu werden. Da die beteiligten Gruppen in einem Prä-Post-Design untersucht wurden, lassen sich nur vorsichtige Schlussfolgerungen und Momentaufnahmen der gewonnen Erkenntnisse erheben. Eine Durchführung eines Follow-up-Tests, war auf Grund der organisatorischen Rahmenbedingungen und des Umfangs des Dissertationsprojekts nicht möglich.

Durch die arbeitsteilige Bearbeitung der Stationen, können die Rückmeldungen der Lernenden nur auf die bearbeitenden Stationen bezogen werden und variieren je nach Leistungsniveau, Vorerfahrungen und subjektiven Wahrnehmungen. Folglich können die Rückmeldungen der Lernenden nur als grobe Orientierung für die Weiterarbeit mit dem Lernangebot gesehen werden. Deshalb wurden diese Rückmeldungen durch eine teilnehmende Beobachtung ergänzt. Auf Grund von organisatorischen Rahmenbedingen wurden Beobachtende mit verschiedenen Expertisen (z.B. Studierende, Personen mit bilingualer Lehrerfahrung) eingesetzt. Obwohl meist nur eine Station beobachtet wurde, konnten große Unterschiede zwischen den Kohorten festgestellt werden. Dies ist grundsätzlich durch den externen Lernort Schülerlabor nicht anders realisierbar gewesen.

²¹⁰ Eine Übersicht der Publikationen, Posterbeiträge, Workshops und Vorträge, sowie die daran mitwirkenden Personen sind im Bereich Publikationen am Ende dieser Arbeit einzusehen.

Auch bei der teilnehmenden Beobachtung mit dem adaptierten CLIL-Bogen handelt es sich um subjektive Eindrücke der Personen, die diese nach ihrem besten Wissen einschätzen. Um dies in Relation zu den Lernendenrückmeldungen zu setzen, wurden gezielt inhaltliche Überschneidungen zwischen einigen Beobachtenden- und Lernenden-Items herbeigeführt, die so leichter in Beziehung gesetzt und ausgewertet werden können.

Während der Erhebungen agierte die forschende Person auch gleichzeitig als Lehrperson in den verschiedenen Lernszenarien. Dies war auf Grund der organisatorischen Rahmenbedingungen nicht anders möglich und stellte eine zusätzliche Herausforderung dar. Oft wurde die Lehrperson auch zur Selbstreflexion oder teilnehmenden Beobachtung eingesetzt, um die ablaufenden Prozesse im Schülerlabor durch eine weitere Perspektive zu ergänzen. Die unterrichtende Person verfügt über Lehrerfahrungen im bilingualen Chemieunterricht, bei deren Einschätzungen handelt es sich jedoch um subjektive Eindrücke, die entsprechend eingeordnet werden müssen.

Um die Rückmeldungen der Lernenden und Beobachtenden zu stützen, wurden ein Wissenstest und ein C-Test für die Lernumgebung konzipiert. Bei beiden Testformen musste der Umfang begrenzt werden, um eine Realisierbarkeit der Abfrage an einem Schülerlabortag zu ermöglichen. Der Wissenstest bietet einen Einblick in die erlernten Fachinhalte und zeigt etwaige Lücken im Vorwissen der Lernenden auf. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Test nur einen kleinen Teil der vermittelten Inhalte des Schülerlaborangebots abfragen kann. Der konstruierte C-Test sollte Einblicke in die allgemeine Sprachfähigkeit der Lernenden in der deutschen bzw. englischen Fachsprache ermöglichen. Aussagen zu Stärken und Schwächen bestimmter funktionaler kommunikativer Kompetenzen z.B. Sprechen, Hörverstehen, Leseverstehen sind durch dieses Testinstrument nicht möglich.

All diese Aspekte berücksichtigend ist folglich die Generierung von allgemeingültigen Aussagen aus den getätigten Erhebungen schwierig. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist schwer möglich, da in den Vorhaben keine Vergleichs- oder Kontrollgruppen eingesetzt werden konnten. Somit unterliegen die Daten einer gewissen Limitation. Die Datenauswahl, -auswertung und -interpretation ist in einem solchen Vorhaben komplex. In den Auswertungsprozessen findet ein kriteriengeleitetes Vorgehen durch die forschende Person statt, dessen teilweise subjektiver Charakter nicht gänzlich vermeidbar ist. Diese Vorgehensweise ist ein wesentlicher und etablierter Teil eines solchen Forschungsansatzes [23, S.50]. Die Datenauswertung sollte im Hinblick auf diese inhärente Subjektivität eingeordnet werden.

6.4 Ausblick und mögliche Weiterarbeit

Der in dieser Arbeit entwickelte Kurs „What to do with CO₂“ ist mittlerweile als festes Angebot im Schülerlabor Labothek der Didaktik der Bergischen Universität Wuppertal etabliert. Der Kurs wurde schon von zwei weiteren EF-Kohorten (n = 28) erfolgreich durchlaufen. Der Lernertrag ist auch bei der Durchführung mit anderen dozierenden Personen vergleichbar. Trotz der positiven Resonanz sollte das Lernangebot jedoch stetig evaluiert und weiterentwickelt werden.

Thematisch könnte die Laboreinheit noch durch Inhalte im Bereich *Carbon Utilisation* erweitert werden. Prozesse wie die Entcoffeinierung oder die Textilreinigung mit Kohlenstoffdioxid könnten in den Blick genommen werden. Auch die chemische Umwandlung in Harnstoff oder die Kraftstoffproduktion könnten thematisiert werden.

Experimentell bieten einige thematische Einheiten des Schülerlabors noch Potential zur Weiterentwicklung. Da die Wasserpest in den Erprobungen unbeständige Ergebnisse lieferte, könnten noch andere Wasserpflanzen wie z.B. *Vesicularia montagnei* (Weihnachtsmoos) oder Mikroalgen für die Station 3 erprobt werden. Mittlerweile sind außerdem Publikationen erschienen, die z.B. die Kohlenstoffabsorption mit Aminen als Schulversuch aufgearbeitet haben [306]. Darüber hinaus könnten auch Versuche mit Olivin als Möglichkeit zur Modellierung der Kohlenstoffdioxid Speicherung in Basaltgesteinen in Betracht gezogen werden [307]. Darüber hinaus gibt es auch die Option, das verwandte Verfahren der beschleunigten Verwitterung [engl. *enhanced rock weathering*²¹¹] in Schülerexperimenten zu zeigen [308]. Auch eine nachhaltigere Stahlproduktion durch den Einsatz von Methan oder Wasserstoff könnte durch Modellexperimente dargestellt [309] und als zusätzliche Station für die Schülerlaboreinheit „Wege aus der Klimakrise“ [271] konzipiert werden.

Damit die Inhalte leichter in den (bilingualen) Regelunterricht integriert werden können, haben sich einige Lehrkräfte in den Fortbildungen (vgl. 5.3.2) eine ausführliche Lehrkräftehandreichung mit didaktischen Kommentaren und Einordnungen zu den Materialien gewünscht. Diese Handreichung könnte noch gestaltet werden, um die Inhalte für den Regelunterricht einfacher zugänglich zu machen. Dies lag nicht im Rahmen des Fokus dieser Arbeit.

Das Potential für bilinguale Materialien wird auch im Hinblick auf die Integration von Geflüchteten aus Ländern mit anderer Muttersprache z.B. Ukraine, Syrien immer wichtiger. Lehrkräfte meldeten zurück, dass sie solche Arbeitsmaterialien auch für den Einsatz in Sprachförderklassen oder Integrationsklassen benötigen würden. Da es bisher keine bilingualen Lehrwerke für das Fach gibt, arbeitet die Didaktik der Chemie an weiteren Handreichungen für Lehrkräfte, um den Einstieg in den bilingualen Chemieunterricht zu erleichtern. Eine Publikation für den Anfangsunterricht ist bereits im November 2024 unter dem Titel *Bilingual Chemistry* erschienen [181].

Darüber hinaus kann die Verbreitung von bilinguaem Chemieunterricht nur vorangebracht werden, wenn ausreichend qualifizierte Lehrkräfte ausgebildet werden. Die Bergische Universität Wuppertal versucht mit dem Masterstudiengang Bilingualer Unterricht einen Beitrag dazu zu leisten.

²¹¹ **Enhanced rock weathering** wird als Emissionsreduktionsstrategie eingesetzt, indem z.B. Basaltstäube zur Abtrennung von Kohlenstoffdioxid-Emissionen eingesetzt werden. Es laufen ähnliche Prozesse wie im *mineral trapping* (vgl. 2.4.2) ab.

In diesem Zusammenhang könnten auch (digitale) Fortbildungsangebote für interessierte Lehrkräfte angeboten werden.

Ebenso wie die Implementation von bilinguaem Chemieunterricht, schreitet die Verbreitung von BNE in Deutschland zögerlich voran. In einem Monitoring Bericht zum Status und der Verbreitung von BNE im deutschen Schulsystem aus dem Jahr 2024 stellen die Autoren fest, dass die Integration von BNE meist als Zusatz in bildungspolitischen Vorgaben und Curricula erfolgt. Im Bereich der Lehrkräfteausbildung bestehen auf universitärer Ebene zu BNE viele Unklarheiten, weil die Inhalte und Schwerpunktsetzungen vieler Lehrveranstaltungen von den individuellen Dozierenden bestimmt werden [310, S.3917]. Die Bekanntheit und Verbreitung von BNE könnten in der ersten Phase der Lehrkräftebildung durch die Integration in Lehrveranstaltungen noch weiter gesteigert werden. In der Didaktik der Chemie der BUW werden BNE-spezifische Lerninhalte in fast allen didaktischen Lehrveranstaltungen thematisiert. In der dritten Phase der Lehrkräftebildung könnten gezielte BNE-Fortbildungsangebote helfen, die Aus- und Weiterbildung von Lehrkräften weiter zu stärken und ggf. Unsicherheiten bzw. Hemmungen abzubauen. Auch hier wurden im Rahmen der Dissertation Beiträge entwickelt. So bot die Didaktik der Chemie im deutschsprachigen In- und Ausland bereits mehrere Fortbildungen, Workshops und Beiträge zu Fachtagungen an (vgl. Publikationen). Die Aufgabe der Fachdidaktiken sollte es allgemein sein, Impulse in Form von entwickelten exemplarischen Unterrichtssequenzen und -materialien zu setzen und Möglichkeiten aufzuzeigen, wie das Bildungskonzept BNE im Fach, aber auch ganzheitlich implementiert werden kann.

Literatur

- [1] Zowada, C., Niebert, K., Eilks, I. (2019). Wenn nicht jetzt, wann dann? Nachhaltigkeit im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie* **30.**/4/19, 2–9, 172.
- [2] Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., Jotzo, F., Krug, T., Lasco, R., Lee, Y.-Y., Masson-Delmotte, V., Meinshausen, M., Mintenbeck, K., Mokssit, A., Otto, F. E., Pathak, M., Pirani, A., Poloczanska, E., Pörtner, H.-O., Revi, A., Roberts, D. C., Roy, J., Ruane, A. C., Skea, J., Shukla, P. R., Slade, R., Slangen, A., Sokona, Y., Sörensson, A. A., Tignor, M., van Vuuren, D., Wei, Y.-M., Winkler, H., Zhai, P., Zommers, Z., Hourcade, J.-C., Johnson, F. X., Pachauri, S., Simpson, N. P., Singh, C., Thomas, A., Totin, E., Arias, P., Bustamante, M., Elgizouli, I., Flato, G., Howden, M., Méndez-Vallejo, C., Pereira, J. J., Pichs-Madruga, R., Rose, S. K., Saheb, Y., Sánchez Rodríguez, R., Ürge-Vorsatz, D., Xiao, C., Yassaa, N., Alegría, A., Armour, K., Bednar-Friedl, B., Blok, K., Cissé, G., Dentener, F., Eriksen, S., Fischer, E., Garner, G., Guivarch, C., Haasnoot, M., Hansen, G., Hauser, M., Hawkins, E., Hermans, T., Kopp, R., Leprince-Ringuet, N., Lewis, J., Ley, D., Ludden, C., Niamir, L., Nicholls, Z., Some, S., Szopa, S., Trewin, B., van der Wijst, K.-I., Winter, G., Witting, M., Birt, A., Ha, M., Kim, J., Haites, E. F., Jung, Y., Stavins, R., Orendain, D. J. A., Ignon, L., Park, S., Park, Y., Reisinger, A., Cammaramo, D., Fischlin, A., Fuglestvedt, J. S., Matthews, J. R., Péan, C. (2023). IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- [3] Global Carbon Project (2023). Global Carbon Project 2023. <https://globalcarbonatlas.org/budgets/carbon-budget/> (letzter Zugriff am 05.01.24).
- [4] Climate Action Tracker (2023). 2030 Emissions Gap: CAT projections and resulting emissions gap in meeting the 1.5°C Paris Agreement goal. <https://climateactiontracker.org/global/cat-emissions-gaps/> (letzter Zugriff am 05.01.23).
- [5] Umweltbundesamt (2021). Beschleunigter globaler Klimaschutz bis 2030. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik/zukunft-der-klimapolitik/beschleunigter-globaler-klimaschutz-bis-2030#hintergrund> (letzter Zugriff am 05.01.24).
- [6] Lau, H. C., Ramakrishna, S., Zhang, K., Radhamani, A. V. (2021). The Role of Carbon Capture and Storage in the Energy Transition. *Energy Fuels* **35**/9, 7364–7386.
- [7] Wöhrle, D. (2022). Klimaschonende Technologien. *Chemie in unserer Zeit* (Chemie in unserer Zeit), 356–370.
- [8] Regufe, M. J., Pereira, A. (2022). Current Developments of Carbon Capture Storage and/or Utilization—Looking for Net-Zero Emissions Defined in the Paris Agreement. In: CO₂ Capture and Renewable Energy. González Plaza, M., Ribeiro, R. P. P. L. (Hrsg.). MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Basel, 5–30.
- [9] Hong, W. Y. (2022). A techno-economic review on carbon capture, utilisation and storage systems for achieving a net-zero CO₂ emissions future. Review. *Carbon Capture Science & Technology* **3**, 1-28.

- [10]Osman, A. I., Hefny, M., Abdel Maksoud, M. I. A., Elgarahy, A. M., Rooney, D. W. (2021). Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a review. *Environmental Chemistry Letters* **19**/2, 797–849.
- [11]Schenuit, F., Böttcher, M., Geden, O. (2023). "Carbon Management": Chancen und Risiken für ambitionierte Klimapolitik. A30.
- [12]Tausch, M. W. (2004). Curriculare Innovation. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* **8/53**, 18–21.
- [13]Rosenberg, D. (2023). Trendbericht Chemiedidaktik. *Nachrichten aus der Chemie* **71**, 8–17.
- [14]Wolf, N., Graf, D. (2013). Iterative Entwicklung eines Unterrichtsdesigns zum Thema Nachhaltigkeit. Herausforderungen, Ansprüche und Bedingungen aus biologiedidaktischer Perspektive. In: *Der lange Weg zum Unterrichtsdesign. Zur Begründung und Umsetzung fachdidaktischer Forschungs- und Entwicklungsprogramme*. Komorek, M. (Hrsg.). Waxmann, Münster, München, Berlin, 95–110.
- [15]Kemper, A.-K., Becker, H.-J. (2016). Bilingualer Physik-/Chemieunterricht in der Fremdsprache Deutsch – Erkenntnisse aus einer Fallstudie in Frankreich. *CHEMKON* **23**/2, 87–89.
- [16]Bohrmann-Linde, C. (2012). Auf dem Weg zu einer Fachdidaktik Bilingualer Chemieunterricht. In: *Bilingualen Unterricht weiterdenken. Programme, Positionen, Perspektiven*. Diehr, B. H., Schmelter, L. H. (Hrsg.). Lang, Frankfurt am Main u.a., 183–200.
- [17]Schumacher, E. (2012). Vanilla or Vanillin? Chemie einmal bilingual. *Chemie in unserer Zeit* **46**/6, 351.
- [18]Hollweck, S., Schwarzer, S. (2020). Fostering Scientific Literacy with the Language of Science in the Production of a Nano-based After-sun Care Product in an Extracurricular Setting. A CLIL Approach in a Science Lab for School Students. In: *Engaging Learners with Chemistry. Projects to Stimulate Interest and Participation*. Parchmann, I. (Hrsg.). RSC, La Vergne, 151–191.
- [19]Ralle, B. (2020). Empirische Forschung im Schülerlabor - eine anspruchsvolle Aufgabe. In: *Handbuch Forschen im Schülerlabor. Theoretische Grundlagen, empirische Forschungsmethoden und aktuelle Anwendungsgebiete*. Sommer, K. A., Wirth, J., Vanderbeke, M. (Hrsg.), 13–17.
- [20]Heine, L. (2013). Empirische Erforschung des Bilingualen Unterrichts. In: *Handbuch bilingualer Unterricht. Content and language integrated learning*, 1. Aufl. Hallet, W., Königs, F. G. (Hrsg.). Klett, Stuttgart, 216–221.
- [21]Flint, A. (2014). Vom didaktischen Konzept zur Unterrichtseinheit. In: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Parchmann, I., Schecker, H. (Hrsg.). Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 57–66.
- [22]Tausch, M. (2019). *Chemie mit Licht. Innovative Didaktik für Studium und Unterricht*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- [23]Ralle, B., Di Fuccia, D.-S., Krüger, D., Parchmann, I., Schecker, H. (2014). Aktionsforschung als Teil fachdidaktischer Entwicklungsforschung. In: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Parchmann, I., Schecker, H. (Hrsg.). Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, S. 43-55.
- [24]Becker, H.-J., Kemper, A.-K. (2018). Trendbericht Chemiedidaktik 2017: Sprachaktivierung im Chemieunterricht. *Nachr. Chem.* **66**/3, 341–345.

- [25]Stuart Hazeldine, R. (2009). Carbon Capture and Storage: How Green Can Black Be? Science (New York, N.Y.) **Vol 324**, 1647–1652.
- [26]International Energy Agency (2020). Energy Technology Perspectives 2020. Special Report von Carbon Capture Utilisation and Storage - CCUS in clean energy transitions.
- [27]Görner, K. (2015). CCS-Prozesskette. In: CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Fishedick, M., Görner, K., Thomeczek, M. (Hrsg.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 255–482.
- [28]Benson, S. M., Orr, F. M. (2008). Carbon Dioxide Capture and Storage. MRS Bulletin **33/4**, 303–305.
- [29]Markewitz, P., Zhao, L., Robinius, M. (2017). Technologiebericht 2.3 CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS). innerhalb des Forschungsprojekts TF-Energiewende. Wuppertal Institut, ISI, Wuppertal.
- [30]Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt (2022). Treibhausgasemissionen 2021- Kurzfassung. Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2021), Berlin.
- [31]Oeljeklaus, G. (2015). 7.3 Kraftwerksprozess mit Vergasung. In: CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Fishedick, M., Görner, K., Thomeczek, M. (Hrsg.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 164–179.
- [32]Holleman, A. F., Wiberg, N., Krieger-Hauwede, M., Chang, J.-H. (2017). Grundlagen und Hauptgruppenelemente. De Gruyter, Berlin, Boston.
- [33]Riedel, E. (Hrsg.) (2010). Allgemeine und anorganische Chemie, 10. Aufl. De Gruyter, Berlin.
- [34]Kühn, M. (2011). CO₂-Speicherung. Chancen und Risiken. Chemie in unserer Zeit **45/2**, 126–138.
- [35]Song, C., Liu, Q., Deng, S., Li, H., Kitamura, Y. (2019). Cryogenic-based CO₂ capture technologies: State-of-the-art developments and current challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews **101**, 265–278.
- [36]D'Alessandro, D. M., Smit, B., Long, J. R. (2010). Abscheidung von Kohlendioxid: Perspektiven für neue Materialien. Angewandte Chemie **122/35**, 6194–6219.
- [37]Boot-Handford, M. E., Abanades, J. C., Anthony, E. J., Blunt, M. J., Brandani, S., Mac Dowell, N., Fernandez, J. R., Ferrari, M.-C., Gross, R., Hallett, J. P., Haszeldine, R. S., Heptonstall, P., Lyngfelt, A., Makuch, Z., Mangano, E., Porter, R. T. J., Pourkashanian, M., Rochelle, G. T., Shah, N., Yao, J. G., Fennell, P. S. (2014). Carbon capture and storage update. Energy & Environmental Science **7/1**, 130–189.
- [38]Bui, M., Adjiman, C. S., Bardow, A., Anthony, E. J., Boston, A., Brown, S., Fennell, P. S., Fuss, S., Galindo, A., Hackett, L. A., Hallett, J. P., Herzog, H. J., Jackson, G., Kemper, J., Krevor, S., Maitland, G. C., Matuszewski, M., Metcalfe, I. S., Petit, C., Puxty, G., Reimer, J., Reiner, D. M., Rubin, E. S., Scott, S. A., Shah, N., Smit, B., Trusler, J. P. M., Webley, P., Wilcox, J., Mac Dowell, N. (2018). Carbon capture and storage (CCS): the way forward. Energy Environ. Sci. **11/5**, 1062–1176.
- [39]IPCC (2022). 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, UK.
- [40]IPCC (2022). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 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.). Cambridge, UK, 3–48.
- [41] Kazemifar, F. (2022). A review of technologies for carbon capture, sequestration, and utilization: Cost, capacity, and technology readiness. *Greenhouse Gases* **12**/1, 200–230.
- [42] Global CCS Institute (2023). The Global Status of CCS: 2023, Australia.
- [43] Pfeifer, H. (2015). Eisen-/Stahl-Industrie. In: CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Fishedick, M., Görner, K., Thomeczek, M. (Hrsg.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 229–238.
- [44] Günther, D., Juhrich, K., Kludt, R., Kuntze, D., Rimkus, D. (2015). Entwicklung der CO₂-Emissionen. 6.2 Branchen. In: CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Fishedick, M., Görner, K., Thomeczek, M. (Hrsg.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 111–149.
- [45] Holleman, A. F., Wiberg, N., Krieger-Hauwede, M., Chang, J.-H. (2017). Nebengruppenelemente, Lanthanoide, Actinoide, Transactinoide. De Gruyter, Berlin, Boston.
- [46] Wollrab, A. (2014). Organische Chemie. Eine Einführung für Lehramts- und Nebenfachstudenten, 4. Aufl. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- [47] Hoenig, V., Hoppe, H., Fleiger, K. (2015). Zementindustrie. In: CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Fishedick, M., Görner, K., Thomeczek, M. (Hrsg.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 239–241.
- [48] Plaza, M. G., Martínez, S., Rubiera, F. (2022). CO₂ Capture, Use, and Storage in the Cement Industry. State of the Art and Expectations. In: CO₂ Capture and Renewable Energy. González Plaza, M., Ribeiro, R. P. P. L. (Hrsg.). MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Basel, 31–58.
- [49] Mortimer, C. E., Müller, U., Beck, J. (2015). Chemie. Das Basiswissen der Chemie : 410 Abbildungen, 545 Formelbilder, 12. Aufl. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- [50] International Energy Agency (2022). Direct air capture. A key technology for net zero. OECD Publishing, Paris.
- [51] Breitschopf, B., Dütschke, Elisabeth, Duscha, Vicki, Haendel, M., Hirzel, S., Kantel, A., Lehmann, S., Marscheider-Weidemann, F., Riemer, M., Tröger, J., Wietschel, M. (2023). Direct Air Carbon Capture and Storage. Ein Gamechanger in der Klimapolitik? Policy Brief, 01/23. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI.
- [52] Wilberforce, T., Olabi, A. G., Sayed, E. T., Elsaid, K., Abdelkareem, M. A. (2021). Progress in carbon capture technologies. *Science of The Total Environment* **761**, 143203.
- [53] Maniarasu, R., Rathore, S. K., Murugan, S. (2023). A review on materials and processes for carbon dioxide separation and capture. *Energy & Environment* **34**/1, 3–57.
- [54] Zou, M., Dong, M., Zhao, T. (2022). Advances in Metal-Organic Frameworks MIL-101(Cr). *International Journal of Molecular Sciences* **23**/16, 9396.
- [55] Boenigk, J., Zydorczyk, S., Mietzel, T. (2018). Spannende Alleskönner: Algen und ihre „Anwendungsgebiete“. Herausforderung Wasserforschung - lokal, regional, global, 70–85.
- [56] Zhou, W., Wang, J., Chen, P., Ji, C., Kang, Q., Lu, B., Li, K., Liu, J., Ruan, R. (2017). Bio-mitigation of carbon dioxide using microalgal systems: Advances and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **76**, 1163–1175.
- [57] Wilcox, J. (2012). Carbon Capture. Springer New York, New York, NY.

- [58]DECHEMA "Algenbiotechnologie" (2016). Mikrolagen-Biotechnologie. Gegenwärtiger Stand, Herausforderungen, Ziele. DECHEMA e.V., Frankfurt am Main.
- [59]Wild, A., Schmitt, V. (2012). Biochemische und physiologische Versuche mit Pflanzen. Für Studium und Unterricht im Fach Biologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- [60]Kadereit, J. W., Körner, C., Nick, P., Sonnewald, U., Lay, M. (2021). Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften, 38. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [61]Iglina, T., Iglina, P., Pashchenko, D. (2022). Industrial CO₂ Capture by Algae: A Review and Recent Advances. Sustainability **14**/7, 3801.
- [62]Walsh, M. J., van Gerber Doren, L., Sills, D. L., Archibald, I., Beal, C. M., Lei, X. G., Huntley, M. E., Johnson, Z., Greene, C. H. (2016). Algal food and fuel coproduction can mitigate greenhouse gas emissions while improving land and water-use efficiency. Environmental Research Letters **11**/11, 114006.
- [63]Morales, M., Sánchez, L., Revah, S. (2018). The impact of environmental factors on carbon dioxide fixation by microalgae. FEMS microbiology letters **365**/3.
- [64]Mayer-Spohn, O., Blesl, M., Fahl, U., Voß, A. (2006). Logistik der CO₂-Sequestrierung – Optionen für den CO₂-Transport. Chemie Ingenieur Technik **78**/4, 435–444.
- [65]IPCC (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- [66]Wells, S. L., DeSimone, J. M. (2001). Die CO₂-Technologie: ein wichtiges Instrument für die Lösung von Umweltproblemen. Angewandte Chemie **113**/3, 534–544.
- [67]Onyebuchi, V. E., Kolios, A., Hanak, D. P., Biliyok, C., Manovic, V. (2018). A systematic review of key challenges of CO₂ transport via pipelines. Renewable and Sustainable Energy Reviews **81**, 2563–2583.
- [68]Middelhaue, R. (2015). CO₂ Transport. In: CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Fishedick, M., Görner, K., Thomeczek, M. (Hrsg.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 388–391.
- [69]Barker, R., Hua, Y., Neville, A. (2017). Internal corrosion of carbon steel pipelines for dense-phase CO₂ transport in carbon capture and storage (CCS) – a review. International Materials Reviews **62**/1, 1–31.
- [70]Bechmann, W., Bald, I. (2020). Einstieg in die Physikalische Chemie für Naturwissenschaftler, 7. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [71]European Commission. Joint Research Centre. (2024). Shaping the future CO₂ transport network for Europe. Publications Office, Luxembourg.
- [72]May, F. (2010). Carbon Capture and Storage (CCS): Speicherung in tiefen geologischen Formationen. In: Feuerlöscher oder Klimakiller? Kohlenstoffdioxid CO₂ - Facetten eines Moleküls. Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie (Hrsg.). Frankfurt am Main.
- [73]Gerling, J. P., Knopf, S. (2015). CO₂-Speicherung. In: CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Fishedick, M., Görner, K., Thomeczek, M. (Hrsg.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 415–422.
- [74]Potdar, R. S., Vishal, V. (2016). Trapping Mechanisms of CO₂ Storage in Deep Saline Aquifers: Brief Review. In: Geologic Carbon Sequestration. Vishal, V., Singh, T. N. (Hrsg.). Springer International Publishing, Cham, 47–58.

- [75]Kruse, D., Kiep, K., Schäffner, B. (2015). CO₂-Abtrennung und und -Nutzung. In: CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Fishedick, M., Görner, K., Thomeczek, M. (Hrsg.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 511–567.
- [76]Smith, S. M., Geden, O., Nemet, G. F., Gidden, M. J., Lamb, W. F., Powis, C., Bellamy, R., Callaghan, M. W., Cowie, A., Cox, E., Fuss, S., Gasser, T., Grassi, G., Greene, J., Lück, S., Mohan, A., Müller-Hansen, F., Peters, G. P., Pratama, Y., Repke, T., Riahi, K., Schenuit, F., Steinhauser, J., Strefler, J., Valenzuela, J. M., Minx, J. C. (2023). The State of Carbon Dioxide Removal.
- [77]GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel (2023). Gezielte Kohlendioxid-Entnahme. Welche Möglichkeiten meeresbasierte Verfahren bieten und wie diese erforscht werden.
- [78]Li, X., Fang, Z. (2014). Current status and technical challenges of CO₂ storage in coal seams and enhanced coalbed methane recovery: an overview. *Int J Coal Sci Technol* **1**/1, 93–102.
- [79]Pashin, J. C. (2016). Geological Considerations for CO₂ Storage in Coal. In: *Geologic Carbon Sequestration*. Vishal, V., Singh, T. N. (Hrsg.). Springer International Publishing, Cham, 137–160.
- [80]Fan, C., Yang, L., Sun, H., Luo, M., Zhou, L., Yang, Z., Li, S. (2023). Recent Advances and Perspectives of CO₂-Enhanced Coalbed Methane: Experimental, Modeling, and Technological Development. *Energy Fuels* **37**/5, 3371–3412.
- [81]Global CCS Institute. Global Status of CCS 2022.
- [82]Knopf, S., May, F., Mueller, C., Gerling, P. (2010). Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO₂-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* **60**, 76–80.
- [83]Edenhofer, O., Grimm, V., Haug, G., Marotzke, J., Marquardt, W., Schlögl, Robert, Schüth, Ferdi, Wagner, U. (2024). Schlüsselemente des Kohlenstoffmanagements. Ad-hoc-Stellungnahme.
- [84]Finkenrath, M., Nick, S., Bettzüge, M. O. (2015). Ökonomische Aspekte von CCS. In: CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Fishedick, M., Görner, K., Thomeczek, M. (Hrsg.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 571–604.
- [85]Kuckshinrichs, W., Vögele, S. (2014). Economic Analysis of Carbon Capture in the Energy Sector. In: *Carbon Capture, Storage and Use. Technical, Economic, Environmental and Societal Perspectives*, 1. Aufl. Kuckshinrichs, W., Hake, J.-F. (Hrsg.). Springer-Verlag, 147–171.
- [86]Global Carbon Capture and Storage Institute (2019). Global Status of CCS 2019. Targeting Climate Change.
- [87]Paltsev, S., Morris, J., Kheshgi, H., Herzog, H. (2021). Hard-to-Abate Sectors: The role of industrial carbon capture and storage (CCS) in emission mitigation. *Applied Energy* **300**, 117322.
- [88]Stone, E. J., Lowe, J. A., Shine, K. P. (2009). The impact of carbon capture and storage on climate. *Energy Environ. Sci.* **2**/1, 81–91.
- [89]Viebahn, P., Falk, B. (2015). Ökobilanzen der CCS-Prozesskette. In: CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Fishedick, M., Görner, K., Thomeczek, M. (Hrsg.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 605–632.
- [90]Schreiber, A., Zapp, P., Marx, J. (2014). Environmental Aspects of CCS. In: *Carbon Capture, Storage and Use. Technical, Economic, Environmental and Societal Perspectives*, 1. Aufl. Kuckshinrichs, W., Hake, J.-F. (Hrsg.). Springer-Verlag, 101–126.
- [91]Schenuit, F., Böttcher, M., Geden, O. (2022). CO₂-Entnahme als integraler Baustein des europäischen "Green Deal". A37.
- [92]European Commission. Directorate General for Energy. Industrial carbon management: capturing, storing and using CO₂ to reach our climate goals.

- [93] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022). Evaluierungsbericht der Bundesregierung zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz. Drucksache 20/5145.
- [94] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024). Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon Management Strategie.
- [95] Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2021). Kohlenstoff kann Klimaschutz. Carbon Management Strategie Nordrhein-Westfalen.
- [96] Bundesverband der deutschen Industrie, Deutsche Gewerkschaftsbund, Naturschutzbund Deutschland, WWF Deutschland (2024). Industrietransformation aus einem Guss. Thesenpapier zur Einordnung von Carbon Management.
- [97] Greenpeace, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Deutsche Umwelthilfe, Bundesverband Bürgerinitiativen Umweltschutz, Bundesverband für Umweltberatung e.V., PowerShift e.V., urgewald e.V., GasWende, Naturschutzverein Südtondern, Bürgerinitiative „Kein CO2 Endlager Altmark“. CCS: Breites Umweltbündnis warnt vor gefährlichem Irrweg. Gemeinsame Pressemitteilung vom 30.01.2024.
- [98] Friedrich, A. Umstrittener Untergrund. Eine Fallstudie zu den gesellschaftlichen Auseinandersetzungen um Carbon Capture and Storage (2009-2012). Dissertation.
- [99] Petersen, U. (2010). Eine Frage der Ehre. Protest gegen CO₂-Endlager in Schleswig-Holstein. In: Politische Ökologie. CO₂-Speicherung: Klimarettung oder geologische Zeitbombe? Radloff, J. (Hrsg.). Oekom-Verl., München, 47–49.
- [100] Schumann, S. (2014). Public Acceptance. In: Carbon Capture, Storage and Use. Technical, Economic, Environmental and Societal Perspectives, 1. Aufl. Kuckshinrichs, W., Hake, J.-F. (Hrsg.). Springer-Verlag, 221–251.
- [101] Pfeiffer, J., Erlach, B., Fishedick, M., Fuss, S., Geden, O., Löschel, A., Pittel, K., Ragwitz, M., Stephanos, C., Weidlich, A. (2024). Kohlenstoffmanagement integriert denken. Anforderungen an eine Gesamtstrategie aus CCS, CCU und CDR. Schriftenreihe „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS).
- [102] Umweltbundesamt (2023). Carbon Capture and Storage. Diskussionsbeitrag in die nationalen Klimaschutzstrategien.
- [103] Breidbach, S. (2013). Geschichte und Entstehung des Bilingualen Unterrichts in Deutschland. Bilingualer Unterricht und Gesellschaftspolitik. In: Handbuch bilingualer Unterricht. Content and language integrated learning, 1. Aufl. Hallet, W., Königs, F. G. (Hrsg.). Klett, Stuttgart, 11–17.
- [104] Wolff, D. (2016). Der bilinguale Sachfachunterricht historisch betrachtet. Ist er der Königsweg zu Mehrsprachigkeit und zum interkulturellen Verstehen? In: Bilingualen Unterricht weiterentwickeln und erforschen. Diehr, B., Preisfeld, A., Schmelter, L. (Hrsg.). Peter Lang Edition, Frankfurt am Main, Bern, Bruxelles, New York, Oxford, Warszawa, Wien, 19–36.
- [105] Wolff, D., Sudhoff, J. (2015). Zur Definition des Bilingualen Lehrens und Lernens. In: CLIL Revisited. Eine kritische Analyse zum gegenwärtigen Stand des bilingualen Sachfachunterrichts. Wolff, D., Sudhoff, J., Rüschoff, B. (Hrsg.). Peter Lang GmbH, Internationaler Verlag der Wissenschaften, Frankfurt am Main, 9–39.
- [106] Valdés, G., Poza, L., Brooks, M. D. (2015). Language Acquisition in Bilingual Education. In: The handbook of bilingual and multilingual education. Wright, W. E. (Hrsg.). Wiley Blackwell, Chichester, West Sussex, 57–74.

- [107] Bonnet, A., Breidbach, S., Hallet, W. (2013). Fremdsprachlich handeln im Sachfach: Bilinguale Lernkontexte. In: Englischunterricht. Grundlagen und Methoden einer handlungsorientierten Unterrichtspraxis, 5. Aufl. Bach, G., Timm, J.-P. (Hrsg.). Narr Francke Attempto; UTB GmbH, Tübingen und Basel, Stuttgart, 172–198.
- [108] Breidbach, S., Viebrock, B. (2013). CLIL: Complementing or Compromising Foreign Language Teaching? Effects and Perspectives of Education Policy Plans. In: Content and Language Integrated Learning (CLIL) in Europe. Breidbach, S., Viebrock, B. (Hrsg.). Interactive Factory, Bern, Schweiz, 11–24.
- [109] Coyle, D., Hood, P., Marsh, D. (2010). CLIL. Content and language integrated learning. Cambridge University Press, Cambridge.
- [110] Fleckenstein, J., Rumlich, D., Möller, Jens (2018). Bilingualer Sachfachunterricht. In: Basiswissen Lehrerbildung: Englisch unterrichten, 1. Aufl. Heinz, S., Riedel, A., Riecke-Baulecke, T. (Hrsg.). Klett | Kallmeyer, Seelze, 256–274.
- [111] Wolff, D. (2013). CLIL als europäisches Konzept. In: Handbuch bilingualer Unterricht. Content and language integrated learning, 1. Aufl. Hallet, W., Königs, F. G. (Hrsg.). Klett, Stuttgart, 18–26.
- [112] Johannessen, B. G. G. (2019). Introduction: Multilingualism and Bilingual Education: Politics, Policies, and Practices in a Globalized Society. In: Bilingualism and Bilingual Education. Johannessen, B. G. G. (Hrsg.). Springer, Cham, 1–8.
- [113] Klewitz, B. (2022). Bilingual Unterrichten - CLIL Fachdidaktik : Content and Language Integrated Learning. Ibidem Verlag, Berlin.
- [114] Meyer, O., Halbach, A., Coyle, D. (2015). Sachfach-Pluriliteralität in der Praxis. Pluriliteralität im Sachfach für vertieftes Lernen.
- [115] Coyle, D., Meyer, O. (2021). Beyond CLIL. Pluriliteracies teaching for deeper learning. Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, Port Melbourne, New Delhi, Singapore.
- [116] Coyle, D. (2020). Exploring the Potential of a Pluriliteracies Approach. Chapter 10. In: Curriculum integrated language teaching. CLIL in practice. Bower, K., Coyle, D., Cross, R., Chambers, G. N. (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, 187–204.
- [117] Meyer, O., Coyle, D., Halbach, A., Schuck, K., Ting, T. (2015). A pluriliteracies approach to content and language integrated learning – mapping learner progressions in knowledge construction and meaning-making. *Language, Culture and Curriculum* **28**/1, 41–57.
- [118] KMK (2013). Konzepte für den bilingualen Unterricht - Erfahrungsbericht und Vorschläge zur Weiterentwicklung. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 17.10.2013.
- [119] Diehr, B., Rumlich, D. (2021). Bilingualer Unterricht. Aktuelle Herausforderungen und neue Chancen. Zur Einführung in den Themenschwerpunkt. *Fremdsprachen lehren und lernen* **50**/1, 3–14.
- [120] Ball, P., Kelly, K., Clegg, J. (2015). Putting CLIL into practice. Oxford University Press, Oxford.
- [121] Breidbach, S. (2015). Zum Stand der Entwicklung einer CLIL-Didaktik für den bilingualen Unterricht. Vier Grundmodelle und das (ewig?) uneingelöste, aber einlösbares Versprechen reflexiver Lernprozesse. In: CLIL Revisited. Eine kritische Analyse zum gegenwärtigen Stand des bilingualen Sachfachunterrichts. Wolff, D., Sudhoff, J., Rüschhoff, B. (Hrsg.). Peter Lang GmbH, Internationaler Verlag der Wissenschaften, Frankfurt am Main, 205–223.

- [122] Mehisto, P., Marsh, D., Frigols, M. J. (2009). Uncovering CLIL. Content and language integrated learning in bilingual and multilingual education, 1. Aufl. Hueber; Macmillan Education, München, Oxford.
- [123] Hallet, W. (2013). 28 Aufgaben und Materialentwicklung. In: Handbuch bilingualer Unterricht. Content and language integrated learning, 1. Aufl. Hallet, W., Königs, F. G. (Hrsg.). Klett, Stuttgart, 202–209.
- [124] Hallet, W. (1999). Ein didaktisches Modell für den bilingualen Sachfachunterricht: The Bilingual Triangle. NM: neusprachliche Mitteilungen aus Wissenschaft und Praxis **52/1**, 23–27.
- [125] Klewitz, B. (2021). Content and Language Integrated Learning (CLIL): A Methodology of Bilingual Teaching. ibidem, Hannover.
- [126] Bohrmann-Linde, C. Auf dem Weg zu einer Fachdidaktik Bilingualer Chemieunterricht, S.183-200.
- [127] Bonnet, A. (2015). Sachfachlicher Kompetenzerwerb in naturwissenschaftlichen CLIL Kontexten. In: CLIL Revisited. Eine kritische Analyse zum gegenwärtigen Stand des bilingualen Sachfachunterrichts. Wolff, D., Sudhoff, J., Rüschoff, B. (Hrsg.). Peter Lang GmbH, Internationaler Verlag der Wissenschaften, Frankfurt am Main, 165–182.
- [128] Bonnet, A. (2016). Two for the price of one? Das Verhältnis von sachfachlicher und fremdsprachlicher Bildung beim Content und Language Integrated Learning. In: Bilingualen Unterricht weiterentwickeln und erforschen. Diehr, B., Preisfeld, A., Schmelter, L. (Hrsg.). Peter Lang Edition, Frankfurt am Main, Bern, Bruxelles, New York, Oxford, Warszawa, Wien, 37–56.
- [129] KMK (2013). Operatoren für die naturwissenschaftlichen Fächer (Physik, Biologie, Chemie) an den Deutschen Schulen im Ausland.
- [130] Rymarczyk, J. (2012). "Bilingual" ist doch die richtige Bezeichnung! - Code-switching im englischsprachigen Kunstunterricht. In: Bilingualen Unterricht weiterdenken. Programme, Positionen, Perspektiven. Diehr, B. H., Schmelter, L. H. (Hrsg.). Lang, Frankfurt am Main u.a., 111–130.
- [131] Leisen, J. (2015). Planung von CLIL-Unterricht. Zeitschrift für Interkulturellen Fremdsprachenunterricht **20/2**, 45–58.
- [132] Thürmann, E. (2010). Zur Konstruktion von Sprachgerüsten im bilingualen Sachfachunterricht. In: Bilingualer Sachfachunterricht in der Sekundarstufe. Eine Einführung. Doff, S. (Hrsg.). Narr, Tübingen, 137–153.
- [133] Diehr, B. (2012). What's in a name? Terminologische, typologische und programmatische Überlegungen zum Verhältnis der Sprachen im Bilingualen Unterricht. In: Bilingualen Unterricht weiterdenken. Programme, Positionen, Perspektiven. Diehr, B. H., Schmelter, L. H. (Hrsg.). Lang, Frankfurt am Main u.a., 17–32.
- [134] Gablasova, D. (2014). Issues in the assessment of bilingually educated students. Expressing subject knowledge through L1 and L2. The Language Learning Journal **42/2**, 151–164.
- [135] Diehr, B. (2016). Doppelte Fachliteralität im bilingualen Unterricht. Theoretische Modelle für Forschung und Praxis. In: Bilingualen Unterricht weiterentwickeln und erforschen. Diehr, B., Preisfeld, A., Schmelter, L. (Hrsg.). Peter Lang Edition, Frankfurt am Main, Bern, Bruxelles, New York, Oxford, Warszawa, Wien, 57–83.

- [136] Volmer, E., Grabner, R. H., Saalbach, H. (2018). Language switching costs in bilingual mathematics learning. Transfer effects and individual differences. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft* **21**/1, 71–96.
- [137] van Rinsveld, A., Brunner, M., Landerl, K., Schiltz, C., Ugen, S. (2015). The relation between language and arithmetic in bilinguals. Insights from different stages of language acquisition. *Frontiers in psychology* **6**, 265.
- [138] Böing, M., Palmen, P. (2012). Bilingual heißt zweisprachig! Überlegungen zur Verwendung beider Sprachen im bilingual deutsch-französischen Geographieunterricht. In: *Bilingualen Unterricht weiterdenken. Programme, Positionen, Perspektiven*. Diehr, B. H., Schmelter, L. H. (Hrsg.). Lang, Frankfurt am Main u.a., 73–90.
- [139] Sudhoff, J. (2015). Zur Materialentwicklung im bilingualen Sachfachunterricht. In: *CLIL Revisited. Eine kritische Analyse zum gegenwärtigen Stand des bilingualen Sachfachunterrichts*. Wolff, D., Sudhoff, J., Rüschoff, B. (Hrsg.). Peter Lang GmbH, Internationaler Verlag der Wissenschaften, Frankfurt am Main, 267–288.
- [140] Frisch, S. (2016). Sprachwechsel als integraler Bestandteil bilingualen Unterrichts. In: *Bilingualen Unterricht weiterentwickeln und erforschen*. Diehr, B., Preisfeld, A., Schmelter, L. (Hrsg.). Peter Lang Edition, Frankfurt am Main, Bern, Bruxelles, New York, Oxford, Warszawa, Wien, 85–102.
- [141] Thürmann, E. (2013). Spezifische Methoden für den Bilingualen Unterricht/CLIL. In: *Handbuch bilingualer Unterricht. Content and language integrated learning*, 1. Aufl. Hallet, W., Königs, F. G. (Hrsg.). Klett, Stuttgart, 229–235.
- [142] Butzkamm, W. (2010). Über die planvolle Mitbenutzung der Muttersprache im bilingualen Sachfachunterricht. In: *Bilingualer Unterricht. Grundlagen, Methoden, Praxis, Perspektiven*. 5., überarb. und erw. Aufl. Bach, G. H. (Hrsg.). Lang, Frankfurt, Main, 91–121.
- [143] Heimes, A. V. (2010). Bilinguale Methoden für den mehrsprachigen Sachfachunterricht. *Praxis Fremdsprachenunterricht. Basisheft* **7; Jg. 2010/2**, 7–10.
- [144] Bohn, M., Doff, S. (2010). Biologie bilingual: Die Perspektive der Unterrichtspraxis. In: *Bilingualer Sachfachunterricht in der Sekundarstufe. Eine Einführung*. Doff, S. (Hrsg.). Narr, Tübingen, 72–88.
- [145] Hélot, C., Cavalli, M. (2017). Bilingual Education in Europe: Dominant Languages. In: *Bilingual and Multilingual Education*. Springer, Cham, 1–18.
- [146] Rönneper, H., Boppré, C. (2015). Bilingualer Unterricht in den weiterführenden Schulen. In: *CLIL Revisited. Eine kritische Analyse zum gegenwärtigen Stand des bilingualen Sachfachunterrichts*. Wolff, D., Sudhoff, J., Rüschoff, B. (Hrsg.). Peter Lang GmbH, Internationaler Verlag der Wissenschaften, Frankfurt am Main, 65–74.
- [147] Königs, F. G. (2013). Mehrsprachigkeit und Bilingualer Unterricht/CLIL. Die Begriffsvielfalt von Mehrsprachigkeit. In: *Handbuch bilingualer Unterricht. Content and language integrated learning*, 1. Aufl. Hallet, W., Königs, F. G. (Hrsg.). Klett, Stuttgart.
- [148] Breidbach, S., Viebrock, B. (Hrsg.) (2013). *Content and Language Integrated Learning (CLIL) in Europe*. Interactive Factory, Bern, Schweiz.
- [149] Krechel, H.-L. (2013). Organisationsformen und Modelle in weiterführenden Schulen. In: *Handbuch bilingualer Unterricht. Content and language integrated learning*, 1. Aufl. Hallet, W., Königs, F. G. (Hrsg.). Klett, Stuttgart, 74–80.

- [150] Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen. Bilingualer Unterricht in Nordrhein-Westfalen. <https://www.schulministerium.nrw/bilingualer-unterricht-nordrhein-westfalen> (letzter Zugriff am 19.07.24).
- [151] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2011). Bilingualer Unterricht in Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.
- [152] Nold, G., Hartig, J., Hinz, S., Rossa, H. (2008). Klassen im bilingualen Sachfachunterricht: Englisch als Arbeitssprache. In: Unterricht und Kompetenzerwerb in Deutsch und Englisch. Ergebnisse der DESI-Studie. Klieme, E. (Hrsg.). Beltz, Weinheim, 451–457.
- [153] Ohlberger, S., Wegner, C. (2018). Bilingualer Sachfachunterricht in Deutschland und Europa. Herausforderung LehrerInnenbildung. Zeitschrift zur Konzeption, Gestaltung und Diskussion 1, 45–89.
- [154] Krebs, R. E. (2021). Content-Language-Integrated Learning. (CLIL) im Chemieunterricht. Chemie und Schule 4, 10–12.
- [155] Otwinowska, A., Foryś, M. (2017). They learn the CLIL way, but do they like it? Affectivity and cognition in upper-primary CLIL classes. International Journal of Bilingual Education and Bilingualism 20/5, 457–480.
- [156] María, J., Frigols, M., Marsh, D., Mehisto, P., Wolff, D. (2011). Europäisches Rahmenprogramm für die Ausbildung von CLIL-Lehrkräften. European Framework for CLIL teacher education.
- [157] Brunnert, R. (2022). Photoprozesse im bilingualen Chemie- und Biologieunterricht. Dissertation.
- [158] Rumlich, D. (2018). Empirische Zugänge zum bilingualen Sachfachunterricht. Zeitschrift für Erziehungswissenschaft 21/1, 198–204.
- [159] Baker, C., Lewis, G. (2015). A Synthesis of Research on Bilingual and Multilingual Education. In: The handbook of bilingual and multilingual education. Wright, W. E. (Hrsg.). Wiley Blackwell, Chichester, West Sussex, 109–126.
- [160] Rumlich, D. (2018). Englischnoten und globale englische Sprachkompetenz in bilingualen Zweigen. Zeitschrift für Erziehungswissenschaft 21/1, 29–48.
- [161] Feddermann, M., Baumert, J., Möller, J. (2024). A replication study to assess CLIL effects on second language learning in Germany: more than selection and preparation effects? International Journal of Bilingual Education and Bilingualism 27/2, 173–186.
- [162] Goris, J. A., Denessen, E., Verhoeven, L. T. (2019). Effects of content and language integrated learning in Europe A systematic review of longitudinal experimental studies. European Educational Research Journal 18/6, 675–698.
- [163] Bonnet, A. (2012). CLIL im Fach Chemie. Wachsende Orchidee und Motor der Integration. In: Bilingualen Unterricht weiterdenken. Programme, Positionen, Perspektiven. Diehr, B. H., Schmelter, L. H. (Hrsg.). Lang, Frankfurt am Main u.a., 201-218.
- [164] Klingauf, M. (2013). Chemie als bilinguales Schulfach. Chancen und Ziele. In: Bilingual unterrichten. Englisch für alle Fächer, 1. Aufl. Biederstädt, W. (Hrsg.). Cornelsen Scriptor, Berlin, 115–127.
- [165] Becker, H.-J., Kemper, A.-K. (2019). Trendbericht Chemiedidaktik. Nachr. Chem. 67/12, 13–18.

- [166] Bohrmann-Linde, C., Strippel, C. (2019). Sprachliche Interaktionen und sprachsensibler Chemieunterricht. In: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht, 2. Aufl. Sommer, K. A., Wambach-Laicher, J., Pfeifer, P. (Hrsg.). Aulis, Seelze, 709–722.
- [167] Hülten, F. (2023). Chemie bilingual eine quasiexperimentelle Vergleichsstudie zur sachfachlichen, (fremd-)sprachlichen und motivationalen Wirksamkeit eines bilingualen Moduls im Fach Chemie. RWTH Aachen University.
- [168] Hallet, W. (2007). Scientific Literacy und Bilingualer Sachfachunterricht. In: Fremdsprache als Arbeitssprache in Schule und Studium. Gnutzmann, C. H. (Hrsg.). Narr, Tübingen, 95–109.
- [169] KMK (2020). Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife.
- [170] Becker, H.-J., Nguyen, Q. M. (2017). Trendbericht Chemiedidaktik 2016. Bilingualer Unterricht. Nachr. Chem. **65**, 375–382.
- [171] Rittersbacher, C. (2007). Zur Eignung der Naturwissenschaften - insbesondere der Chemie - für den bilingualen Unterricht. Die Synergetik sprachlicher und sachfachlicher Probleme. In: Fremdsprache als Arbeitssprache in Schule und Studium. Gnutzmann, C. (Hrsg.). Narr, Tübingen, 111–125.
- [172] Bohrmann-Linde, C. (2016). Funktionale Sprachwechsel und Wechsel der Darstellungsformen im bilingualen Chemieunterricht. In: Bilingualen Unterricht weiterentwickeln und erforschen. Diehr, B., Preisfeld, A., Schmelter, L. (Hrsg.). Peter Lang Edition, Frankfurt am Main, Bern, Bruxelles, New York, Oxford, Warszawa, Wien, 165–181.
- [173] Biederstädt, W. (2013). Ein innovatives Unterrichtskonzept. In: Bilingual unterrichten. Englisch für alle Fächer, 1. Aufl. Biederstädt, W. (Hrsg.). Cornelsen Scriptor, Berlin, 5–22.
- [174] Aristov, N. V. (2013). Wenn 'bilingualer' Chemieunterricht, dann wie? Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht **66; Jg. 2013/1**, 30–36.
- [175] Dale, L., Tanner, R. (2012). CLIL activities. A resource for subject and language teachers. Cambridge University Press; Klett Vertrieb, Cambridge, Stuttgart.
- [176] Leisen, J. (2013). Handbuch Sprachförderung im Fach. Sprachsensibler Fachunterricht in der Praxis : Grundlagenwissen, Anregungen und Beispiele für die Unterstützung von sprachschwachen Lernern und Lernern mit Zuwanderungsgeschichte beim Sprechen, Lesen, Schreiben und Üben im Fach. Ernst Klett Sprachen, Stuttgart.
- [177] Conolly, T., Meyer, O., Huwer, J. (2018). Erklären üben. Fachspezifische Argumentationsmuster von Erklärungen. Naturwissenschaften im Unterricht Chemie 167, 34–37.
- [178] Conolly, T. (2023). Chemistry: Exploring Pluriliteracies through a Deeper Learning Episode on Redox Reactions. In: A deeper learning companion for CLIL. Putting pluriliteracies into practice. Coyle, D., Meyer, O., Staschen-Dielmann, S. (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, New York, NY, 21–48.
- [179] Stein, H. V. (2015). Bioenergy. Nachwachsende Rohstoffe als bilinguales Unterrichtsmodul. Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie **26; Jg. 2015/148**, 7–17.
- [180] Martin, B., Mahaffy, P. (2012). Klima als Kontext zum Lernen chemischer Grundlagen. Eine digitale Lernumgebung für den bilingualen Unterricht. Naturwissenschaften im Unterricht : Chemie **23/129**, 40–43.

- [181] Bohrmann-Linde, C., Kiesling, E., Brunnert, R., Geller, H., Landau, R., Strippel, C. (2024). Bilingual chemistry. Universität Wuppertal.
- [182] Qualitäts- und UnterstützungsAgentur - Landesinstitut für Schule (QUA-LIS) NRW. Bilingualer Unterricht. <https://www.schulentwicklung.nrw.de/cms/bilingualer-unterricht/angebot-home/bilingualer-unterricht.html?msckid=b8aadd41cf8611ec967027907a7863f5> (letzter Zugriff am 14.11.24).
- [183] Henrich, B., Haupt, O. (2017). Was sind Schülerlabore? In: Bildung für nachhaltige Entwicklung in Schülerlaboren, 1. Aufl. LernortLabor- Bundesverband der Schülerlabore e.V. (Hrsg.). LernortLabor - Bundesverband der Schülerlabore e.V, Dänischenhagen, 13–15.
- [184] Kieferle, S., Markic, S. (2024). Enabling active participation and inquiry-based learning – inclusive learning settings for a student laboratory for lower secondary school. CHEMKON **31**/1, 21–27.
- [185] Habertzettl, S., Huwer, J., Bröhl, K., Hempelmann, R. (2020). Development of Language in the Schülerlabor – Language-Sensitive Teaching on the Example of Sweeteners. CHEMKON **27**/1, 7–12.
- [186] Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2019). Leitlinie Bildung für nachhaltige Entwicklung. Schule in NRW Nr. 9052.
- [187] LernortLabor- Bundesverband der Schülerlabore e.V. (2017). Bildung für nachhaltige Entwicklung in Schülerlaboren, Dänischenhagen.
- [188] Gehring, W. (2011). Bilinguale Lernorterkundungen. authentisch, inhaltsbasiert, kommunikationsorientiert. In: Außerschulische Lernorte bilingual, 1. Aufl. Gehring, W., Michler, A. (Hrsg.). Cuvillier Verlag, Göttingen, 11–31.
- [189] Fehling, A., Hämmerling, H., Schramm, U. (2013). Scaffolding in bilingualen Modulen. In: Bilingual unterrichten. Englisch für alle Fächer, 1. Aufl. Biederstädt, W. (Hrsg.). Cornelsen Scriptor, Berlin, 15–22.
- [190] Hollweck, S., Schwarzer, S. (2020). Geschlechtereffekte im bilingualen Schülerlabor. In: Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Wien 2019. Habig, S. (Hrsg.). Universität Duisburg-Essen, 337–340.
- [191] Wirth, J., Fleischer, J. (2020). Fragebogen und Testverfahren in der Schülerlaborforschung. In: Handbuch Forschen im Schülerlabor. Theoretische Grundlagen, empirische Forschungsmethoden und aktuelle Anwendungsgebiete. Sommer, K. A., Wirth, J., Vanderbeke, M. (Hrsg.).
- [192] Baar, R., Schönknecht, G. (2018). Außerschulische Lernorte: didaktische und methodische Grundlagen. Beltz, Weinheim.
- [193] Itzek-Greulich, H. (2020). Die Anbindung von Schülerlaborprojekten an die Schule. In: Handbuch Forschen im Schülerlabor. Theoretische Grundlagen, empirische Forschungsmethoden und aktuelle Anwendungsgebiete. Sommer, K. A., Wirth, J., Vanderbeke, M. (Hrsg.), 139–149.
- [194] Röllke, K., Grotjohann, N. (2020). Einfluss der Nachbereitung des Schülerlaborbesuchs auf den Wissensbehalt der Schülerinnen und Schüler. In: Handbuch Forschen im Schülerlabor. Theoretische Grundlagen, empirische Forschungsmethoden und aktuelle Anwendungsgebiete. Sommer, K. A., Wirth, J., Vanderbeke, M. (Hrsg.), 127–133.

- [195] Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur Schleswig-Holstein (2022). Leitfaden zu den Fachanforderungen Chemie. Allgemeinbildende Schulen Sekundarstufe I Sekundarstufe II.
- [196] Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur Rheinland-Pfalz (2014). Lehrpläne für die naturwissenschaftlichen Fächer für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz. Biologie Chemie Physik Klassenstufen 7 bis 9/10.
- [197] Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2022). Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule für Nordrhein-Westfalen. Chemie.
- [198] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2012). Biologie deutsch-englisch in der Sekundarstufe I. Bilingualer Unterricht.
- [199] Fink, S., Graf, E., Günkel, T., Himmler, U., Münzinger, W. (2023). Blickpunkt Chemie Gesamtband. 7-10. Westermann Bildungsmedien Verlag GmbH.
- [200] Gietz, Paul, Nelle, Peter, Penz, Carsten, Schumacher, Elke, de Vries, Wilke. Elemente Chemie Oberstufe. Nordrhein-Westfalen, 1. Aufl. Ernst Klett Verlag.
- [201] Bohrmann-Linde, C., Siehr, I. (2023). Chemie Qualifikationsphase. Nordrhein-Westfalen, 1. Aufl. C.C. Buchner Verlag.
- [202] Ryan, L. Chemistry for you. Oxford University Press.
- [203] Smith, D., Davis, A., Disney, A., Hayes, V., Whan, R. (2015). Nelson chemistry units 3 & 4 for the Australian curriculum. Cengage Learning Australia, South Melbourne, Victoria, Australia.
- [204] Kropp, A. (2019). BNE: Bildung für Nachhaltige Entwicklung. In: Grundlagen der nachhaltigen Entwicklung. Handlungsmöglichkeiten und Strategien zur Umsetzung, 1. Aufl. Kropp, A. (Hrsg.). Springer Gabler, Wiesbaden, Germany, 27–28.
- [205] Kamp, G., Haan, G. de, Lerch, A., Matignon, Laura, Müller-Christ, Georg, Nutzinger, H. G., Wüstscher, F. (2008). Schulpraktische Konsequenzen: Bildung für nachhaltige und gerechte Entwicklung. In: Nachhaltigkeit und Gerechtigkeit. Grundlagen und schulpraktische Konsequenzen, 1. Aufl. Haan, G. de (Hrsg.). Springer, Berlin, 113–227.
- [206] Paul, J., Schanze, S. (2025). Auswahl der Fachinhalte. In: Fachdidaktik Chemie in Theorie und Praxis, 2025. Aufl. Paul, J., Schanze, S., Sieve, B. (Hrsg.). Springer Berlin; Springer Spektrum, Berlin, 71–107.
- [207] United Nations - Department of Economic and Social Affairs. Sustainable Development - The 17 Goals. History. <https://sdgs.un.org/goals#icons> (letzter Zugriff am 09.02.25).
- [208] Kultusministerkonferenz (2024). Empfehlung der Kultusministerkonferenz zur Bildung für nachhaltige Entwicklung in der Schule. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 13.06.2024.
- [209] United Nations - Department of Economic and Social Affairs. Sustainable Development - The 17 Goals. Goal 4. Ensure inklusive and equitable quality education and promote lifelong learning opportunities for all. https://sdgs.un.org/goals/goal4#targets_and_indicators (letzter Zugriff am 09.02.25).
- [210] Schreiber, J.-R., Siege, H. (Hrsg.) (2016). Orientierungsrahmen für den Lernbereich globale Entwicklung im Rahmen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung. Ein Beitrag zum Weltaktionsprogramm "Bildung für nachhaltige Entwicklung" : Ergebnis des gemeinsamen Projekts der Kultusministerkonferenz (KMK) und des Bundesministeriums für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), 2004-2015, Bonn, 2. Aufl. Cornelsen, Berlin.
- [211] Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, Humboldt-Universität zu Berlin (2020). Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine

Hochschulreife. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020, 1. Aufl. Carl Link Verlag, Köln.

- [212] Brock, A., Holst, J. (2022). Schlüssel zu Nachhaltigkeit und BNE in der Schule: Ausbildung von Lehrenden, Verankerung in der Breite des Fächerkanons und jenseits der Vorworte.
- [213] Rosenberg, D., Pohle, H. (2024). Trendbericht Chemiedidaktik. Nachrichten aus der Chemie **72**, 11–19.
- [214] Strippel, C., Graulich, N. (2025). Bildung für nachhaltige Entwicklung im Chemieunterricht. Ein Gemeinschaftsprojekt. Naturwissenschaften im Unterricht Chemie **26**./1/25, 205, 2–7.
- [215] Anastas, P. T., Warner, J. C. (2000). Green chemistry. Theory and practice, 1. Aufl. Oxford University Press, Oxford.
- [216] Burmeister, M., Rauch, F., Eilks, I. (2012). Education for Sustainable Development (ESD) and chemistry education. Chem. Educ. Res. Pract. **13**/2, 59–68.
- [217] Linkwitz, M., Eilks, I. (2019). Green Chemistry in der Schule. Chemie in unserer Zeit **53**/6, 412–420.
- [218] Kiesling, E., Venzlaff, J., Bohrmann-Linde, C. (2023). BNE und Chemieunterricht – BNE als roter Faden durch die Schulchemie und Beispiel einer Lerneinheit zur Klimawirksamkeit von Kohlenstoffdioxid. CHEMKON **30**/3, 96–102.
- [219] Eilks, I., Marks, R., Stuckey, M. (2016). Das gesellschaftskritisch-problemorientierte Unterrichtsverfahren -. erläutert an einem Unterrichtsbeispiel zu Tätowierungen. Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule **66**/5, 33–37.
- [220] Hoffmann, T. (2022). Globale Herausforderungen als Thema im Geographieunterricht. geographie heute **2022**/359, 10–12.
- [221] Brock, A., Grund, J. (2015-2019). Bildung für nachhaltige Entwicklung in Lehr-Lernsettings. – Quantitative Studie des nationalen Monitorings – Befragung von LehrerInnen, Executive Summary, Berlin.
- [222] Leven, I., McDonnell Sophia, Niedermeier, T. (2024). Zukunft? Jugend fragen! - 2023. Umwelt und Klima in Zeiten vielfältiger Krisen: Wie junge Menschen den Herausforderungen begegnen, Berlin.
- [223] Kiesling, E., Venzlaff, J., Bohrmann-Linde (2022). BNE im Chemieunterricht – von der Leitlinie BNE NRW zur exemplarischen Unterrichtseinbindung. CHEMKON **29**/S1, 239–245.
- [224] Meyer, I. (2024). Erhebung der Umsetzung von BNE im Chemieunterricht und Konzeption BNE-förderlicher Materialien zum Inhaltsfeld "Säuren und Basen" für die Sekundarstufen I und II. Masterthesis. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal.
- [225] Kiesling, E., Bohrmann-Linde, C. (2025). Von der Leitlinie BNE zum bilingual-englischen Schülerlabor. Konzeption, Erprobung und Evaluation einer Konzeption, Erprobung und Evaluation einer bilingualen Experimentierumgebung im Fach Chemie zum Thema Carbon Capture and Storage. In: BNE in der Lehrkräftebildung. Erkenntnisse aus Forschung und Praxis. Keil, A., Hanau, A., Dietze, J. (Hrsg.). Waxmann, Münster, 327–344.
- [226] Müller-Christ, G., Giesenbauer, B., Tegeler, M. K. (2018). Die Umsetzung der SDGs im deutschen Bildungssystem. Studie im Auftrag des Rats für Nachhaltige Entwicklung der Bundesregierung.

- [227] Otte, A. (2022). Carbon Capture and Utilisation. Erprobung und Optimierung von Experimenten und Entwicklung eines digitalen Lernbegleiters für den Chemieunterricht. Masterthesis. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal.
- [228] Itaoka, K., Dowd, A.-M., Saito, A., Paukovic, M., Best-Waldhofer, M. de, Ashworth, P. (2013). Relating Individual Perceptions of Carbon Dioxide to Perceptions of CCS: An International Comparative Study. *Energy Procedia* **37**, 7436–7443.
- [229] Barke, H.-D. (2006). *Chemiedidaktik. Diagnose und Korrektur von Schülervorstellungen*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [230] Barke, H.-D., Harsch, G., Marohn, A., Krees, S. (2014). *Chemiedidaktik kompakt. Lernprozesse in Theorie und Praxis*, 2. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [231] Schuler, S. (2011). *Alltagstheorien zu den Ursachen und Folgen des globalen Klimawandels. Erhebung und Analyse von Schülervorstellungen aus geographiedidaktischer Perspektive*. Europäischer Univ.-Verl., Bochum.
- [232] Krabbe, C., Thelen, F., Simonds, K., Melle, I. (2022). “After all, the burnt wood no longer performs photosynthesis” – analyzing (students’) difficulties in drawing up carbon cycles with the help of videos cases. *CHEMKON* **29/S1**, 307–311.
- [233] Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2019). *Kernlehrplan für die Sekundarstufe I Gymnasium in Nordrhein-Westfalen Englisch*.
- [234] Habekost, A. V. (2005). Bilingualer Unterricht Spanisch-Deutsch im Fach Chemie. Teil III. Kompetenzzentrum. *Chimica didactica* **31; Jg. 2005/96**, 29–41.
- [235] Coyle, D., Meyer, O., Staschen-Dielmann, S. (Hrsg.) (2023). *A deeper learning companion for CLIL. Putting pluriliteracies into practice*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, New York, NY.
- [236] Tausch, M. W. (2009). Innovationen. In *Zeiten von Kerncurricula und PISA. Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* **2/58**, 35–37.
- [237] Parchmann, I. (Hrsg.) (2020). *Engaging Learners with Chemistry. Projects to Stimulate Interest and Participation*. RSC, La Vergne.
- [238] United Nations - Department of Economic and Social Affairs. Sustainable Development - The 17 Goals. Goal 13. Take urgent action to combat climate change and its impacts. <https://sdgs.un.org/goals/goal13#overview> (letzter Zugriff am 17.02.25).
- [239] CSIRO Education (2012). *Introduction to carbon capture and storage. Low-emission technology series*. Global CCS Institute - CSIRO Education, Canberra, Australia.
- [240] Geobus. *What to do with CO₂? Carbon Capture and Storage Resources*.
- [241] Hack, D., Hauschild, D. (2011). Sequestrierung von CO₂ : Eine projektorientierte Unterrichtseinheit für die Sekundarstufe I. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* **60/5**, 11–16.
- [242] Emden, M. (2019). CO₂-Sequestrierung – ein Modellexperiment zu Gegenmaßnahmen zum Klimawandel. *Naturwissenschaften im Unterricht : Chemie* **171**.
- [243] Morgan, C. T. (2012). Inspiring a generation of educators with carbon capture and storage. *Energy & Environment* **23/2/3**, 395–404.
- [244] Asherman, F., Cabot, G., Crua, C., Estel, L., Gagnepain, C., Lecerf, T., Ledoux, A., Leveneur, S., Lucereau, M., Maucorps, S., Ragot, M., Syrykh, J., Vige, M. (2016). *Designing and Demonstrating*

- a Master Student Project To Explore Carbon Dioxide Capture Technology. *Journal of Chemical Education* **93**/4, 633–638.
- [245] Pfeifer, P., Lutz, B., Bader, H. J. (Hrsg.) (2011). *Konkrete Fachdidaktik Chemie*, 3. Aufl. Oldenbourg Schulbuchverlag, München.
- [246] Reiners, C. S. (2017). *Chemie vermitteln*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [247] Sommer, K. A., Wambach-Laicher, J., Pfeifer, P. (Hrsg.) (2019). *Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht*, 2. Aufl. Aulis, Seelze.
- [248] Pfeifer, P., Risch, B. (2019). Didaktische Reduktion. In: *Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht*, 2. Aufl. Sommer, K. A., Wambach-Laicher, J., Pfeifer, P. (Hrsg.). Aulis, Seelze, 45–63.
- [249] Sommer, K. A., Steff, H., Toschka, C. (2019). Modellexperimente. In: *Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht*, 2. Aufl. Sommer, K. A., Wambach-Laicher, J., Pfeifer, P. (Hrsg.). Aulis, Seelze, 541–548.
- [250] Barth, U. (1999). Untersuchung von Trockeneis. Versuchskarteikarte. *Unterricht Chemie* **53**/10.
- [251] Akademie für Lehrerfortbildung und Personalführung (Hrsg.) (2011). *Chemie? - Aber sicher! Experimente kennen und können*, 1. Aufl.
- [252] Schmidkunz, H. (2011). *Chemische Freihandversuche. Kleine Versuche mit großer Wirkung*. Aulis, Köln, Hannover.
- [253] Zeller, D. (2021). *Kursbuch Gase und Überraschungen: Eine Lerneinheit zum Thema Versuchsvideos im Chemieunterricht*.
- [254] Schuldt, M., Habekost, A. (2014). Aminwäsche – Demonstration eines industriell bedeutsamen Verfahrens zur CO₂-Reduktion. *CHEMKON* **21**/3, 129–134.
- [255] Ahmad, M., Lowesmith, B., Koeijer, G. de, Nilsen, S., Tonda, H., Spinelli, C., Cooper, R., Clausen, S., Mendes, R., Florisson, O. (2015). COSHER joint industry project: Large scale pipeline rupture tests to study CO₂ release and dispersion. *International Journal of Greenhouse Gas Control* **37**, 340–353.
- [256] Vierschilling, J. (2020). *Erprobung von Experimenten und Entwicklung von Lehr-/Lernmaterialien zum Thema Carbon Capture and Storage für bilinguale Chemiemodule*. Bachelorthesis. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal.
- [257] Kaempfe, P., Wischnewsky, S., Eppe, M. (2012). Sprudelwasser und Sirup: eine schäumende Geschichte. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* **61**/2, 30–34.
- [258] Rubner, I., Grofe, T., Oetken, M. (2019). Speicherung erneuerbarer Energien: Power-to-Gas. *Chemie in unserer Zeit* **53**/2, 104–110.
- [259] Schmidt, D., Möller, A. (2019). Mit Mikroalgen die Welt retten? Papierbasierte Experimente zur Photosynthese. *MNU Journal* **2**, 147–153.
- [260] Messig, D., Groß, J. (2016). Die Fotosynthese verstehen: ein lernerorientierter Versuch zum Thema Pflanzenernährung im Biologieunterricht. *MNU Journal* **69**/2, 101–106.
- [261] Massa, W., Foth, H.-J. (2011). Adsorption. *Römp Lexikon*. Thieme Gruppe.
- [262] Rikus, U. (1999). Carboanhydrase - ein Enzym, viele Wirkungen. *Unterricht Biologie* **22**/238, 41–47.
- [263] Woischnik, B. (2011). Klimaschutz und CCS. Abtrennung und Speicherung von CO₂. *Zeitbild Wissen - Naturwissenschaft und Technik im Unterricht* **53**, 1–40.

- [264] Birgit Benesch-Jenker (2022). CCS - CO₂ Speicher für später. https://bne-sachsen.de/app/uploads/2020/04/CCS_final_bea.pdf (letzter Zugriff am 11.11.2022).
- [265] Sternberg, M. (2024). Klimaneutralität durch Speicherung von CO₂? <https://nachhaltigkeit-im-unterricht.de/speicherung-von-co2/> (letzter Zugriff am 20.01.25).
- [266] Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen. Entwicklung der Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife in den Naturwissenschaften. Lernaufgaben Sekundarstufe II Chemie - Carbon Capture and Storage: eine vielversprechende Strategie? https://www.iqb.hu-berlin.de/bista/UnterrichtSekII/nawi_allg/chemie/ (letzter Zugriff am 20.01.25).
- [267] Bloxsome, B., van Gent, D., Stalker, L., Ferguson, B. (2017). A Collaborative Approach to School Community Engagement with a Local CCS Project. *Energy Procedia* **114**, 7295–7309.
- [268] Olson, H. C., Bryant, t. L., Olson, J. E., Williams, I. (2013). CO₂ Injection for Geological Storage: A series of Activities for Training Professionals and Educating Students in Geological Carbon Storage. *Energy Procedia* **37**, 7257–7264.
- [269] Colliver, A., Dowd, A.-M., Rodriguez, S. (2011). Report on International Carbon Capture and Storage Education Materials. Global CCS Institute - CSIRO Education.
- [270] Dowd, A.-M., Jeanneret, I. (2013). Scope, Characteristics and Quality of Education Materials on CCS for the School Sector Around the World: Addressing and Trialing the Gaps. *Energy Procedia* **37**, 7249–7256.
- [271] Kiesling, E., Kremer, R., Pereira Vaz, N., Venzlaff, J., Bohrmann-Linde, C. (2023). Wege aus der Klimakrise – ein BNE-Schülerlaborangebot mit mehrdimensionalem Zugang. *MNU Journal* **06/76**, 464–471.
- [272] Kiesling, E., Bohrmann-Linde, C. (2024). What to do with CO₂? – Eine bilinguale Schülerlaboreinheit als Beitrag zu BNE. *Unterricht Chemie* **202/203**, 86–91.
- [273] Ball, P. (2018). Innovations and Challenges in CLIL Materials Design. *Theory Into Practice* **57/3**, 222–231.
- [274] Mehisto, P. (2012). Criteria for Producing CLIL Learning Material. *Encuentro: Revista de Investigación e Innovación en la Clase de Idiomas* **21**, 15–33.
- [275] Leisen, J. (2020). Wer genau weiß, wie digitales Lesen im Unterricht erfolgreich gelingt, schreibe es uns. Teil 1. *bbw - Lehren und Lernen im Zeitalter der Digitalisierung* **01**, 4–8.
- [276] Haß, F. H. (2006). *Fachdidaktik Englisch: Tradition, Innovation, Praxis*, 1. Aufl. Klett Sprachen, Stuttgart.
- [277] Kaub, T. (2015). A Pluriliteracies Approach to Teaching for Learning. *Rust Protection Materials for advanced learners*.
- [278] Böing, M. (2011). Comment aborder l'enseignement bilingue? Bilinguale Unterrichtsvorhaben planen und durchführen. *Der fremdsprachliche Unterricht. Französisch* **45/110**, 2–8.
- [279] Krechel, H.-L. (2010). Lern-und Arbeitstechniken im bilingualen Sachfachunterricht. In: *Bilingualer Sachfachunterricht in der Sekundarstufe. Eine Einführung*. Doff, S. (Hrsg.). Narr, Tübingen, 154–168.
- [280] Brenner, G. (2010). *Fundgrube Methoden II. Für Deutsch und Fremdsprachen*, 3. Aufl. Cornelsen Scriptor, Berlin.
- [281] Kaub, T. (2015). A Pluriliteracies Approach to Teaching for Learning. *Iron production and rust removal for intermediate learners*.

- [282] Huwer, J., Brünken, R. (2018). Naturwissenschaften auf neuen Wegen: Individualisierung mit Tablets im Chemieunterricht. *Computer + Unterricht* **30/110**, 7–10.
- [283] Medienberatung NRW (2020). Medienkompetenzrahmen NRW.
- [284] Posch, P., Altrichter, H., Spann, H. (2018). Lehrerinnen und Lehrer erforschen ihren Unterricht. Unterrichtsentwicklung und Unterrichtsevaluation durch Aktionsforschung, 5. Aufl. Verlag Julius Klinkhardt, UTB GmbH.
- [285] Eilks, I. (2018). Action Research in Science Education: A twenty-year personal perspective. *ARISE* **1/1**, 3–14.
- [286] Meyer, I. (2021). Bilingualer Chemie-Unterricht auf Distanz - Erprobung und Kurzevaluation von innovativen Lehr-Lernmaterialien zum Kohlenstoffkreislauf unter besonderer Berücksichtigung von zwei Sprachwechsellmethoden (translanguaging, code-mixing). Bericht zum Praxissemester. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal.
- [287] Linkwitz, M., Belova, N., Eilks, I. (2021). Teaching about green and sustainable chemistry already in lower secondary chemistry education? – The project “Cosmetics go green”. *CHEMKON* **28/4**, 155–161.
- [288] Knorr, P., Schramm, K. (2016). Triangulation. In: Forschungsmethoden in der Fremdsprachendidaktik. Ein Handbuch, 1. Aufl. Caspari, D., Klippel, F., Legutke, M. K., Schramm, K. (Hrsg.). Narr Francke Attempto Verlag, Tübingen, 90–97.
- [289] Kuckartz, U. (2014). Mixed Methods. Methodologie, Forschungsdesigns und Analyseverfahren. Springer VS, Wiesbaden.
- [290] Reinhardt, S. (2012). Das Zusammenspiel von quantitativer und qualitativer Forschung, 231–238.
- [291] Eilks, I., Markic, S. (2007). Kooperatives Lernen im Chemieunterricht. Konzipierung und Untersuchung von Unterrichtseinheiten durch Partizipative Aktionsforschung. In: Kooperatives und selbstständiges Arbeiten von Schülern. Zur Qualitätsentwicklung von Unterricht, 1. Aufl. Rabenstein, K. (Hrsg.). VS Verl. für Sozialwiss, Wiesbaden, S. 209-230.
- [292] Helmke, A. (2021). Unterrichtsqualität und Lehrerprofessionalität. Diagnose, Evaluation und Verbesserung des Unterrichts, 8. Aufl. Klett / Kallmeyer, Hannover.
- [293] Becker, G. E. (2007). Unterricht auswerten und beurteilen. Handlungsorientierte Didaktik, Teil III. Beltz, Weinheim.
- [294] Ziebell, B., Schmidjell, A. (2012). Unterrichtsbeobachtung und kollegiale Beratung. Langenscheidt, Berlin.
- [295] Zeller, D. (2020). Didaktische Erschließung von Titandioxid für den Chemieunterricht - Entwicklung und Optimierung von Experimenten, didaktischen Konzepten und Medien. Dissertation.
- [296] Bergische Universität Wuppertal (2023). Evaluation SommerUni 2023. In Naturwissenschaften und Technik für Schülerinnen ab Klasse 10, Wuppertal.
- [297] Bergische Universität Wuppertal (2024). Evaluation SommerUni 2024. In Naturwissenschaften und Technik für Schülerinnen ab Klasse 10, Wuppertal.
- [298] Grotjahn, R. (2002). Konstruktion und Einsatz von C-Test: Ein Leitfaden für die Praxis. In: Der C-Test. Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen. Grotjahn, R. (Hrsg.). Brockmeyer, Bochum, 211–225.

- [299] Bauer, Rupprecht S., Goggin, M. (2017). Sprachstandsmessung und Sprachförderung mit dem C-Test. In: Deutsch als Zweitsprache, 4. Aufl. Ahrenholz, B., Oomen-Welke, I., Ulrich, W. (Hrsg.). Schneider Verlag Hohengehren, Baltmannsweiler, 560–574.
- [300] Emden, M., Özcan, N., Sumfleth, E. (2015). Diagnose und Förderung fachsprachlicher Fähigkeiten. In: Chemieunterricht im Zeichen von Diagnostik und Förderung, 1. Aufl. Emden, M., Koenen, J., Sumfleth, E. (Hrsg.). Waxmann, Münster, New York, 29–39.
- [301] Özcan, N. (2013). Zum Einfluss der Fachsprache auf die Leistung im Fach Chemie. Eine Förderstudie zur Fachsprache Im Chemieunterricht. Logos Verlag Berlin, Berlin.
- [302] Stadler, M. (2020). Non scholae, sed vitae discimus: zur Erfassung von Wissen und Kompetenzen im Schülerlabor. In: Handbuch Forschen im Schülerlabor. Theoretische Grundlagen, empirische Forschungsmethoden und aktuelle Anwendungsgebiete. Sommer, K. A., Wirth, J., Vanderbeke, M. (Hrsg.), 119–126.
- [303] Hülnden, F. V. (2014). Sachfachlicher Lernerfolg und sprachlicher Zugewinn im Bilingualen Unterricht. Eine empirische Untersuchung im Rahmen eines bilingualen Moduls im Fach Chemie. Fremdsprachen lehren und lernen **43**; Jg. **2014**/1, 109–125.
- [304] Bauer, R. S., Spettmann, M. (2012). Screening- Diagnose - Förderung: Der C-Test im Bereich DaZ. In: Deutsch als Zweitsprache. Voraussetzungen und Konzepte für die Förderung von Kindern und Jugendlichen mit Migrationshintergrund, 1. Aufl. Ahrenholz, B. (Hrsg.). Fillibach bei Klett, Stuttgart, 95–110.
- [305] CDU, CSU, SPD (2025). Verantwortung für Deutschland: Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 21. Legislaturperiode des Deutschen Bundestages, Berlin.
- [306] Mauch, J., Rubner, I. (2024). "Catch the CO₂ " – Carbon dioxide absorption in a school experiment as an example for gas absorption experiments in the classroom. CHEMKON.
- [307] Linthorst, J. A., van der Wal-Veuger, J. (2018). Demonstrating CO₂ Sequestration Using Olivine and Carbonated Beverages with Secondary School Students To Investigate pH and Electrical Conductivity Concepts. J. Chem. Educ. **95**/9, 1612–1614.
- [308] Spitzer, P. (2025). Transforming Carbon Dioxide into Rocks!? Experiments for Understanding Carbon Dioxide Removal through Chemical Weathering. J. Chem. Educ.
- [309] Zell, L., Nick, J., Quarthal, D., Oetken, M., Friedrich, J. (2025). Sustainable steel production: a question of the reducing agent. CHEMKON **32**/4, 140–143.
- [310] Holst, J., Singer-Brodowski, M., Brock, A., Haan, G. de (2024). Monitoring SDG 4.7: Assessing Education for Sustainable Development in policies, curricula, training of educators and student assessment (input-indicator). Sustainable Development **32**/4, 3908–3923.

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1. Modell der planetaren Belastungsgrenzen 2009-2023
- Abbildung 2. Anthropogene Treibhausgasemissionen 1850-2019
- Abbildung 3. Global Carbon Budget 2023
- Abbildung 4. Ambitions- bzw. Emissionslücke, um das 1,5 Grad- Ziel bis 2030 zu erreichen
- Abbildung 5. Technologieoptionen zum Management von Kohlenstoffdioxid-Emissionen
- Abbildung 6. Schwerpunkte des Dissertationsprojektes
- Abbildung 7. Elemente der CCS-Prozesskette
- Abbildung 8. Globale CO₂-Emissionen der Energiewirtschaft und Industrie 2019-2050
- Abbildung 9. Energiebedingte Treibhausgas-Emissionen von 1990-2021.
- Abbildung 10. Übersicht einer Auswahl industriell etablierter Methoden der Kohlenstoffdioxid-Abtrennung.
- Abbildung 11. Übersicht der verschiedenen Abtrennverfahren
- Abbildung 12. Prozessschema eines IGCC-Kraftwerks mit einer Pre-Combustion Anlage
- Abbildung 13. Prozessschema eines Oxyfuel-Kraftwerks
- Abbildung 14. Vereinfachte Darstellung der Funktionsweise der Chemical-looping Combustion
- Abbildung 15. Prozessschema eines Kraftwerks mit Post-Combustion Anlage mit chemischer Absorption
- Abbildung 16. Übersicht mögliche Prozessketten Roheisen- und Rohstahlerzeugung
- Abbildung 17. Schema des Hochofens zur Eisenerzeugung aus Eisenerz
- Abbildung 18. Hochofenprozessanlage mit Gichtgasreinigung
- Abbildung 19. Fraktionierte Destillation von Rohöl mit Vakuum-Destillation
- Abbildung 20. Schematische Darstellung des FCC-Verfahrens
- Abbildung 21. Exemplarischer Anschluss der CCS-Prozesskette an einen FCC-Reaktor.
- Abbildung 22. Vereinfachte Zementherstellung
- Abbildung 23. Post-Combustion Anlage in einem Zementwerk
- Abbildung 24. Exemplarische Calcium-Looping Integration innerhalb einer Zementproduktionsanlage
- Abbildung 25. Zementanlage mit Oxyfuel-Technologie
- Abbildung 26. Diagramm Ammoniakgleichgewicht Druck und Temperaturabhängigkeit
- Abbildung 27. Übersicht S-DAC und L-DAC-Verfahren
- Abbildung 28. Rauchgas-Zusammensetzungen bei Pre-, Post- und Oxyfuel-Combustion Verfahren
- Abbildung 29. Übersicht der Abscheidetechnologien mit Prozessbezeichnungen und Beispielen
- Abbildung 30. (von links nach rechts) Monoethanolamin (MEA), Diethanolamin (DEA) und N- Methyl-diethanolamin (MDEA)
- Abbildung 31. Reaktionsschema zur chemischen Absorption von a) primären und sekundären und b) tertiären aminhaltigen Lösemitteln
- Abbildung 32. Sterisch gehinderte Amine: (links) AMP, (rechts) 2-Piperidinethanol.
- Abbildung 33. Strukturausschnitt eines linearen PEI
- Abbildung 34: Struktur MIL-101
- Abbildung 35: Grundstruktur Zeolith
- Abbildung 36. Anwendungsgebiete für Mikroalgen
- Abbildung 37. (links) Schema eines offenen PBR, (rechts) Foto eines offene PBR
- Abbildung 38. (links) geschlossener Röhrenreaktor in Wolfsburg (D), (rechts) geschlossener Plastikbeutelreaktor in Florida (USA)
- Abbildung 39. Calvin-Zyklus
- Abbildung 40. Anschluss einer Kohlenstoffdioxid-Abscheidung mit Mikroalgen im geschlossenen PBR an bestehende Kraftwerke
- Abbildung 41. Phasendiagramm Kohlenstoffdioxid
- Abbildung 42. Druck-Volumen Isothermen bei verschiedenen Temperaturen für reales Gas CO₂
- Abbildung 43. (links) angekündigte Infrastrukturprojekte im Zusammengang mit CCS, (rechts) mögliches europaweites Pipeline-Netzwerk
- Abbildung 44. Offshore Pipeline- und Schifftransport im Vergleich
- Abbildung 45. Volumen von Kohlenstoffdioxid in Abhängigkeit von der Einlagerungstiefe

Abbildung 46. Dünnschliffaufnahme Porenraum Sandstein

Abbildung 47. Injektionsmöglichkeiten eines Porenspeichers

Abbildung 48. Übersicht der geologischen Speicherarten

Abbildung 49. CO₂-Speicherung in einem salinen Aquifer

Abbildung 50. Prozessschema des Enhanced Oil Recovery (EOR)- Verfahrens

Abbildung 51. Globale Kapazitäten von CO₂-EOR (blau) und Emissionsreduktionsziele (rot)

Abbildung 52. Prozessschema des CarbFix-Projektes in Island

Abbildung 53. Funktionsweise einer CO₂-ECBM-Anlage

Abbildung 54. Übersicht der auftretenden Rückhalte Mechanismen

Abbildung 55. Rückhalte Mechanismen und Speichersicherheit

Abbildung 56. Geschätzte, weltweite Speicherkapazitäten aufgeschlüsselt nach Regionen

Abbildung 57. Speicherprojekte im Nordseeraum

Abbildung 58. Speichermöglichkeiten in Aquiferen on- und offshore in Deutschland

Abbildung 59. Abscheidekapazität [Mt CO₂/Jahr] der geplanten und in Entwicklung befindlichen CCS-Projekte

Abbildung 60. Geplante EU-CO₂-Capture-Strategien, Emissionen und Abscheideraten in den Jahren 2030-2050

Abbildung 61. Speicherbedarf und -potential durch geplante CCS-Projekte bis 2050

Abbildung 62. Einige Abwägungen für und gegen die Implementation von CCS

Abbildung 63. Zusammenfassung Dimensionen von CCS

Abbildung 64. Übersicht Carbon Management Technologien

Abbildung 65. 4Cs Framework

Abbildung 66. Pluriliteracies Modell

Abbildung 67. The Language Triptych

Abbildung 68. The Bilingual Triangle

Abbildung 69. Alltags- und Bildungssprache

Abbildung 70. Scaffolding und CLIL

Abbildung 71. Integrated Dynamic Model (IDM) des mentalen Lexikons bilingualer Lernender

Abbildung 72. Beispiele methodischer Gestaltung von Sprachwechseln nach Unterrichtsphase

Abbildung 73. Übersicht der Verbreitung von Bilinguaalem Chemieunterricht in Deutschland (grüne Einfärbung)

Abbildung 74. Modell chemischer Kompetenz

Abbildung 75. Bilingual Triangle erweitert durch Bohrmann-Linde

Abbildung 76. Johnstone-Dreieck mit Anpassungen von Bohrmann-Linde.

Abbildung 77. Modell der vier Dimensionen der Authentizität

Abbildung 78. Lehrwerkseite zu CCS aus Blickpunkt Chemie Gesamtband Sekundarstufe I

Abbildung 79. Lehrwerkseiten Sekundarstufe II zu CCS: (links) Elemente Chemie, (rechts) Chemie Qualifikationsphase

Abbildung 80. Englische Lehrwerkseiten zu CCS: (links) Chemistry for you, (rechts) Nelson Chemistry

Abbildung 81. Sustainable Development Goals (SDGs)

Abbildung 82. Leitbild der nachhaltigen Entwicklung

Abbildung 83. BNE in der Unterrichtsentwicklung

Abbildung 84. Dimensionen-Modell nachhaltiger Entwicklung

Abbildung 85. Ansätze zur Einbindung von BNE in den Chemieunterricht

Abbildung 86. Verlaufsplan BNE-geeigneter Themen für den Chemieunterricht der SII

Abbildung 87. Gegenüberstellung problemlösungsorientierter und lösungsorientierter Unterrichtsansatz

Abbildung 88. WordCloud der Probandengruppe Studierende vom 12.01.2021 (n=86)

Abbildung 89. Auszug aus der Mentimeter-Erhebung M.A. Otte (links Prä, rechts Post)

Abbildung 90. Antizipierte sprachliche Anforderungen nach dem The Language Triptych

Abbildung 91. Beispiel einer Tandembogenaufgabe (links) PartnerIn A-Aufgabenstellung, (rechts) PartnerIn B - Antwort

Abbildung 92. (links) Focus on Language I, (rechts) Focus on Language II

Abbildung 93. Einblick in die Lehrkräftehandreichung des Vorbereitungsmoduls

Abbildung 94. CLIL mind map für das Schülerlaborangebot

Abbildung 95. Planungsraster für das kompetenzorientierte Unterrichtsvorhaben „What to do with CO₂?“

Abbildung 96. Curriculare Innovationsforschung

Abbildung 97. Grundstruktur einer konstruktivistischen Lernschleife

Abbildung 98. Entwicklung der inhaltlichen Module der Schülerlaborsequenz

Abbildung 99. Entwicklung des Einsatzes der Sprachwechsel der Schülerlaborsequenz

Abbildung 100. Lernschleife zu Station 2 Carbon Storage mit deutsch- und englischsprachigen Elementen

Abbildung 101. SDGs 7, 9 und 13

Abbildung 102. Struktur der Schülerlaboreinheit

Abbildung 103. Übersicht der optionalen Stationen des Schülerlaborangebots

Abbildung 104. Kriterien zur Auswahl von Experimenten

Abbildung 105. Beobachtungen während des Versuchs

Abbildung 106. Gestufte Hilfekarte für den Versuch Verbrennung von Kohle

Abbildung 107. Farbigkeit des Indikators Bromthymolblau bei verschiedenen pH-Werten

Abbildung 108. (links) zu beschriftender Versuchsaufbau, (rechts) Auswertungsfragen mit Selbstkorrektur

Abbildung 109. (links) gestufte Hilfekarte mit Word Bank, (rechts) Infotext mit Visualisierung

Abbildung 110. (links) bebilderte Versuchsanleitung, (rechts) Formulierungshilfen für die Auswertungsfragen

Abbildung 111. Nutzung Zwei-Wege-Hähne

Abbildung 112. (links) Auswertungsfragen mit Formulierungshilfen, (rechts) „Questions answered“-Infokarte

Abbildung 113. (von links nach rechts) Versuchsbeobachtungen in Reagenzglas I-III

Abbildung 114. Aufgabe zum Sprachwechsel im digitalen Lernbegleiter

Abbildung 115. Auszug aus dem Lernbegleiter zur Auswertung des Versuchs

Abbildung 116. CO₂-Konzentration [ppm] im Wasser pro Zeit [min]-Diagramm bei 25 Minuten Bestrahlung

Abbildung 117. CO₂-Konzentration [ppm] im Wasser pro Zeit [min]-Diagramm nach Zugabe von 100 mL Kohlenstoffdioxid

Abbildung 118. Expert Card für Station 2 – Carbon Storage

Abbildung 119. Exemplarische grafische Darstellungsformen aus den Lernmaterialien

Abbildung 120. Lernvideo aus Station 2 mit Aufgaben zum Detailverstehen

Abbildung 121. Beispiele für Audiotexte: (links) Stationszusammenfassung, (rechts) Glossareintrag

Abbildung 122. Beispiele für inhaltliches Scaffolding: (links) Informationskarte, (rechts) Sprinteraufgabe

Abbildung 123. Beispielseite mit sprachlichen Hilfen am rechten Textrand

Abbildung 124. Beispielseite mit Fachtext und Lesetechniken

Abbildung 125. Beispiele zur Unterstützung der schriftlichen Textproduktion: (links) Einsatz einer WordBank, (rechts) Einsatz von Formulierungshilfen

Abbildung 126. Beispiele zur Unterstützung der Kompetenz des zusammenhängenden Sprechens: (links) mit Redemitteln, (rechts) mit Fachinhalten für die Präsentation

Abbildung 127. Beispiele für grafisch-visuelles Scaffolding: (links) mit vorstrukturierter Beobachtungstabelle, (rechts) mit grafischen Darstellungsformen zur Illustrierung von Fachinhalten

Abbildung 128. Beispiel für eine bebilderte Versuchsanleitung

Abbildung 129. (links) Selbsteinschätzung Vorbereitungsmodul, (rechts) Research Plan für Station 3

Abbildung 130. Aufgabenstellung mit Alltagsbezug am Ende der Intervention

Abbildung 131. Arbeitsmaterial mit Kodierung zur ökologischen und ökonomischen Dimension

Abbildung 132. Arbeitsauftrag zur Formulierung der Handlungsoptionen

Abbildung 133. (links) Auszug aus Mediationstext, (rechts) Aufgabenstellung für Mediationsaufgabe

Abbildung 134. spielerische Worträtsel: (links) Wordsearch, (rechts) exemplarische Taboo-Spielkarten

Abbildung 135. E-Book Entwurf (links) in Book Creator und (rechts) in Pages

Abbildung 136. E-Book Entwurf (links) in Pages und (rechts) in Keynote

Abbildung 137. E-Book geöffnet auf dem Ipad in der App Documents

Abbildung 138. Erste Iconvorschläge

Abbildung 139. Verschiedene Layoutideen für das E-Book

Abbildung 140. Finales Layout des E-Books

Abbildung 141. Research Plan der Station 2

Abbildung 142. BookWidgets Anwendung Kreuzworträtsel

Abbildung 143. Zyklen der partizipativen Aktionsforschung

Abbildung 144. Forschungsmodell der partizipativen Aktionsforschung

Abbildung 145. Übersicht der Iterationszyklen des Dissertationsprojektes

Abbildung 146. Impressionen aus den Gruppen A und B der SommerUni 2022

Abbildung 147. Erhebungsinstrumente der Triangulation in der SommerUni 2022

Abbildung 148. Ausschnitt aus dem eingesetzten Beobachtungsbogen

Abbildung 149. Ausschnitt aus dem eingesetzten Pre-S-Fragebogen

Abbildung 150. (links) Aufbau einer Experimentier- und Materialstation, (rechts) Lehrkräfte beim Experimentieren

Abbildung 151. Mentimeter-Einstiegsbeispiele 2023 und 2024

Abbildung 152. Optische Adaptionen Arbeitsmaterial Station 1 links 2022, rechts 2023

Abbildung 153. Arbeitsmaterial Station 1 Version 2024 als DLB

Abbildung 154. Laborpraktische Hilfen (links Parafilm, rechts Umgang mit Spritzentechnik)

Abbildung 155. Impressionen aus der SommerUni 2023 (oben) und 2024 (unten)

Abbildung 156. Erhebungsinstrumente der Triangulation in der SommerUni 2023 und 2024

Abbildung 157. Lernprodukte zweier Gruppen zum Versuchsvideo der Station 4 (2023)

Abbildung 158. Interaktive Lernlandkarte im E-Book für die SommerUni-Kurse ab 2025

Abbildung 159. Lehrkräfte beim Experimentieren am 15.11.2023

Abbildung 160. Erhebungsinstrumente des dritten Iterationszyklus

Abbildung 161. Auszug aus dem CLIL-Beobachtungsbogen Teil 1

Abbildung 162. Auszug aus dem CLIL-Beobachtungsbogen Teil 2

Abbildung 163. Einblick in einen deutschen C-Test zum Schülerlaborangebot

Abbildung 164. Exemplarische Fragen aus dem Wissenstest

Abbildung 165. Impressionen aus der Erprobung mit Studierenden

Abbildung 166. Ergebnisse Wissenstest Studierende

Abbildung 167. Auswertung C-Test Text 1 Studierendenkohorte

Abbildung 168. Auswertung C-Test 2 Studierendenkohorte

Abbildung 169. Auswertung C-Test Text 3 Studierendenkohorte

Abbildung 170. Auswertung C-Test Text 4 Studierendenkohorte

Abbildung 171. Impressionen aus der Erprobung mit dem Q2-Kurs

Abbildung 172. Ergebnisse des Prä-/Post-Wissenstest der Q2-Kohorte

Abbildung 173. C-Test Ergebnisse des Textes 1 (deutsch) der Q2-Kohorte

Abbildung 174. C-Test Ergebnisse des Textes 2 (deutsch) der Q2-Kohorte

Abbildung 175. C-Test Ergebnisse Text 3 (englisch) der Q2-Kohorte

Abbildung 176. C-Test Ergebnisse Text 4 (englisch) der Q2-Kohorte

Abbildung 177. Impressionen aus den Erprobungen vom 09.04. und 28.05.25.

Abbildung 178. S-Antworten Wissenstest in Prozent

Abbildung 179. C-Test-Ergebnisse Text 1 EF-Kohorten

Abbildung 180. C-Test-Ergebnisse Text 2 EF-Kohorten

Abbildung 181. C-Test Ergebnisse Text 3 EF-Kohorten

Abbildung 182. C-Test Ergebnisse Text 4 EF-Kohorten

Abbildung 183. Ergebnisse S-Item 15 beantwortet von allen EF-Kohorten

Abbildung 184. Ergebnisse S-Item 16 beantwortet von allen EF-Kohorten

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Übersicht einiger Industriebranchen mit Abscheideoptionen und Entwicklungsständen
Tabelle 2. Gegenüberstellung zentraler Merkmale der S-DAC und L-DAC-Technologie
Tabelle 3. Übersicht der verschiedenen Capture Technologien
Tabelle 4. Ausgewählte Lösemittel für das Absorptionsverfahren
Tabelle 5. Ausgewählte Adsorptionsmittel für chemische und physikalische Adsorptionsverfahren
Tabelle 6. Ausgewählte Abscheidetechnologien im Vergleich
Tabelle 7. Übersicht Entwicklungsstadien Abscheidetechnologien mit Sequestrierungsverfahren
Tabelle 8. Verunreinigung in Gasströmen nach Abtrennungsverfahren
Tabelle 9. Übersicht CO ₂ -Pipelinenetze weltweit
Tabelle 10. Gegenüberstellung Transportmethoden
Tabelle 11. Geschätzte Speicherkapazitäten nach Speicherart
Tabelle 12. Übersicht Speicherstätten und mögliche Kosten
Tabelle 13. Funktionen von Sprachwechseln im BU
Tabelle 14. Verbreitung von bilingualen Unterrichtsangeboten
Tabelle 15. Übersicht der ausgewählten deutschen Schulbücher
Tabelle 16. Übersicht der ausgewählten englischen Schulbücher
Tabelle 17. Befragungen von Schüler- und Studentengruppen mit dem Umfragetool Mentimeter
Tabelle 18. Übersicht der Kategorisierung der Begrifflichkeiten der verschiedenen Probandengruppen
Tabelle 19. Prozentuale Gewichtung von Emissionsreduktionsstrategien
Tabelle 20. Übersicht sprachliche Strukturen für den BCU
Tabelle 21. Strategien der CLIL-Stundenplanung in der Schülerlaborsequenz nach Krebs
Tabelle 22. Übersicht der Maßnahmen der didaktischen Reduktion
Tabelle 23. Chemiedidaktische Auswahlkriterien für Experimente
Tabelle 24. Experimente für das Vorbereitungsmodul
Tabelle 25. Experimente zum Themenbereich Carbon Capture
Tabelle 26. Experimente zum Themenbereich Carbon Transport
Tabelle 27. Experimente zum Themenbereich Carbon Storage
Tabelle 28. Experimente zum Themenbereich Carbon Utilisation
Tabelle 29. Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser bei verschiedenen Temperaturen
Tabelle 30. Übersicht der ausgewählten Versuche für den Schülerlabor-Kurs „What to do with CO ₂ ?“
Tabelle 31. Übersicht der entwickelten Materialien im Verlauf des Dissertationsprojekts
Tabelle 32. Kriterien zur Materialentwicklung in bilingualen Lernsettings
Tabelle 33. Auswahl einiger analoger und digitaler Texte im Schülerlaborangebot
Tabelle 34. Ausgewählte Scaffolding-Maßnahmen des Schülerlabors
Tabelle 35. Übersicht der funktionalen Sprachwechsel im Schülerlaborangebot
Tabelle 36. Überblick aller Erprobungen innerhalb des Dissertationsprojektes
Tabelle 37. Übersicht der Pilotierungen zur Machbarkeit
Tabelle 38. Ablauf des SommerUni-Kurses 2022
Tabelle 39. Übersicht der SommerUni Stationsarbeit
Tabelle 40. Ausgewählte Beobachter- und Schülerinnen-Items zu sprachlicher Angemessenheit
Tabelle 41. Ausgewählte Beobachter- und Schülerinnen-Items zu Experimenten und Materialgestaltung
Tabelle 42. Beobachter-Items zur Bilanzierung der sprachlichen Elemente
Tabelle 43. Beobachter-Items zur Bilanzierung der Experimente
Tabelle 44. Übersicht der Stationen in der SommerUni 2023 und 2024
Tabelle 45. Übersicht des Kursablaufs für die SommerUni 2023 und 2024
Tabelle 46. Übersicht der implementierten Differenzierungsmaßnahmen
Tabelle 47. Übersicht der Kohorten der SommerUni-Angebote 2023 und 2024
Tabelle 48. Ausgewählte Items der Station 3 aus Schülerinnen und Beobachtendenperspektive
Tabelle 49. Bilanzierung Station 3 aus Beobachtendenperspektive
Tabelle 50. Ausgewählte Items der Station 4 aus Schülerinnen und Beobachtendenperspektive

Tabelle 51. Einsatz des Videos und Bilanzierung Station 4 aus Beobachtendenperspektive
 Tabelle 52. Ausgewählte Items der Station 5 aus Schülerinnen und Beobachtendenperspektive
 Tabelle 53. Einsatz Versuchsvideo und Bilanzierung Station 5 aus Beobachtendenperspektive
 Tabelle 54. Schülerinnenrückmeldungen zur Materialgestaltung der Stationen
 Tabelle 55. Übersicht der Materialien für das Fortbildungsangebot am 15.11.23
 Tabelle 56. Einsatzbereiche des Themas CCS (Mehrfachnennungen waren möglich)
 Tabelle 57. Bearbeitete Stationen und Rückmeldungen der Lehrkräfte
 Tabelle 58. Rückmeldungen zu weiteren Stationen der Fortbildung vom 15.11.23
 Tabelle 59. Zeitlicher Ablauf der Erhebung
 Tabelle 60. Ausgewählte Items des CLIL-Beobachtungsbogen Teil 1
 Tabelle 61. Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen Teil 2 für Station 2
 Tabelle 62. Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen Teil 2 für Station 3
 Tabelle 63. Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen Teil 2 für Station 1
 Tabelle 64. Übersicht der untersuchten EF-Kohorten
 Tabelle 65. Kohorte 09.04.2025- Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen für Station 3
 Tabelle 66. Kohorte 12.05.2025- Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen für Station 3
 Tabelle 67. Kohorte 12.05.2025- Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen für Station 2
 Tabelle 68. Kohorte 28.05.2025- Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen für Station 1
 Tabelle 69. Kohorte 28.05.2025- Ausgewählte Items aus dem CLIL-Beobachtungsbogen für Station 3
 Tabelle 70. Freitextantworten zum Laborangebot „What to do with CO₂?“

Digitaler Anhang

Die Dokumente finden sich unter folgendem Link:

<https://uni-wuppertal.sciebo.de/s/MmvQDduMMLmmkHF>



1) tabellarische Kernlehrplananalyse

2) Gefährdungsbeurteilungen

- Station 1: Direct Air Capture
- Station 1: Post-Combustion Capture
- Station 2: CCS – Geologische Speicherung
- Station 2: CCS - Desorption von Kohlenstoffdioxid
- Station 2: CCS – Kalkwassernachweis
- Optional 4: Kohlenstoffdioxid-Kohlensäure-Gleichgewicht

3) 2021_BNE Umfrage „Uni fragt Schule [...]“

4) 2022_Erster Iterationszyklus

- MINT Tag NRW Bottrop 2022
 - CCS Arbeitsmaterial
 - CCS bilinguales Arbeitsmaterial
 - Lehrkräfte Fragebogen
- SommerUni 2022
 - Erhebungsinstrumente
 - Stationsarbeit
 - Powerpoint-Präsentation zum Lernangebot

5) 2023-2024_Zweiter Iterationszyklus

- Lehrkräftefortbildungen
 - Erhebungsinstrumente
 - Materialien
 - Powerpoint-Präsentation Fortbildung CCS
 - Powerpoint-Präsentation Fortbildung Wege aus der Klimakrise
- SommerUni 2023-2024
 - Arbeitsmaterialien für die Lernenden
 - Erhebungsinstrumente
 - Powerpoint-Präsentationen zum Lernangebot
- E-Book für SommerUni ab 2025

6) 2024-2025_Dritter Iterationszyklus

- Erhebungsinstrumente
- Digitale E-Books
- Powerpoint-Präsentation zum Lernangebot

7) Weitere Materialien

- BNE-Unterrichtssequenz: Klimawirksamkeit von Kohlenstoffdioxid
- BNE-Schülerlabor: Wege aus der Klimakrise
- Gedankenexperiment Pipelineunfall
- Versuchsvideos

Publikationen

- [1] Venzlaff, Julian; Kiesling, Elisabeth; Bohrmann-Linde, Claudia *BNE und Chemieunterricht - BNE als roter Faden durch die Schulchemie und Beispiel einer Lerneinheit zur Klimawirksamkeit von Kohlenstoffdioxid*. CHEMKON, 2021, <https://doi/10.1002/ckon.202100039> .
- [2] Kiesling, Elisabeth; Venzlaff, Julian; Bohrmann-Linde, Claudia. *BNE im Chemieunterricht – von der Leitlinie BNE NRW zur exemplarischen Unterrichtseinbindung*. CHEMKON, **29** (S1): 239-245, Juni 2022. <https://doi/10.1002/ckon.202200002>.
- [3] Bohrmann-Linde, Claudia; Gökkus, Yasemin; Humbert, Ludger; Kiesling, Elisabeth; Kremer, Richard; Losch, Daniel; Schmitz, Denise; Zeller, Diana. *Analyse, Struktur und Darstellung chemiedidaktischer Elemente aus informatischer Perspektive – Entwicklung eines interdisziplinären Lehrkonzeptes*. MNU-Journal, 05.2022: 423-429, September 2022.
- [4] Kiesling, Elisabeth; Kremer, Richard; Pereira Vaz, Nuno; Venzlaff, Julian; Bohrmann-Linde, Claudia *Wege aus der Klimakrise – ein BNE-Schülerlaborangebot mit mehrdimensionalem Zugang*. MNU Journal, 76 (06/2023): 464 – 471, November 2023.
- [5] Kiesling, Elisabeth; Venzlaff, Julian; Bohrmann-Linde, Claudia. *BNE-Fortbildungsreihe für Lehrkräfte und Studierende in der Didaktik der Chemie*. In: Newsletter Lehrer*innenbildung an der Bergischen Universität Wuppertal. Herausgeber: Gemeinsamer Studienausschuss (GSA) in der School of Education an der Bergischen Universität Wuppertal, Juli 2024.
- [6] Kiesling, Elisabeth; Bohrmann-Linde, Claudia *What to do with CO₂? – Eine bilinguale Schülerlaboreinheit als Beitrag zu BNE*. Naturwissenschaften im Unterricht Chemie, **202/203**: 86-91, September 2024.
- [7] Gökkus, Yasemin; Gutenberg, Janna; Kiesling, Elisabeth; Kremer, Richard; Wernicke, Anne; Bohrmann-Linde, Claudia. *Sprachsensibler Chemieunterricht digital umgesetzt – Ein Seminarexkurs im Rahmen des Praxissemesters*. DiMawe – Zeitschrift für Konzepte und Arbeitsmaterialien für Lehrer*innenbildung und Unterricht, 6 (1), September 2024. <https://doi.org/10.11576/dimawe-7393>.
- [8] Bohrmann-Linde, Claudia; Kiesling, Elisabeth; Brunnert, Rainer; Strippel, C.; Landau, R.; Geller, Heidrun. *Bilingual Chemistry*. Herausgeber: Claudia Bohrmann-Linde, Rainer Brunnert, Elisabeth Kiesling. Band 1, Bergische Universität Wuppertal, November 2024. <https://doi/10.25926/BUW/0-344> .
- [9] Kiesling, Elisabeth; Bohrmann-Linde, Claudia. *Carbon Capture and Storage - Nachweis von adsorbiertem Kohlenstoffdioxid*. Naturwissenschaften im Unterricht Chemie, 1/25: Versuchskarteikarte, Februar 2025.
- [10] Kiesling, Elisabeth. *Arbeitsblatt: 2.4 Carbon Capture and Storage und Experiment: 2.5 Modellversuch zur Speicherung von Kohlenstoffdioxid in Kohleflözen*. Herausgeber: Dr. Karl Hübner, Prof. Dr. Bernd Ralle. In: Unterrichtsmaterial Kreislaufwirtschaft - Den Kreislauf in Schwung bringen. Fonds der Chemischen Industrie im Verband der Chemischen Industrie e. V. (FCI), April 2025.
- [11] Kiesling, Elisabeth; Bohrmann-Linde, Claudia. *Von der Leitlinie BNE zum bilingual-englischen Schülerlabor- Konzeption, Erprobung und Evaluation einer bilingualen Experimentierumgebung im Fach Chemie zum Thema Carbon Capture and Storage*. Herausgeber: Andreas Keil, Annika Hanau und Julian Dietze. In: BNE in der Lehrkräftebildung. Erkenntnisse aus Forschung und Praxis., 327-344, Waxmann Verlag, Mai 2025.

Posterbeiträge zu Tagungen

- Kiesling, Elisabeth; Laufer, Judith; Bohrmann-Linde, Claudia: *"Einsatz eines interaktiven E-Books für einen bilingualen Experimentierkurs zum Thema Kohlenstoffdioxid"*, 17. Europäischer Chemielehrer*innenkongress VCÖ, Graz 2025.
- Kiesling, Elisabeth; Venzlaff, Julian; Bohrmann-Linde, Claudia: *"Wege aus der Klimakrise - Eine Schülerlaboreinheit zu BNE im Chemieunterricht"*, GDCh Wissenschaftsforum (WiFo) - Rethinking Chemistry, Leipzig September 2023.
- Kiesling, Elisabeth; Bohrmann-Linde, Claudia: *"Carbon Capture Utilisation and Storage - Eine bilinguale Schülerlaboreinheit als Beitrag zu BNE"*, 37. Fortbildungs- und Vortragstagung der GDCh FG Chemieunterricht, September 2021.
- Kiesling, Elisabeth; Venzlaff, Julian; Bohrmann-Linde, Claudia: *"BNE im Chemieunterricht – Von der Leitlinie BNE NRW zur exemplarischen Unterrichtseinbindung"*, 37. Fortbildungs- und Vortragstagung der GDCh FG Chemieunterricht, September 2021. *Ausgewählt für einen Kurzvortrag als Spitzenposter und prämiert mit dem Posterpreis der GDCh FG Chemieunterricht-Tagung 2021.*
- Kiesling, Elisabeth; Brunnert, Rainer; Bohrmann-Linde, Claudia: *"Bioethanol im bilingualen Chemieunterricht mithilfe der Methode Bilingual Poster Production."*, GDCh-FGCU-Tagung/WiFo, Aachen September 2019.
- Brunnert, Rainer; Kiesling, Elisabeth; Bohrmann-Linde, Claudia: *"Bioethanol im bilingualen Chemieunterricht per classroom translanguaging."*, GDCh-FGCU-Tagung/WiFo, Aachen September 2019.

Vorträge

- Diskussionsvortrag *"What to do with CO₂? – Eine bilinguale Schülerlaboreinheit als Beitrag zu BNE"*, FGCU Jahrestagung Praxis und Forschung kollegial reflektieren, Regensburg 18.09.2024.
- Vortrag *"What to do with CO₂? – Ein bilinguales BNE-Schülerlaborangebot im Fach Chemie"*, CDR-Dialog 2023: Bildungskonferenz zur Kohlenstoffdioxid-Entnahme, München 11.10.2023.
- Diskussionsvortrag *"Wege aus der Klimakrise - Eine Schülerlaboreinheit zu BNE im Chemieunterricht"* zusammen mit Julian Venzlaff, GDCh Wissenschaftsforum (WiFo) - Rethinking Chemistry, Leipzig 05.09.2023.

Workshops

- Workshop *"Carbon Capture and Storage (CCS) - Einsatz im Chemieunterricht und Bezüge zur Bildung für nachhaltige Entwicklung"*, MNU-Bundeskongress, Bochum 03.05.25.
- Workshop *"Carbon Capture and Storage (CCS) Einsatz im Chemieunterricht und Bezüge zur Bildung für nachhaltige Entwicklung"* zusammen mit Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde, 17. Europäischer Chemielehrer*innen Kongress VCÖ, Graz 25.04.25.
- Workshop *„Wasserstoff als alternativer Energieträger – Einsatz im Chemieunterricht und Bezüge zu BNE“* zusammen mit Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde, Fachtag des Hessischen Kultusministeriums, Nachhaltigkeit im Fokus, Frankfurt, 05.06.24.
- Workshop *"Die Reduzierung von CO₂-Emissionen - BNE-fördernde Lernangebote für den Chemieunterricht"* zusammen mit Julian Venzlaff, CDR-Dialog 2023: Bildungskonferenz zur Kohlenstoffdioxid-Entnahme, München 11.10.2023.
- Workshop *"BNE und Chemieunterricht – Von der Leitlinie BNE zur exemplarischen Unterrichtseinbindung"* zusammen mit Julian Venzlaff, MINT-Tag NRW, Veranstalter: Schulewirtschaft Nordrhein-Westfalen, Bottrop 26.08.2022.

Fortbildungen für Lehrkräfte

- Lehrkräftefortbildung "*Sprachsensiblen Chemieunterricht gestalten*" zusammen mit Judith Laufer, Wuppertal 02.04.2025.
- Gestaltung eines Weiterbildungstages „*Bildung für nachhaltige Entwicklung BNE*“ mit Vortrags- und Workshopphasen zusammen mit Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde für die Kantonale Fachschaft Chemie, Luzern/Baldegg, 25.03.2025.
- Lehrkräftefortbildung "*Carbon Capture, Storage and Utilisation*", Wuppertal 15.11.2023.
- Lehrkräftefortbildung "*Wege aus der Klimakrise – BNE als Leitidee für einen Experimentierparcours*" zusammen mit Julian Venzlaff, Nuno Pereira Vaz, Richard Kremer und Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde, Wuppertal 25.10.2023.

