

**Erhebung und Analyse von Schüler:innenvorstellungen zum Klimawandel  
zur Ermittlung der Lernausgangslage für den naturwissenschaftlichen  
Unterricht**

Masterarbeit  
im Fachbereich Biologie, Chemie, Pharmazie  
der Freien Universität Berlin

Eingereicht von:

**Linnea Schramm**

Matrikel-Nummer:



16.09.2023

Erstprüferin: Prof.in Dr.in Daniela Mahler

Zweitprüferin: Dr.in Katharina-Maria Kuse



## Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>8</b>
<b>2 Theorie</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1 Die naturwissenschaftliche Perspektive: Der Klimawandel</b> .....	<b>11</b>
2.1.1 Ursachen des Klimawandels .....	13
2.1.2 Beeinflussbarkeit klimatischer Subsysteme .....	17
2.1.3 Folgen und Risiken des Klimawandels .....	26
2.1.4 Handlungsperspektiven .....	28
<b>2.2 Die fachdidaktische Perspektive: Präkonzepte von Lernenden zum Klimawandel</b> .....	<b>30</b>
2.2.1 Präkonzepte .....	30
2.2.2 Die Conceptual Change Theorie .....	31
2.2.3 Präkonzepte zum Klimawandel .....	33
2.2.3.1 Lochkonzept versus Glashausmodell .....	34
2.2.3.2 Polareis-Überflutungs-Konzept .....	35
2.2.3.3 Verschmutzungskonzepte .....	35
2.2.3.4 Fotosynthese .....	36
2.2.4 Experimentelles Lernen (an außerschulischen Lernorten) .....	37
<b>3 Forschungsfragen und Erwartungen</b> .....	<b>38</b>
<b>3.1 Forschungsfragen</b> .....	<b>38</b>
Fragestellung 1: Vorstellungselemente .....	39
Fragestellung 2: Subjektive Theorien .....	39
<b>3.2 Erwartungen</b> .....	<b>39</b>
<b>4 Methoden</b> .....	<b>41</b>
<b>4.1 Stichprobe</b> .....	<b>41</b>
<b>4.2 Qualitativ-orientierter Forschungsansatz</b> .....	<b>42</b>
<b>4.3 Datenerhebung und -auswertung</b> .....	<b>44</b>
4.3.1 Datenerhebung 1: Schriftliche Befragung mittels Fragebogen .....	44
4.3.2 Datenerhebung 2: Leitfadenorientierte Einzelinterviews .....	45
4.3.3 Datenauswertung 1: Fragebögen .....	46
4.3.4 Datenauswertung 2: Einzelinterviews .....	47
<b>5 Ergebnisse</b> .....	<b>50</b>
<b>5.1 Der Klimawandel im Unterricht und im Alltag</b> .....	<b>50</b>
<b>5.2 Fragebogenerhebung: Elementare Schüler:innenvorstellungen</b> .....	<b>51</b>
5.2.1 Vorstellungen über Ursachen des Klimawandels .....	51
5.2.2 Vorstellungen über die Folgen des Klimawandels .....	53
5.2.3 Vorstellungen über die Handlungsmöglichkeiten im Klimawandel .....	54
5.2.4 Vorstellungen zum anthropogenen Treibhauseffekt und zum Schmelzen von Meereis .....	57

5.3 Interviews: Von erklärenden Zusammenhängen zu subjektiven Theorien .....	60
5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	65
<b>6 Diskussion .....</b>	<b>67</b>
6.1 Inhaltliche Diskussion .....	67
<b>6.2 Konkrete didaktische Implikationen .....</b>	<b>71</b>
6.2.1 Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> ) als Anknüpfungspunkt für conceptual growth.....	72
6.2.2 Der Treibhauseffekt: conceptual growth und reconstruction.....	74
6.2.3 Meeresspiegelanstieg: conceptual reconstruction .....	77
6.2.4 Die Rolle der Pflanzen.....	78
6.2.5 Abschluss der Reihe.....	80
<b>6.3 Methodische Diskussion (Limitationen) .....</b>	<b>82</b>
6.3.1 Fragebogenerhebung .....	82
6.3.2 Einzelinterviews.....	84
<b>7 Fazit und Ausblick.....</b>	<b>88</b>
<b>8 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>90</b>
<b>9 Anhang.....</b>	<b>97</b>
9.1 Datenerhebung 1: Fragebogen .....	97
9.1.1 Fragebogen: Version 1.....	97
9.1.2 Fragebogen: Version 2.....	99
9.2 Datenerhebung 2: Halbstrukturierter Interviewleitfaden.....	101
9.3 Kategorisierung der Fragebogenauswertung mit Beispielen .....	102
9.4 Interview-Transkripte.....	104
9.5 Struktur-Maps der Interviews.....	116
9.6 Kategoriensystem in MAXQDA .....	119
9.7 Inhaltsanalyse nach Mayring – Tabellarische Reduktion der Interviews .....	120
9.8 Versuchsskripte und möglicher Rahmenlehrplanbezug.....	128
9.9 Weiteres Lernmaterial (Arbeitsblatt) .....	130

## Tabellenverzeichnis

<i>Tab. 1 Verschiedene Treibhausgase Im Vergleich. ....</i>	<i>15</i>
<i>Tab. 2 Beiträge thermosterischer und eustatischer Effekte zum Meeresspiegelanstieg.....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 3 Regeln für die Transkription der Einzelinterviews. ....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 4 Versuchsreihe zum Vorstellungselement CO<sub>2</sub> für Primarschüler:innen. ....</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 5 Modellversuch zum Treibhauseffekt für Primarschüler:innen.....</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 6 Versuche zu Einflussfaktoren auf den Meeresspiegelanstieg.....</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 7 Modellversuch nach Priestley zum Verständnis von Pflanzen im Klimasystem.....</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 8 Bestimmung der Interrater-Reliabilität anhand der Überprüfung der Übereinstimmung der zugewiesenen Codes durch zwei Rater. ....</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 9 Kategoriensystem der Fragebogenauswertung. ....</i>	<i>102</i>
<i>Tab. 10 Übersicht der Einzelinterviews. ....</i>	<i>104</i>
<i>Tab. 11 Kategoriensystem im MAXQDA.....</i>	<i>119</i>
<i>Tab. 12 Tabellarische Reduktion der Interviews nach Mayring. ....</i>	<i>120</i>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Der Klimawandel aus naturwissenschaftlicher Perspektive: Strukturierung der Inhalte. ....	12
Abb. 2 Treibhausgasemissionen durch menschliche Aktivitäten in Deutschland nach Sektoren. ....	16
Abb. 3 Die Strahlungskomponenten des Treibhauseffektes im Modell. ....	18
Abb. 4 Wahrscheinliche kurz- und mittelfristige Folgen des Klimawandels. ....	28
Abb. 5 Allgemeines Vorgehen: Entwicklung, Anpassung und Anwendung eines induktiven Kategoriensystems. ....	43
Abb. 6 Schritte der qualitativen Inhaltsanalyse von Einzelinterviews nach Mayring. ....	49
Abb. 7 Von Berliner Fünftklässler:innen (n = 78) genutzte Informationsquellen zum Thema Klimawandel. ....	51
Abb. 8 Verursacher und Ursachen des Klimawandels aus Sicht von Berliner Fünftklässler:innen (n = 78). ....	52
Abb. 9 Folgen des Klimawandels aus Sicht von Berliner Fünftklässler:innen (n = 78). ....	54
Abb. 10 Vorstellungen von Berliner Fünftklässler:innen über Handlungsmöglichkeiten in Bezug auf den Klimawandel (n = 78). ....	56
Abb. 11 Ergänzung einer Abbildung zum Treibhauseffekt durch Berliner Fünftklässler:innen (n = 20). ....	58
Abb. 12 a - b Verfassen eines Freitextes zum Treibhauseffekt durch Berliner Fünftklässler:innen (n = 58). ....	58
Abb. 13 Vorstellungen von Berliner Fünftklässler:innen über die Folgen des Schmelzens eines Eisberges im Meer (n = 78). ....	59
Abb. 14 Individuelle subjektive Theorie der Fünftklässlerin B1 zu den Ursachen und Folgen des Klimawandels, zum Prozess der Erderwärmung sowie zu den Folgen von schmelzendem Meereis. ....	63
Abb. 15 Individuelle subjektive Theorie des Fünftklässlers B2 zu den Ursachen und Folgen des Klimawandels, zum Prozess der Erderwärmung sowie zu den Folgen von schmelzendem Meereis. ....	64
Abb. 16 Individuelle subjektive Theorie des Fünftklässlers B3 zu den Ursachen und Folgen des Klimawandels, zum Prozess der Erderwärmung sowie zu den Folgen von schmelzendem Meereis. ....	65
Abb. 17 a - f Comic für einen problemorientierten Einstieg in eine experimentelle Lehr-Lern-Einheit zum Gas CO <sub>2</sub> . ....	73
Abb. 18 Comic für einen problemorientierten Einstieg in ein Experiment zur Erderwärmung. ....	76
Abb. 19 Einstieg und Ausstieg für die experimentelle Lehr-Lern-Einheit zum Meeresspiegelanstieg. ....	78
Abb. 20 Klima-Bingo zur themenübergreifenden Wiederholung der Lehr-Lerneinhalte. ....	81
Abb. 21 Struktur-Map des Interviews von B1. ....	116
Abb. 22 Struktur-Map des Interviews von B2. ....	117
Abb. 23 Struktur-Map des Interviews von B3. ....	118

## Zusammenfassung

Der Klimawandel und seine negativen Auswirkungen auf Natur und Gesellschaft stellen den Menschen zunehmend vor Herausforderungen. Da sich ein ursachenbekämpfendes und lösungsorientiertes Handeln und Entscheiden auf das Verstehen naturwissenschaftlicher Zusammenhänge stützt, ist eine nachhaltige schulische Klimabildung erforderlich. Im ersten Teil der Arbeit wird daher die naturwissenschaftliche Perspektive erläutert, da sie die Grundlage für die Interpretation von Schüler:innenvorstellungen bildet. Nach der konstruktivistischen Lerntheorie erfordert das Lehren naturwissenschaftlich komplexer Themen die Berücksichtigung der kognitiven Voraussetzungen der Lernenden inklusive individueller Lernenden- bzw. Schüler:innenvorstellungen. Allerdings liegen zum aktuellen Zeitpunkt noch keine Studien zu den Vorstellungen von Grundschüler:innen in Deutschland zum Klimawandel vor, die für eine schüler:innenorientierte Konzeption von Lehr-Lern-Gelegenheiten essentiell wären. In dieser Arbeit wurden daher Vorstellungen von Fünftklässler:innen verschiedener Berliner Grundschulen zum Klimawandel über eine Fragebogenerhebung erhoben, indem elementare Vorstellungselemente zu den Ursachen, Folgen und Handlungsperspektiven ermittelt und über eine Frequenzanalyse quantifiziert wurden. Um ein tiefergehendes Verständnis über individuelle Erklärungsansätze innerhalb der subjektiven Theorien zu erlangen, wurden zusätzlich halbstrukturierte Leitfadenterviews durchgeführt und in Struktur-Maps visualisiert. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Lernenden des naturwissenschaftlichen Anfangsunterrichtes ihre Vorstellungen zum Klimawandel größtenteils anhand von digitalen, neuen und sozialen Medien und ihres sozialen Umfeldes konzipieren. Im Bereich elementarer Vorstellungselemente assoziierten die Fünftklässler:innen insbesondere das Treibhausgas CO<sub>2</sub> mit dem Klimawandel. Die Schüler:innenvorstellungen waren individuell sehr verschieden, größtenteils wissenschaftsfern und anfällig für Vermischungskonzepte verschiedener Klima- und Umweltprobleme. Anhand der Ergebnisse wurden mögliche Anknüpfungspunkte für die Änderungen von lebensweltnahen Konzepten hin zu wissenschaftsnahen Vorstellungen identifiziert. Abschließend wurden in den didaktischen

Implikationen Vorschläge für experimentell ausgerichtete Lerngelegenheiten formuliert, die den Klimawandel schüler:innenorientiert und wissenschaftsnah didaktisch strukturieren.



## 1 Einleitung

Der Klimawandel gehört zu den bedeutsamsten Herausforderungen der aktuellen Zeit (u. a. IPCC, 2022a). Die steigenden anthropogenen Treibhausgasemissionen führen zunehmend zu einer Erhöhung der Erdmitteltemperatur. Über die kaskadenartige Beeinflussung der Subsysteme des Klimas gewinnen ihre negativen Auswirkungen auf die Natur und die Gesellschaft zunehmend an Bedeutung. So werden Ökosystemverluste, Extremwetterereignisse und Umweltkatastrophen zunehmend zu einer Bedrohung für den Menschen (IPCC, 2022a). Die Interdisziplinarität der Klimakrise führt zu einer thematischen Komplexität, die für das Entwickeln von Alltagsvorstellungen, die nicht dem wissenschaftlichen Erkenntnisstand entsprechen, besonders anfällig ist. Neu veröffentlichte wissenschaftliche Erkenntnisse konkurrieren mit nicht-wissenschaftlichen Darstellungen bis hin zu Fehlinformationen und gezielten Desinformationen (Höttecke, 2021). Die Handlungsbereitschaft und Forderung nach Veränderungen, zum Beispiel auf *Fridays-for-Future*-Demonstrationen, werden von Debatten über die Legitimität von Klima-Aktivismus begleitet (Koos & Lauth, 2020). Aus der Summe u. a. dieser Alltagsinformationen entwickeln Individuen subjektive Konzepte zum Klimawandel, die in ihrer Komplexität und Realitätsnähe individuell stark variieren können (Straub und Thesing, 2023).

Für das Verstehen und Bewerten der globalen Klimaproblematik hat die Bildung eine zentrale Bedeutung, wobei das fachwissenschaftliche Verständnis naturwissenschaftlicher Prozesse das Grundgerüst für die ursachenorientierte Entwicklung von Lösungs- und Handlungsstrategien bildet (Bord et al., 2000). Allerdings wird der Klimawandel zum aktuellen Zeitpunkt nicht annähernd seiner Bedeutsamkeit entsprechend in den Inhalten der Rahmenlehrpläne der Länder Berlin und Brandenburg für die naturwissenschaftlichen Fächer widergespiegelt (u. a. nicht direkt vorhanden in LISUM, 2015a; 2015b; 2015c). Die vorgegebenen Themen und Inhalte der Bundesländer ermöglichen es Lehrkräften jedoch, den Klimawandel als Kontext zu nutzen oder verschiedene Aspekte der Klimaproblematik indirekt in übergreifende Fachinhalte zu integrieren. Die Konzeption von Lerngelegenheiten

nach dem *Modell der didaktischen Strukturierung* nach Gropengießer (2006) umfasst dabei zwei Facetten: Die fachliche Klärung sowie das Erfassen der Perspektiven der Schüler:innen. Da das Verändern subjektiver Konzepte zu komplexen Phänomenen immer vor dem Hintergrund individueller Vorerfahrungen stattfindet, ist die Einbeziehung von Schüler:innenperspektiven für ein erfolgreiches und nachhaltiges Lernen besonders relevant (Straub & Thesing, 2023), denn insbesondere nicht-wissenschaftliche Schüler:innenvorstellungen sind als Hürde zu verstehen, die Lernschwierigkeiten hervorrufen können (Petermann et al., 2008).

Ziel dieser Arbeit ist daher, Schüler:innenvorstellungen zum Klimawandel zu erheben, die die Lernausgangslage für die Planung eines schüler:innenorientierten naturwissenschaftlichen Unterrichts bilden. Diese Arbeit leistet so einen Beitrag zur Umsetzung der schulischen naturwissenschaftlichen Grundbildung (*Scientific Literacy*), durch die Schüler:innen dazu befähigt werden sollen, im individuellen und gesellschaftlichen Kontext politische Entscheidungen zu verstehen und zu hinterfragen sowie selbst (natur)wissenschaftlich-fundierte Entscheidungen treffen zu können (OECD, 1999), die die Klimakrise erfordern wird.

Die Zielgruppe der Erhebung umfasst Schüler:innen des naturwissenschaftlichen Anfangsunterrichts in der fünften Klasse, da bis jetzt keine Studien zu Schüler:innenvorstellungen im Bereich der Primarstufe vorliegen. Die Erhebung trägt so dazu bei, eine Klimabildung zu ermöglichen, die möglichst früh lebensweltnahe Vorstellungen aufgreift und anschlussfähige Konzepte liefert. Außerdem ist der NaWi-Unterricht der Berliner und Brandenburger Primarstufe besonders geeignet für die interdisziplinäre Vermittlung des Klimawandels, da die Naturwissenschaften Biologie, Chemie und Physik in diesem Fach integriert sind (LISUM, 2015a). Für die Erhebung von Schüler:innenvorstellungen zum Klimawandel eignet sich ein breites methodisches Spektrum, von Fragebögen (u. a. Boyes & Stanisstreet, 1993) über Mappingverfahren (u. a. Duit et al., 1981) bis hin zu Interviews (Straub & Thesing, 2023). Die Auswahl einer geeigneten Methodik hängt vom Konzept der Untersuchung und der untersuchten

Fragestellung ab (Schuler, 2011). Ziel dieser Arbeit ist außerdem, elementare Schüler:innenvorstellungen einer möglichst großen Stichprobe zu den Ursachen, Folgen und Handlungsperspektiven über eine Fragebogenerhebung zu ermitteln und einzelne Vorstellungselemente über eine Frequenzanalyse nach Mayring (2015) zu quantifizieren. Der Identifikation von erklärenden Zusammenhängen innerhalb individueller subjektiver Schüler:innentheorien sollen halbstrukturierte Leitfadeninterviews dienen, sodass die Konzepte der Primarschüler:innen über eine qualitative Inhaltsanalyse (Mayring, 2015) in Struktur-Maps visualisiert werden können. Den Abschluss dieser Arbeit bilden Vorschläge für experimentell ausgerichtete und schüler:innenorientierte Lerngelegenheiten zum Klimawandel.

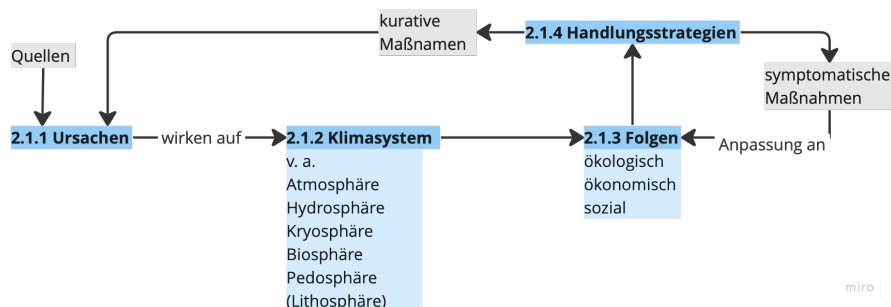
## 2 Theorie

Der aktuellste naturwissenschaftliche Kenntnisstand bildet die Grundlage für das Aufgreifen, Verändern oder Erweitern von Schüler:innenvorstellungen über den globalen Klimawandel. Die didaktische Strukturierung des Themas erfordert zwei Komponenten: eine fachliche Klärung sowie das Einbeziehen der Voraussetzungen und Vorstellungen der Schüler:innen (Gropengießer, 2006). Daher soll der Themenkomplex Klimawandel in diesem Abschnitt zunächst fachlich geklärt und strukturiert werden. Die Komplexität des Themas soll im Rahmen dieser Arbeit nicht vollumfänglich und im Detail dargestellt werden, sondern vor allem eine Grundlage für die Analyse der Vorstellungen von Berliner Primarschüler:innen bilden. Welche Bedeutungen diese Vorstellungen generell für ein erfolgreiches Lernen nach der *Conceptual Change Theorie* (Krüger, 2007) haben, wird anschließend aus fachdidaktischer Perspektive betrachtet. Schüler:innenvorstellungen über den globalen Klimawandel werden anhand des aktuellen Standes der fachdidaktischen Forschung konkretisiert. Vor dem Hintergrund didaktischer Implikationen für den Unterricht wird die Bedeutung von experimentellem Lernen, auch an außerschulischen Lernorten, kurz hervorgehoben.

### 2.1 Die naturwissenschaftliche Perspektive: Der Klimawandel

Im Fokus dieser Arbeit stehen der Begriff „Klimawandel“ und die mit dem anthropogenen Treibhauseffekt zusammenhängende Erhöhung der globalen Erdmitteltemperatur, für die im Folgenden auch der Begriff „Erderwärmung“ genutzt wird. Das Klima ist dabei eine statistische Beschreibung von messbaren Elementen des Wetters über einen langen Zeitraum durch die Angabe von mittleren Zuständen der Atmosphäre an einem bestimmten Ort (IPCC, 2007). 30-jährige Bezugszeiträume werden von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) als Klimanormalperioden definiert und ermöglichen eine Vergleichbarkeit von statistischen Kenngrößen über lange Zeiträume (IPCC, 2007). Die

durch den Vergleich von Mittelwerten und Variabilität ermittelten Veränderungen über Jahrzehnte werden als Klimawandel definiert (IPCC, 2014a). Wenngleich dieser Begriff anthropogene und natürliche Ursachen miteinschließen kann (IPCC, 2014a), nimmt die United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) eine differenziertere Begriffsdefinition vor. Sie ordnet dem Klimawandel ausschließlich mittel- oder unmittelbare menschliche Aktivitäten zu, die zusätzlich zu der natürlichen Klimavariabilität hinzukommen (IPCC, 2014a). Diese werden unter den Ursachen des Klimawandels in Abschnitt 2.1.1 im globalen und nationalen Kontext aufgeschlüsselt. Die resultierende globale Erwärmung ist ein Prozess, der auf die Veränderung des thermischen Zustandes des Klimasystems zurückzuführen ist. Veränderungen im Transport von Wärmeenergie resultieren in der Erhöhung der weltweit mittleren Erdtemperatur über langfristige Bezugszeiträume. Vor dem Hintergrund des anthropogen verstärkten Treibhauseffektes liegt der Fokus in Abschnitt 2.1.2 vor allem auf der direkten sowie indirekten Beeinflussung der verschiedenen Komponenten des Klimasystems durch anthropogene Einflüsse. In Abgrenzung dazu werden die (un)mittelbaren Folgen der globalen Klimaveränderungen auf die Natur und die Gesellschaft in Abschnitt 2.1.3 anhand des Sachstandberichtes des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) benannt. Auf Grundlage des aktuellen Standes der wissenschaftlichen Forschung zum Klimawandel, werden Maßnahmen zum Umgang mit Klimaveränderungen auf symptomatischer und kurativer Ebene in Abschnitt 2.1.4 aufgelistet. Diese werden vom IPCC auch als Anpassungs- und Minderungsstrategien bezeichnet.



**Abb. 1 Der Klimawandel aus naturwissenschaftlicher Perspektive: Strukturierung der Inhalte.** Angepasst nach Schönwiese, 2020.

### 2.1.1 Ursachen des Klimawandels

Natürliche Klimaschwankungen prägen die vergangenen 4,5 Mrd. Jahre Erdgeschichte. Den größten Teil der aktuellen Erderwärmung hat jedoch der Mensch zu verantworten (IPCC, 2021). Die Geschwindigkeit der anthropogen verursachten Klimaveränderungen überschreitet die Anpassungskapazität natürlicher Systeme (IPCC, 2018) und führt zu komplexen sich gegenseitig beeinflussenden Veränderungen. Neben Flora und Fauna ist der Mensch Leidtragender der globalen Klimafolgen seines eigenen Handelns. So wird der Klimawandel eine große Rolle in der Zukunft der jüngeren Generation spielen. Das Entwickeln von Handlungsoptionen beruht auf dem Verstehen der Ursachen, die in diesem Abschnitt zusammengefasst werden.

Die Hauptursache für den Klimawandel sind die durch menschliche Aktivitäten verursachten Emissionen von klimawirksamen Spurengasen, auch Treibhausgase (THG) genannt (IPCC, 2021). Die auf anthropogene Ursachen zurückzuführende Erwärmung liegt zwischen den Vergleichszeiträumen 1850 – 1900 und 2010 – 2019 bei + 1,1 °C (IPCC, 2021). Zu den gutdurchmischten THG gehören mit absteigender Bedeutsamkeit Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O), Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) und fluorierte Gase (F-Gase) (Kyoto-Protokoll; Umweltbundesamt, 2022). Auch Ozon (O<sub>3</sub>) in der Troposphäre ist klimawirksam (Schönwiese, 2020). Seit 1750 ist so die Konzentration von CO<sub>2</sub> um 47 %, von CH<sub>4</sub> um 156 % und von N<sub>2</sub>O um 23 % auf ein Maximum seit 2 Millionen (für CO<sub>2</sub>) bzw. 800.000 (für CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) Jahren gestiegen (IPCC, 2021). Während die Konzentration von CO<sub>2</sub> zu Beginn der industriellen Revolution bei 275 parts per million (ppm) lag (Nickendei et al. 2020), liegt sie aktuell bei 424 ppm (Stand Juni 2023; Global Monitoring Laboratory, 2023).

Neben der Veränderung der Konzentration eines Treibhausgases spielen die atmosphärische Verweildauer und das relative molare Treibhauspotential eine Rolle bei der Gesamtwirksamkeit des Gases auf eine Verstärkung des Treibhauseffektes. Während CO<sub>2</sub> mit einer Konzentration von etwas über 400 ppm zu 60 % zum anthropogenen

Treibhauseffekt beiträgt, trägt das klimawirksamere Methan trotz seiner geringen atmosphärischen Konzentration von unter 2 ppm ebenfalls zu einem relativ großen Anteil von 22% zum anthropogenen Treibhauseffekt bei. Mit jeweils 6 % begünstigen N<sub>2</sub>O und FCKW den Treibhauseffekt (Schönwiese, 2020).

Um die Klimawirkung einzelner Treibhausgase zu vergleichen, wird ihre jeweilige Treibhauswirkung in Relation zur Wirkung von Kohlenstoffdioxid gesetzt und als relatives molares Treibhauspotential angegeben (engl. *global warming potential (GWP)* Tab. 1; Schönwiese, 2020).

Etwa zwei Drittel aller THG-Emissionen sind auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe zur Energieumwandlung zurückzuführen (IPCC, 2014a). Ein Drittel der THG-Emissionen entstammt anderen Aktivitäten, wie der Landwirtschaft, der Waldrodung, Industrieprozessen und Abfällen (IPCC, 2014a).

Es ist anzumerken, dass sich die Veränderung der globalen Mitteltemperatur der Erde als Aggregation aus erwärmenden und abkühlenden Faktoren zusammensetzt (IPCC, 2021). Anthropogene Aerosole, wie beispielsweise Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), vermindern den Treibhauseffekt. Ohne Überdeckung abkühlender Effekte würde die Veränderung der globalen Mitteltemperatur der Erde bereits bei + 1,5 °C liegen (IPCC, 2021).

Natürliche Ursachen, wie eine Veränderung der Solarkonstante, der Erdbahnparameter oder des Vulkanismus, tragen zu einem vernachlässigbar geringen Anteil zur Verstärkung des Treibhauseffektes bei (Kiy, 2023).

**Tab. 1 Verschiedene Treibhausgase Im Vergleich.** Atmosphärische Konzentration, relatives molares Treibhauspotential und atmosphärische Verweildauer der Treibhausgase (THG), ihr Beitrag zum natürlichen und anthropogenen Treibhauseffekt sowie die jeweiligen anthropogenen Emissionsquellen (nach Schönwiese, 2020, wenn nicht anders gekennzeichnet).

THG	Gesamtwirksamkeit			Anteil am Treibhauseffekt		Anthropogene Emissionsquellen****
	Atmosphärische Konzentration Stand: 2019	Relatives molares Treibhauspotential	Atmosphärische Verweildauer	Beitrag zum natürlichen Treibhauseffekt in %	Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt in %	
CO <sub>2</sub>	410 ppm	1	lange	26	<b>58</b>	74 % fossile Energie (einschließl. Verkehr), 23 % Waldrodungen, 3 % Zementproduktion und Holznutzung
CH <sub>4</sub>	1,87 ppm	24	lange	2	<b>22</b>	27 % fossile Energie, 23 % Viehhaltung, 17 % Reisanbau, 16 % Abfälle (Müll, Abwasser), 11 % Biomasse-Verbrennung, 6 % Tierexkremete
N <sub>2</sub> O	0,332 ppm	298	sehr lange	4	<b>6</b>	23 – 48 % Bodenbearbeitung (einschl. Düngung), 15 – 38 % chemische Industrie, 17 – 23 % fossile Energie, 15 – 19 % Biomasse-Verbrennung
FCKW	0,502 ppb	10.900	sehr lange	-	<b>6</b>	Treibgas in Spraydosen, Kältetechnik, Dämm-Material, Reinigung
O <sub>3</sub> (tropo-sphärisch)	34 ppb, var.	< 2000	kurz	8	<b>8</b>	Indirekt über Vorläufersubstanzen wie z. B. Stickoxide (NO, u. a. Verkehrsbereich)
H <sub>2</sub> O*	2,6 %, var.	2-3**	sehr kurz	60	<b>Haupts. indirekt*</b>	

\* s. Abschnitt 2.1.2  
\*\* aus IPCC, 2014b  
\*\*\* sehr kurz = wenige Tage; kurz = einige Monate; lange = Jahre; sehr lange = über 100 Jahre  
\*\*\*\* Prozentuale Anteile variieren je nach Quelle. Der große Einfluss der Verbrennung fossiler Energieträger ist literaturübergreifend konsistent.

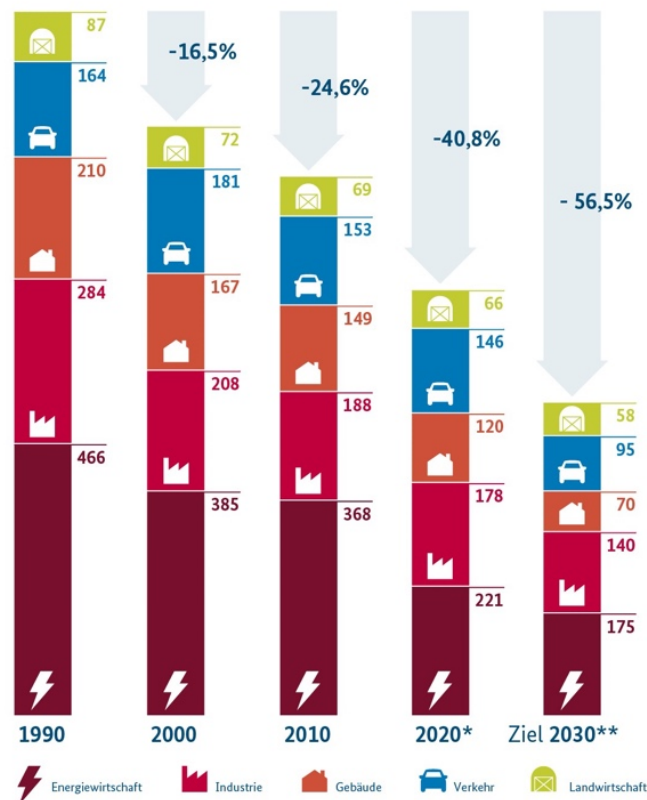
Die Betrachtung der einzelnen Sektoren der Treibhausgasemissionen soll im Hinblick auf die Analyse von Präkonzepten von Schüler:innen aus Berlin auf nationaler Ebene stattfinden. Treibhausgasemissionen werden in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten quantifiziert, wobei das Erwärmungspotential der einzelnen Treibhausgase über einem Zeitraum von 100 Jahren der Wirksamkeit berücksichtigt und entsprechend unterschiedlich gewichtet wird (IPCC, 2014c). 2020 entstanden in Deutschland etwa 731 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente, von denen der Großteil auf den Energiesektor (30,2 %) und den Industriesektor (24,4 %) zurückzuführen waren. Dem Verkehrssektor entstammten 20 % und dem Gebäudesektor 16,4 %. Auf die Landwirtschaft als Emissionsquelle entfielen 9 % (BMW & UBA, 2021).



Wenngleich die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre weiterhin steigt, ist in Deutschland ein Rückgang der Treibhausgasemissionen um 40,8 % seit 1990 zu verzeichnen mit dem Ziel, bis 2030 einen Rückgang um 56,5 % im Vergleich zu 1990 zu erreichen (Stand: 2020; BMWi, 2021).

### 2020: Mehr als 40 Prozent weniger Treibhausgasemissionen als 1990

Energiesektor halbiert seine Emissionen im Vergleich zu 1990



Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren (In Mio t CO<sub>2</sub>-Äquivalente)

\* Daten für 2020 vorläufige Zahlen

\*\* Jahresemissionsmengen aller Sektoren für 2030 laut Klimaschutzgesetz

© BMWi; Datenbasis 1990–2020: UBA März 2021

**Abb. 2 Treibhausgasemissionen durch menschliche Aktivitäten in Deutschland nach Sektoren.** Angaben in Mio t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Die Treibhausgasemissionen sind mit absteigender Relevanz auf die Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, den Verkehr und die Landwirtschaft zurückzuführen. Seit 1990 wurden die Gesamttreibhausgasemissionen in jedem Jahrzehnt gesenkt. Sie sind von 1191 Mio t im Jahr 1990 auf 731 Mio t im Jahr 2020 reduziert worden, mit sinkender Prognose für das Jahr 2030. Abbildung: BMWi, 2021.

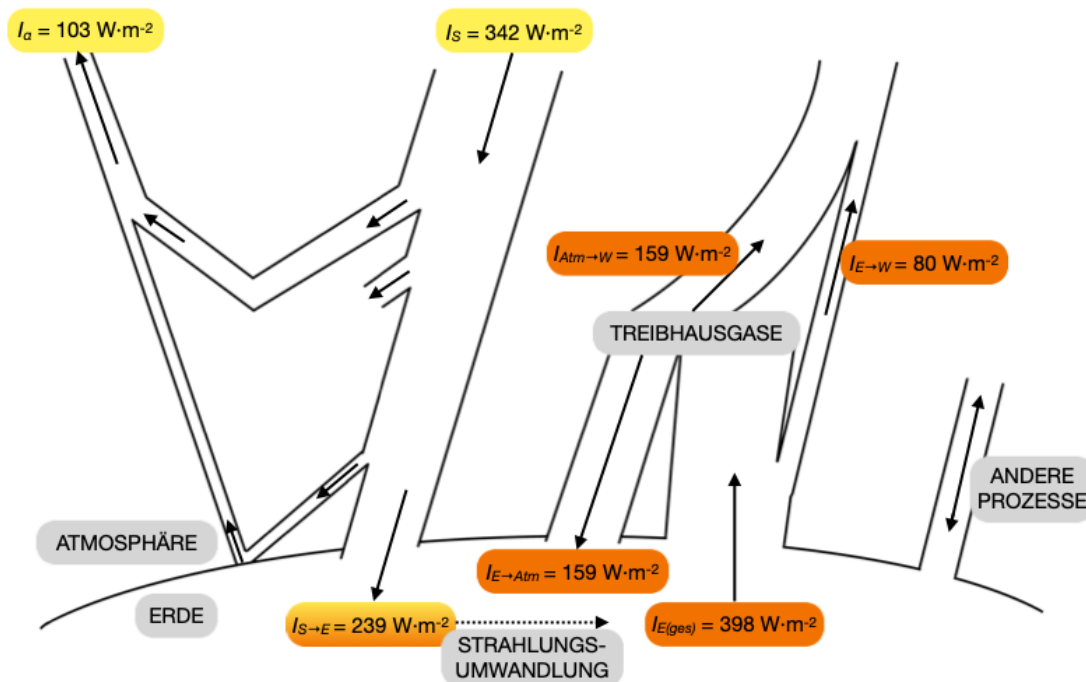
### 2.1.2 Beeinflussbarkeit klimatischer Subsysteme

Die anthropogene Veränderung der Zusammensetzung der Atmosphäre ist die treibende Ursache für die Veränderung des Klimas auf der Erde. In diesem Abschnitt soll daher zunächst der physikalische Zusammenhang zwischen der Treibhausgaskonzentration und der Veränderung der mittleren Erdtemperatur dargestellt werden. Der Treibhauseffekt lässt sich dabei nicht als isoliertes atmosphärisches Phänomen betrachten. Das Klimasystem setzt sich aus den Komponenten Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Pedosphäre, Lithosphäre und Biosphäre zusammen (Schönwiese, 2020), die über den Austausch von Energie, Wasser und Kohlenstoff miteinander verbunden sind. Inwiefern die einzelnen Subsysteme direkt und indirekt beeinflussbar sind, wird anschließend betrachtet.

**Die Beeinflussbarkeit der Atmosphäre.** Die Erwärmung der Erdatmosphäre beruht zunächst auf dem thermischen Energietransport der Sonne in Form von elektromagnetischer Strahlung (Abb. 3). Die Sonnenstrahlung umfasst ein breites Spektrum elektromagnetischer Wellen von 0,1 nm (harte Röntgenstrahlung) bis hin zu mehreren Metern (Radiostrahlung), wobei das Intensitätsmaximum um den Wellenlängenbereich 500 nm (sichtbares Licht (VIS)) liegt (Dameris, 2010). Die Strahlung wird in der Atmosphäre reflektiert, absorbiert oder durchdringt sie (Dameris, 2010). Die kurzwellige durchdringende Strahlung erwärmt den Erdboden, der beim Abkühlen Wärmestrahlung in Form von langwelligen Infrarot-Strahlen vor allem im Bereich des mittleren Infrarots (3 bis 50  $\mu\text{m}$ ; Dameris, 2010) remittiert (Kircher et al., 2020) (Abb. 3). Dabei befindet sich die Erde im *Strahlungsgleichgewicht*: Im Langzeitmittel entspricht die abgestrahlte Wärmestrahlung der aufgenommenen Strahlungsenergie: Steigt der Energieeintrag, so steigt auch die Menge abgestrahlter Wärmestrahlung, bis das Strahlungsgleichgewicht wieder hergestellt ist. In Abb. 3 ist die vereinfachte Modellrechnung des Treibhauseffektes nach Kircher et al. (2020) visualisiert. Unter Berücksichtigung der mittleren Strahlungsintensität der Sonne ( $I_s$ ) von  $342 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  und einer Albedo  $\alpha$  des Gesamtsystems aus Erde und Atmosphäre ( $I_\alpha$ ) von 0,3 (auch: Schönwiese, 2020) liegt die von der Erde absorbierte Sonnenenergie bei

$I_{S \rightarrow E} = 239 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Die von der Erde remittierte IR-Strahlung  $I_{E \rightarrow \text{Atm}}$  wird zu 80 % von atmosphärischen Treibhausgasen absorbiert und richtungsunspezifisch wieder abgestrahlt. Je 50 % von  $I_{E \rightarrow \text{Atm}}$  werden zurück in Richtung Erde  $I_{\text{Atm} \rightarrow E}$  bzw. in Richtung Weltall  $I_{\text{Atm} \rightarrow W}$  abgegeben. Die Einstrahlungsintensität auf die Erde setzt sich aus der solaren Komponente  $I_{S \rightarrow E}$  und der atmosphärischen Komponente  $I_{\text{Atm} \rightarrow E}$  zusammen (auch: Kiy, 2023). Die gesamte abgegebene Strahlungsenergie der Erde liegt bei  $I_{E(\text{ges})} = 398 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (Abb. 3), sodass sich unter Berücksichtigung der Atmosphäre eine mittlere Erdmitteltemperatur von 289 K bzw. 16 °C ergibt.

Die Modellrechnung könnte um weitere Faktoren ergänzt werden; wie das Absorptionsverhalten der Ozonschicht oder den Einfluss von Wolken und Aerosolen. Diese können für das Verständnis des allgemeinen Prinzips der anthropogenen Verstärkung des Treibhauseffektes jedoch vernachlässigt werden (Kircher et al., 2020).



**Abb. 3 Die Strahlungskomponenten des Treibhauseffektes im Modell.** Grundlegende Annahme ist die Temperaturerhöhung in der Atmosphäre durch die Umwandlung von Wärmestrahlung nach dem Stephan-Boltzmann-Gesetz:  $I = \sigma \cdot T^4$ ; mit  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{K}^{-4}$ . Abbildung angepasst nach IPCC 2001; Modellrechnung nach Kircher et al., 2020. Die Abbildung wurde erstellt mit ProCreate.

Das Strahlungsgleichgewicht des natürlichen Treibhauseffekts stellt sich immer dann bei einer höheren mittleren Temperatur ein, wenn die Einstrahlungsintensität, die sich aus  $I_{S \rightarrow E}$  und  $I_{Atm \rightarrow E}$  zusammensetzt, auf die Erde zunimmt.

Die atmosphärische Komponente beruht auf dem Absorptionsverhalten von IR-Strahlung durch die klimawirksamen Spurengase:  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ , troposphärisches  $O_3$  (IPCC, 2007) sowie FCKW und F-Gase (Kyoto-Protokoll; Umweltbundesamt, 2022). Diese Moleküle verfügen über die Fähigkeit, unter dem Einfluss elektromagnetischer Wellen im Frequenzbereich der IR-Strahlung ständige oder vorübergehende Dipole auszubilden (Kircher et al., 2020). Der energetische Bereich der IR-Strahlung liegt im Bereich der Schwingungsübergänge der Moleküle und wird innerhalb der Moleküle in Schwingungsenergie umgewandelt. Diese wird als Bewegungsenergie an andere Gas-Moleküle übertragen, sodass sich das Gas erwärmt (Kircher et al., 2020). Die anthropogene Freisetzung von Treibhausgasen erhöht ihre Konzentration in der Atmosphäre und begünstigt diesen Erwärmungsprozess.

**Sekundäreffekte des Treibhauseffektes.** Der direkte Einfluss der Treibhausgasemissionen auf die Temperatur der Erdatmosphäre wird von Rückkopplungsprozessen begleitet. Da die Erwärmung der Atmosphäre zu einer Erhöhung der Evaporationsprozesse beiträgt, steigt die atmosphärische Konzentration des Wasserdampfes, dessen Klimawirksamkeit etwa zwei- bis dreimal größer ist als die des Kohlenstoffdioxids (IPCC, 2014b). Durch diesen Rückkopplungsfaktor wird atmosphärische Einstrahlungsintensität  $I_{Atm \rightarrow E}$  auf die Erde wiederum erhöht. Die Erwärmung der Atmosphäre hängt zudem mit dem Schmelzen von Teilen der Kryosphäre zusammen. Im Vergleich zu Erdboden und Ozeanen ( $\alpha = 10 - 20 \%$ ) liegt die Albedo bei Eis und Schnee zwischen 50 und 90 % (Kircher et al., 2020). Mit einer Verringerung eisbedeckter Oberflächen auf der Erde nimmt die Einstrahlungsintensität der Sonne  $I_{S \rightarrow E}$  durch einen Rückkopplungsprozess zu. Insgesamt liegt der gesamte

anthropogene Strahlungsantrieb seit 1750 bei 2,29 (1,13 bis 3,33)  $W \cdot m^{-2}$  (Stand 2011; IPCC, 2013/2014).

**Ozonlöcher.** Da die Erwärmung der Atmosphäre häufig mit einer Veränderung der Ozonlöcher in einen Zusammenhang gebracht wird (Schuler, 2011), soll ihre Rolle an dieser Stelle kurz erläutert werden. Ozon befindet sich überall in der Atmosphäre, vor allem aber in der unteren Stratosphäre auf einer Höhe von 15 bis 30 km (Dameris et al., 2007) mit einem Mischungsverhältnis von etwa 5 - 10 ppm (Schönwiese, 2020). Es entsteht über die Photolyse von Sauerstoff durch energiereiche Strahlung und kann photolytisch wieder zu Sauerstoff abgebaut werden. Die Photolyseprozesse bewirken eine Abschirmung der energiereichen solaren UVC- und UVB-Strahlung (Schönwiese, 2020) unter einer Wellenlänge von 300 nm (Dameris et al., 2007; Schönwiese, 2020). Die stratosphärische Ozonschicht schützt so das terrestrische Leben vor DNA-Schäden durch harte UV-Strahlung. Aufgrund der Abhängigkeit von der Sonnenstrahlung variiert die natürliche Ozonkonzentration in Abhängigkeit von der geografischen Breite und der Jahreszeit (Dameris et al., 2007). Die natürliche Variabilität ist zudem durch die natürliche Atmosphärenchemie und Strömungsdynamiken beeinflusst (Schönwiese, 2020).

Zu den anthropogenen Einflussfaktoren auf die Ozonkonzentration gehören vor allem FCKW und Halone (Schönwiese, 2020). Vielfältig eingesetzt als Kälte- und Treibmittel, Aufschäumer und Narkosemittel führten sie seit 1979 zu einem messbaren Abbau der Ozonschicht, der sich durch sogenannte Ozonlöcher im antarktischen und arktischen Frühjahr großflächig über den Polarregionen zeigt (Wiedlich, 1991). Zwischen September und Oktober sank die Ozonkonzentration 1984 auf unter 50 % des Normalwertes (Wiedlich, 1991). Da die halogenierten Kohlenwasserstoffe inert sind, galten sie lange als ungefährlich. Ihre Langlebigkeit führt allerdings zu einem Aufstieg bis in die Stratosphäre (Wiedlich, 1991). Die Strömungsdynamik bewirkt einen Transport in Richtung der Pole, wo sie im Winter in den polaren stratosphärischen Wolken (PSCs) festgehalten werden (Dameris et al., 2007; Schönwiese, 2020). Im Frühjahr führt die Zunahme an solarer UV-Strahlung zu

einer Spaltung der FCKW durch UV-Strahlung zu reaktiven Halogenverbindungen, die das Ozon katalytisch abbauen (Schönwiese, 2020).

Eine Zerstörung der Ozonschicht hätte jedoch einen vernachlässigbar geringen Effekt auf eine Erwärmung der Troposphäre. Das gesamte stratosphärische Ozon verringert den Strahlungsantrieb in der Troposphäre um einen sehr geringen Anteil von  $-0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (IPCC, 2007). Ozonlöcher haben aufgrund der Zunahme von UVC- und UVB-Strahlung vor allem biologische Auswirkungen, wie die Zunahme von Hautkrebs (Wiedlich, 1991), und weniger klimatologische Erwärmungseffekte. Mit dem Montrealer Protokoll (1987) wurde die Produktion und Verwendung ozonzerstörender Substanzen reglementiert, sodass ihre Konzentration seit 1990 wieder abnimmt und eine langsam ablaufende Rückbildung der Ozonschicht zu messen ist (Dameris, 2010).

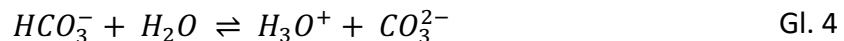
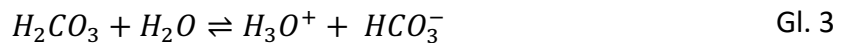
Im Gegensatz zum stratosphärischen Ozon ist das troposphärische Ozon ein Treibhausgas und trägt mit einem Strahlungsantrieb von  $+0,35 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  zu etwa einem Zehntel zum anthropogenen Treibhauseffekt bei. Es wird als vor allem als Photooxidant in einer mit Stickoxiden belasteten Atmosphäre gebildet (Rühl, 2021).

**Sekundäreffekte der Ozonlöcher.** Auch wenn diese eine untergeordnete Rolle spielen, beeinflusst der Abbau des stratosphärischen Ozons die Erderwärmung indirekt durch Rückkopplungsprozesse: Ein drastischer Ozonabbau in der Stratosphäre würde zur Schädigung marinen Phytoplanktons durch elektromagnetische Strahlung im hochenergetischen Bereich von  $< 300 \text{ nm}$  führen. Indirekt führt eine verringerte  $\text{CO}_2$ -Aufnahme durch das Phytoplankton im Ozean (Schönwiese, 2020) über eine Erhöhung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes. Der durch das  $\text{CO}_2$  verstärkte Treibhauseffekt hat zudem zur Folge, dass mehr Wärmestrahlung in der Troposphäre zurückgehalten wird und dementsprechend weniger in der Stratosphäre ankommt (Dameris, 2010). In Folge kühlt diese ab, was wiederum den Ozonabbau durch die Begünstigung der Bildung von PSCs beschleunigt.

**Beeinflussbarkeit der Hydrosphäre.** Die Subsysteme des Klimas sind über den Austausch von Wasser, Energie und Kohlenstoff eng miteinander verbunden. Die Ozeane bedecken 71 % der Erdoberfläche und enthalten etwa 97 % des gesamten Wassers der Erde (IPCC, 2019). Über die Aufnahme von CO<sub>2</sub> und Wärme sind sie Hauptregulator für das Klima auf der Erde.

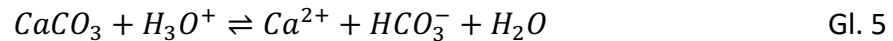
Der Ozean ist die größte Senke für das Treibhausgas CO<sub>2</sub> und hat seit 1980 etwa 20 - 30 % der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgenommen (IPCC, 2019; Jiang et al., 2019). Die vom CO<sub>2</sub>-Partialdruck direkt abhängige pH-Veränderung der Ozeane hat zu einer Versauerung der Ozeane geführt. Seit der industriellen Revolution ist der pH-Wert von 8,18 auf 8,07 gesunken (Stand: 2006; Schönwiese 2020).

Kohlenstoffdioxid ist gut in Wasser löslich (Gl. 1). Im Wasser liegt der Großteil des Gases physikalisch gelöst vor (CO<sub>2(aq)</sub>), während etwa 0,2 % mit dem Wasser zu Kohlensäure reagieren (Gl. 2; Schwedt 2015). Diese dissoziiert in Wasser über zwei Deprotonierungsstufen (Gl. 3, 4) unter Bildung von Oxoniumionen (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>), die den pH-Wert des Wassers absenken (Gl. 3).



Die Gleichgewichtsreaktionen sind nach dem Prinzip des kleinsten Zwangs durch Änderungen der Konzentrationen bzw. der Partialdrücke, der Temperatur sowie des Drucks beeinflussbar (Riedel & Janiak, 2007). Je höher der Partialdruck in der Atmosphäre ist (Konzentrationserhöhung), desto mehr CO<sub>2</sub> geht in Lösung, sodass der pH-Wert im Ozean weiter absinkt (Gl. 1 – 4). Da die Löslichkeit von Gasen immer exotherm erfolgt (Riedel & Janiak, 2007), nimmt die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> mit steigender Temperatur ab. Die

Temperaturerhöhung der Atmo- und oberen Hydrosphäre begünstigt die Freisetzung von CO<sub>2</sub> aus dem Ozean (Gl. 1 & 2, Rückreaktionen), das in der Atmosphäre wiederum den Treibhauseffekt begünstigt. Bilanzierend zeigt sich in der Ozeanversauerung, dass die Menge des aufgenommenen CO<sub>2</sub> durch den erhöhten Partialdruck größer ist als die abgegebene Menge des Gases durch die Temperaturerhöhung. Die Erniedrigung des pH-Wertes im Ozean begünstigt die Reaktion von Kalk (CaCO<sub>3</sub>) mit den Oxonium-Ionen (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) unter Bildung von Hydrogencarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (Gl. 5) und so die Zersetzung von Kalk. Mit zunehmender Ozeanversauerung nimmt außerdem die Kalkbildungsfähigkeit von Meeresorganismen ab (Guinotte & Fabry, 2008).



Das Verhältnis des CO<sub>2</sub>-Partialdrucks zum gelösten CO<sub>2</sub> bestimmt die Pufferkapazität des Ozeans. Diese nimmt mit steigendem Partialdruck des Kohlenstoffdioxids ab, bis zum Jahr 2100 voraussichtlich um etwa 34 % (Jiang et al., 2019). Neben der Ozeanversauerung kommt es so langfristig zu einer zunehmenden CO<sub>2</sub>-Sättigung, die die Aufnahmekapazität für CO<sub>2</sub> langfristig herabsetzt.

**Sekundäreffekte: Treibhauseffekt und Meeresspiegelanstieg.** Treibhausgase, wie CO<sub>2</sub> (Tab. 1), beeinflussen die Temperatur des Ozeans indirekt über den anthropogenen Treibhauseffekt. Seit 1970 hat der globale Ozean über 90 % der auf anthropogene Ursachen zurückzuführenden Wärme aufgenommen (IPCC, 2019). Die spezifische Wärmekapazität des globalen Ozeans ist mit 3900 J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> (Schönwiese, 2020) sehr hoch, sodass er große Wärmemengen aufnehmen kann, ohne sich selbst stark zu erwärmen. Dennoch zeigen sich Effekte dieser Wärmeaufnahme vor allem im Oberflächenwasser durch eine Temperaturerhöhung und Volumenzunahme. In Folge der thermischen Expansion ist der Meeresspiegel seit Beginn des 20. Jahrhunderts um 0,16 m gestiegen (Stand 2010; IPCC, 2019). Thermosterische Effekte tragen mit über 50 % zum Meeresspiegelanstieg bei (Tab. 2).



**Sekundäreffekte der Beeinflussung der Kryosphäre.** Mit der Erhöhung der Erdmitteltemperatur nehmen Schmelzprozesse in der Kryosphäre zu. Im Abschnitt zur Beeinflussbarkeit der Atmosphäre wurde die verminderte Reflektionsfähigkeit der Kryosphäre bereits mit einer Verstärkung des Treibhauseffektes in Verbindung gebracht. Das Schmelzen von Eis und Schnee stellt zusätzlich eine Kopplung von Kryo- und Hydrosphäre dar. Veränderungen des Meeresspiegels, die auf einer temperaturunabhängigen Veränderung des Wasservolumens beruhen, werden als eustatische Effekte bezeichnet. Sie gehen zurück auf das Schmelzen von Gletschern und Eiskappen ( $0,77 \pm 0,22 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ), des Grönländischen Eisschildes ( $0,21 \pm 0,07 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ) sowie des Antarktischen Eisschildes ( $0,21 \pm 0,35 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ) (Tab. 2; IPCC 2007). Mit einer Zunahme der Schmelzprozesse beschleunigte sich der schmelzprozessbedingte Meeresspiegelanstieg von 1,19 mm pro Jahr (IPCC, 2007) auf 1,8 mm pro Jahr (IPCC, 2019). Da das Meereis der Arktis keinen Volumeneffekt hat, nimmt es als Wasser das Volumen ein, das es vorher als Eis verdrängt hat und trägt nicht signifikant zum Meeresspiegelanstieg bei (Paul, 2022).

**Tab. 2 Beiträge thermischer und eustatischer Effekte zum Meeresspiegelanstieg.** Angaben für den Zeitraum von 1995 bis 2003. Angepasst nach IPCC, 2007.

Ursachen des Meeresspiegelanstiegs	Meeresspiegelanstieg in mm pro Jahr (1995 - 2003)	Anteil zum gesamten Meeresspiegelanstieg in %
Thermische Ausdehnung	1,6 ± 0,5	51,6
Gletscher und Eiskappen	0,77 ± 0,22	24,8
Grönländischer Eisschild	0,21 ± 0,07	6,8
Antarktischer Eisschild	0,21 ± 0,35	6,8
Summe der individuellen Klimabeiträge zum Meeresspiegelanstieg	2,8 ± 0,7	90
Beobachteter gesamter Meeresspiegelanstieg*	3,1 ± 0,7**	100
Weitere Faktoren***	k.A.	ca. 10
* Daten aus Satellitenaltimetrie		
** Aktuellste Werte zeigen eine Beschleunigung der Zunahme: Der mittlere globale Meeresspiegelanstieg lag zwischen 2006 und 2018 bereits bei 3,7 [± 0,5] mm pro Jahr (IPCC, 2021).		
*** zu weiteren Faktoren gehören u. a. halosterische Effekte aufgrund von Veränderungen im Salzgehalt (NOAA/NCEI (2022))		

**Die Beeinflussbarkeit der Bio- und Pedosphäre.** Die terrestrische Biosphäre ist Teil des globalen Kohlenstoffkreislaufs und speichert weltweit etwa 2400 Gt Kohlenstoff (IPCC, 2007), mit einer Austauschrate von etwa 200 Gt pro Jahr. Wälder, die Böden von Feuchtgebieten und Moore gehören zu den wichtigsten globalen Kohlenstoffsinken, die etwa 30 % der weltweiten anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen aufnehmen (Essl et al., 2013). So sind beispielsweise in den deutschen Landökosystemen 78 % des Gesamtkohlenstoffs in den Böden und 22 % des Kohlenstoffs in der Biomasse gespeichert (Essl et al., 2013).

In feuchten anaeroben Feuchtlebensräumen reichert sich Kohlenstoff als organische Biomasse in Form von Torf langfristig im Boden an. Die hohe relative Aufnahmekapazität, insbesondere von Hoch- und Niedermooren, ermöglicht das Speichern großer Kohlenstoffmengen auf kleiner Fläche (Essl et al., 2013).

Die Primärproduktion von Biomasse, z. B. in Wäldern, erfolgt durch die Bindung von Kohlenstoff in Form von CO<sub>2</sub> in der Fotosynthese. Allgemein korreliert hier eine artenreiche und ertragsarme Biosphäre mit einer hohen Kohlenstoffaufnahmekapazität. Landnutzungsänderungen, wie beispielsweise die Umwandlung von Wäldern in landwirtschaftliche Nutzflächen, haben die Aufnahmekapazität von Kohlenstoff weltweit seit Aufzeichnungsbeginn um 76 % reduziert (Bondeau et al., 2007; aus Essl et al., 2007). Landwirtschaftlich genutzte Flächen haben meist eine negative Treibhausgasbilanz, die auf die Methanemission durch Verdauungsprozesse von Weidetieren sowie die Freisetzung von Distickstoffmonoxid durch Stickstoff-Düngung zurückzuführen ist. Indirekt gehen so 20 % der globalen Treibhausgasemissionen auf die Zerstörung von Wäldern zurück (Essl et al., 2013). Anthropogen verursachte Verschmutzungen und die Freisetzung von Schadstoffen können Ökosystemen schaden und ihre Anpassungsfähigkeit gegenüber Klimaveränderungen zusätzlich herabsetzen (IPCC, 2022a).

**Sekundäreffekte in der Bio- und Pedosphäre.** Die Fähigkeit der Bio- und Pedosphäre, Kohlenstoff aufzunehmen, verändert sich mit Veränderungen im Klimasystem. Die

Nettoprimärproduktion von Pflanzen steigt über den Kohlenstoff-Düngeeffekt mit steigender CO<sub>2</sub>-Konzentration. Auch steigende Temperaturen führen zu einer gesteigerten Fotosyntheserate, wenn diese regional durch niedrige Temperaturen limitiert ist. In der terrestrischen Biosphäre sinkt die Kohlenstoffaufnahme mit dem Rückgang der Niederschlagssumme, da die Wasserverfügbarkeit einen weiteren limitierenden Faktor für die Fotosynthese darstellt. Die Veränderungen der Quellen und Senken des Kohlenstoffs zeigen sich langfristig in den Änderungen der ökosystemaren Kohlenstoffflüsse sowie der Artenzusammensetzung und -struktur (Essl, 2013). Mit der Zerstörung von Ökosystemen sinkt ihre Resilienz gegenüber Klimaveränderungen (IPCC, 2022a). Da der Mensch als Teil des globalen Ökosystems zu verstehen ist (Schönwiese, 2020), wird auch die menschliche Verwundbarkeit gegenüber des Klimawandels mit der Ökosystemzerstörung erhöht (IPCC, 2022a).

### 2.1.3 Folgen und Risiken des Klimawandels

Die komplexen Veränderungen innerhalb und zwischen den klimatischen Subsystemen hat weitreichende ökologische, ökonomische und soziale Folgen. Die vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) veröffentlichten möglichen Folgen beruhen auf Wahrscheinlichkeitsaussagen bezüglich bestimmter Ereignisse. Eine Auswahl wird im folgenden Abschnitt dargestellt, insbesondere die, die mit einem hohen oder sehr hohen Vertrauen auf anthropogene Klimaveränderungen zurückzuführen sind.

Die auf anthropogenen Ursachen beruhende globale Erderwärmung gilt seit dem aktuellen Sachstandsbericht des IPCC als gesichert (IPCC, 2021a). Die globale Erdmitteltemperatur ist über das letzte Jahrhundert um 1,1 °C gestiegen und steigt mit etwa 0,2 °C pro Jahrzehnt (IPCC, 2021a; IPCC, 2018). Bis 2040 wird sie *wahrscheinlich* um 1,5 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter erhöht sein (IPCC, 2021a).

Aktuelle Veränderungen des Klimasystems gehen über die natürliche Klimavariabilität hinaus (IPCC, 2022a) und die Grenzen der Anpassungsfähigkeit der klimatischen Subsysteme werden zunehmend überschritten. Über komplexe Wechselwirkungen zeigen sich Klimaveränderungen in der Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen (IPCC, 2022a). Ab einer Erhöhung um 0,5 °C konnte ein korrelativer Zusammenhang der erhöhten Erdmitteltemperatur mit einer Zunahme von Klima- und Wetterextremen festgestellt werden (IPCC, 2018). Insbesondere die Häufigkeit oder Intensität von Hitzeextremen, Starkregenniederschlägen, tropischen Wirbelstürmen, Dürren und Niederschlagsdefiziten hat zugenommen (IPCC, 2018; IPCC, 2022a). Die Extremereignisse haben insbesondere dann schwerwiegende Folgen, wenn die regionale Verwundbarkeit der Ökosysteme bzw. der Menschen (z. B. durch deren Entwicklungsstand oder geographische Lage (IPCC, 2018)) besonders hoch (IPCC, 2022b) und die jeweilige Anpassungskapazität besonders gering ist. Der Großteil aller Arten sowie 3,3 bis 3,6 Milliarden Menschen sind gegenüber Klimagefahren besonders verwundbar (IPCC, 2022b).

Die Darstellung der konkreten Folgen der Extremereignisse sowie die der langsamen langfristigen Klimaveränderungen erfolgt anhand des aktuellen Sachstandsberichtes der IPCC (2022). Sie werden in Abb. 4 aufgelistet und nach Schönwiese (2020) in die Bereiche ökologisch, ökonomisch und sozial kategorisiert. Da Abhängigkeitsbeziehungen zwischen menschlichen und natürlichen Systemen bestehen und der Mensch als Teil des globalen Ökosystems verstanden werden kann (Ibisch et al., 2018), ist die Trennschärfe zwischen den Kategorien in einigen Fällen nicht eindeutig, aber im Hinblick auf die Datenanalyse der Schüler:innenvorstellungen zielführend.

Auch wenn die in Abb. 4 aufgelisteten Folgen dem anthropogenen Klimawandel zugeordnet werden können, sind sie als gekoppelte Teilelemente des Klimasystems zu verstehen. Es handelt sich um „komplexe, sich gegenseitig verstärkende und kaskadenartige Risiken“ (IPCC, 2022b, S. 2, Abschnitt B.5), die ebenfalls über Rückkopplungsprozesse auf die Klimaveränderungen wirken bzw. neue Folgen hervorrufen können (IPCC, 2022b).

Folgen des Klimawandels nach IPCC, 2022a		
Biosphäre	Anthroposphäre	
ökologische Folgen	ökonomische Folgen	soziale Folgen
<p><b>Jahreszeitliche Verschiebungen der Lebenszyklen</b></p> <p><b>Verlagerung von Verbreitungsgebieten polwärts</b></p> <p><b>Veränderung in der Ökosystemstruktur</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verlust von Land- Süßwasser- und Meeresökosystemen</li> <li>• Veränderungen in Gebirgsökosystemen und arktischen Ökosystemen (Tauen von Permafrost)</li> <li>• Hydrologische Veränderungen durch Gletscherrückgang</li> <li>• Überschwemmungen von Küstenökosystemen</li> <li>• dürrbedingtes Baumsterben</li> </ul> <p><b>Massen- und Artensterben</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Warmwasserkorallenbleiche und -sterblichkeit</li> <li>• Verlust von Tangwäldern und Seegraswiesen</li> <li>• terrestrische Ökosysteme stark betroffen</li> <li>• Waldbrände</li> <li>• v. a. endemische Arten betroffen</li> </ul> <p><b>Biodiversitätsverlust</b>, v. a. in:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Waldökosystemen</li> <li>• Tang- und Seegrasökosystemen,</li> <li>• arktischen Meereis- und Landökosystemen</li> <li>• in Warmwasserkorallenriffen</li> </ul> <p><b>Zunahme der Verbreitung von Krankheitserregern</b></p>	<p><b>Ernährungsunsicherheit</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abnahme landwirtschaftlicher Produktivität in Regionen mittlerer und niedriger Breitengrade, u. a. durch Dürren</li> <li>• Abnahme der Nutztiergesundheit und -produktivität</li> <li>• Rückgang Fischereierträge und Aquakulturproduktion durch Veränderungen in der Hydrosphäre</li> </ul> <p><b>Wasserversorgungsunsicherheit</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• v. a. in Afrika, Asien, Zentral- und Südamerika, im Mittelmeerraum, auf kleinen Inseln</li> </ul> <p><b>Schäden an Infrastrukturen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• z. B. durch Binnenhochwasser, Flut- und Sturmschäden</li> <li>• Auswirkungen auf Verkehrs-, Wasser-, Abwasser-, Energiesysteme</li> <li>• Schäden an wirtschaftlichen Schlüsselsektoren</li> <li>• wirtschaftliche Verluste</li> <li>• Dienstaussfälle</li> </ul> <p><b>Negative wirtschaftliche Folgen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Langfristig in Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei, Energie und Tourismus durch Abnahme der Arbeitsproduktivität</li> <li>• v. a. in Regionen mit hohem Energiebedarf</li> <li>• kurzfristig, z. B. durch tropische Wirbelstürme</li> </ul>	<p><b>Gesundheit</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zunahme hitzebedingter Todesfälle</li> <li>• Zunahme von Übertragung und Verbreitung von (Infektions-)Krankheiten</li> <li>• Herz-Kreislaufbeschwerden und Atemwegsbeschwerden</li> <li>• Zunahme Magen-Darm-Infektionen</li> <li>• insbesondere in Städten</li> <li>• Unterernährung, auch durch geringe Ernährungsvielfalt (regional)</li> <li>• Psychische Belastung durch Extremereignisse, Traumata, hohe Temperaturen und Verlust von Existenzgrundlagen</li> </ul> <p><b>Schäden an Infrastrukturen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beeinträchtigung des Wohlergehens</li> </ul> <p><b>Humanitäre Krisen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• v. a. bei hoher Verwundbarkeit</li> <li>• Vertreibung, unfreiwillige Migration und Flucht</li> <li>• Gewaltsame Konflikte</li> </ul> <p><b>Abnahme der Geschlechter- und sozialen Gerechtigkeit</b>, durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verlust von Eigentum, Einkommen</li> <li>• Zerstörung von Häusern und Infrastruktur</li> <li>• Verringerte landwirtschaftliche Produktivität</li> <li>• Gesundheitliche Probleme <small>miro</small></li> <li>• Ernährungsunsicherheit</li> </ul>

**Abb. 4 Wahrscheinliche kurz- und mittelfristige Folgen des Klimawandels.** Nach IPCC, 2020; Kategorisierung nach Schönwiese, 2020. Ökologisch = Veränderungen auf der ökologischen Systemebene; Ökonomisch = Veränderungen in den Bereichen: Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft, Fischereiwirtschaft, Bauwirtschaft, Energiewirtschaft, Industrie u. Gewerbe; Sozial = Veränderungen in den Bereichen: Ernährung und Gesundheit, Verkehr und Siedlungen, Beschäftigungsstrukturen, Lebensstandard und Freizeit, Interessen/Konflikte, Recht.

### 2.1.4 Handlungsperspektiven

In regelmäßigen Abständen veröffentlicht der IPCC zusammenfassende Informationen zur Anpassung an den Klimawandel (IPCC, 2022a) auf symptomatischer Ebene sowie über

Maßnahmen zu Minderung des Klimawandels (IPCC, 2023) auf kurativer Ebene. Aktuellste Messwerte sowie die wahrscheinlichsten prognostizierten Szenarien werden in den jeweiligen Zusammenfassungen für die politische Entscheidungsfindung berücksichtigt. Eine nachhaltige Entwicklung setzt sich aus Anpassungs- und Minderungsmaßnahmen zusammen (IPCC, 2023). Im Bereich der Anpassung an die Folgen des Klimawandels wird die Stärkung der Resilienz, insbesondere die der Verwundbarsten, hervorgehoben (IPCC, 2022a). Im Bereich der Minderung des Klimawandels liegt der Fokus vor allem auf der Begrenzung der anthropogenen globalen Erwärmung auf vorzugsweise 1,5 bzw. maximal 2 °C durch die zeitnahe Implementation von Maßnahmen, wie die Reduzierung der globalen Treibhausgasemissionen, die Entwicklung und Förderung emissionsarmer Technologien und Infrastruktur, den Umstieg von fossilen Brennstoffen auf kohlenstoffarme oder -freie Energieträger, Effizienzsteigerungen in Energieumwandlungsprozessen inkl. Verkehrsträgern, Ressourceneffizienz, Dekarbonisierung durch Elektrifizierung, Nachrüstung von Gebäuden, nachhaltige Produktion, Verhaltensänderungen auf der Nachfrageseite sowie Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Fixierung (*Carbon Dioxide Removal*, CDR) (IPCC, 2023). In Abschnit 2.1.2 wurde verdeutlicht, wie bedeutsam die nachhaltige Nutzung von Land, Ressourcen und Wald sowie der Erhalt biologischer Vielfalt ist (IPCC, 2022a). Das Tempo, die Tiefe und der Umfang der Maßnahmen sind global zu maximieren, indem regionale Machbarkeitshürden abgebaut werden (IPCC, 2023). Spezifische Handlungsstrategien zur Ursachenbekämpfung werden in völkerrechtlichen Verträgen konkretisiert (z. B. Übereinkommen von Paris, 2016; Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, 2016). Im Hinblick auf die Folgen des Klimawandels stellt der IPCC (2023) fest: Wenn die Erderwärmung 2 °C nicht überschreitet, dann ist der wirtschaftliche Nutzen der Minderungsmaßnahmen größer als die anfallenden Kosten. Die IPCC-Berichte verdeutlichen außerdem, dass die Minderung des Klimawandels durch anthropogenes Handeln nur dann möglich ist, wenn dem Problem am Entstehungsort begegnet wird. Die Handlungsoptionen hängen daher eng mit dem Verständnis über die Quellen bzw. Ursachen des Klimawandels zusammen.

## 2.2 Die fachdidaktische Perspektive: Präkonzepte von Lernenden zum Klimawandel

Im Rahmen dieser Arbeit werden Vorstellungen erhoben, die Schüler:innen der Klassenstufe fünf zum Klimawandel haben und in die Schule mitbringen. Inwiefern diese Vorstellungen die Grundlage für einen erfolgreichen naturwissenschaftlichen Unterricht darstellen, wird in diesem Abschnitt aus der fachdidaktischen Perspektive ausgeführt. Die Bedeutung der *Conceptual Change Theorie* für die Veränderung von Vorstellungen wird hervorgehoben. In Bezug auf den Klimawandel werden spezifische Konzepte von Schüler:innen über bestimmte Teilaspekte des Klimawandels aus vorangegangenen Studien herausgestellt.

### 2.2.1 Präkonzepte

Die im Alltag gebildeten Vorstellungen von Schüler:innen zu Phänomenen und Begriffen werden als Präkonzepte, Alltags- oder Schüler:innenvorstellungen bezeichnet (Hamman & Asshoff, 2017). In der didaktischen Forschung wird vor allem dann von einem Präkonzept gesprochen, wenn eine Vorstellung zu einem Phänomen besteht, zu der noch keine konkrete Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Erkenntnissen stattgefunden hat (Straub & Thesing, 2023). Die Hauptquelle von Schüler:innenvorstellungen bilden Erfahrungen mit der eigenen Umwelt, die individuelle Interpretation von Alltagssprache sowie eigene Beobachtungen (Hamman & Asshoff, 2017). Mit zunehmendem Alter werden außerdem das (Schul-)Wissen und Medieninformationen zu bedeutsamen Quellen für Vorstellungen der Lernenden (Straub & Thesing, 2023; Schuler, 2011). So entwickelt jedes Individuum im Laufe seines Lebens eine eigene mentale Repräsentation der Realität. Wissen ist somit stets subjektiv konstruiert und entspricht nicht der objektiven Realität (Straub & Thesing, 2023).

Wenn Schüler:innen mit dem naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht beginnen, verfügen sie also bereits über Konzepte zu naturwissenschaftlichen Themen, die ihnen im Rahmen ihrer lebensweltlichen Erfahrungen sinnvoll erscheinen (Gropengießer et al.,

2017). Sie können wissenschaftsnah oder wissenschaftsfern sein. Nach der konstruktivistischen Lerntheorie bilden diese lebensweltlichen Vorstellungen den Anknüpfungspunkt für erfolgreiches Lernen im Unterricht und sollten von Lehrkräften in der Unterrichtsplanung, -durchführung und -auswertung berücksichtigt werden (Hamann & Asshoff, 2017).

Schüler:innenvorstellungen können nach Gropengießer (2001) nach dem Grad ihrer Komplexität in vier Stufen eingeteilt werden. Die erste und basalste Stufe wird von einzelnen unverbundenen Elementen gebildet. Meist handelt es sich um einzelne *Begriffe*, die einem Objekt oder einem Ereignis entsprechen. Einzelne Wörter, wie „Sonnenuntergang“, können auf der sprachlichen Ebene bereits Vorstellungen zu einem Ereignis erzeugen. Auf der zweiten Stufe werden die Elemente durch Relationen in einen Zusammenhang gebracht, sodass einfache zusammenhängende *Konzepte* entstehen, wie „Mit der Anzahl der Autos nimmt die Abgasmenge zu“. Werden einzelne Konzepte in einen erklärenden Zusammenhang mit Bezügen zu einzelnen Aspekten der Wirklichkeit gebracht, entstehen in der dritten Stufe komplexe *Denkfiguren*, wie „Mit der Anzahl der Autos nimmt die Abgasmenge zu, denn beim Verbrennen von Benzin entsteht CO<sub>2</sub>.“ Die vierte Stufe bilden komplexe, miteinander verbundene Denkfiguren zu umfangreichen Themen ganzer Wirklichkeitsbereiche, sie werden als *subjektive Theorien* bezeichnet.

Lebensweltnahe Präkonzepte können aus fachwissenschaftlicher Perspektive falsch sein. Nichtsdestotrotz sollten diese nicht als „falsche“ Vorstellungen bezeichnet werden, da es sich bei einer aktuellen Vorstellung um die für das Individuum am sinnvollsten und anhand der zur Verfügung stehenden Informationen um eine richtig erscheinende Vorstellung handelt (Feige et al. 2017).

### 2.2.2 Die Conceptual Change Theorie

Lebensweltliche Erfahrungen von Schüler:innen unterscheiden sich oft von wissenschaftlichen Vorstellungen (Gropengießer et al., 2017). Schüler:innenvorstellungen sind jedoch meist tief verankert und schwer veränderbar, da sie sich im alltäglichen Leben



als nützlich erwiesen haben (Hammann & Asshoff, 2017). Lehrende stehen daher alltäglich vor der Herausforderung, diese Vorstellungen erfolgreich und nachhaltig zu verändern. Dieser Vorstellungswechsel ist nach der *Conceptual Change Theorie* nach Posner et al. (1982) und Strike & Posner (1992) ein interner, kognitiver und gradueller Anpassungsprozess unter Berücksichtigung bestehender Vorstellungen (Krüger, 2007). Da es sich dabei weniger um eine radikale Änderung, sondern viel mehr um eine Weiterentwicklung, ein Wachstum oder eine Reorganisation eines kognitiven Konzeptes handelt, werden auch die Bezeichnungen *conceptual development*, *conceptual growth* oder *conceptual reorganisation* für den stattfindenden Lernprozess verwendet (Krüger, 2007). Aus Sicht der konstruktivistischen Lerntheorie muss das Knüpfen von neuen Zusammenhängen oder Reorganisieren von kognitiven Strukturen aktiv und selbstgesteuert durch die lernende Person erfolgen (Dubs, 1995). Denn erst durch die aktive Auseinandersetzung mit eigenen Konzepten kann eine „subjektive [Re]konstruktion“ (Straub und Thesing, 2018) einer Wissensstruktur erfolgen. Vor dem Hintergrund der Wichtigkeit der Aktivität der Lernenden bei der Vorstellungswandlung wird in dieser Arbeit die Bezeichnung *conceptual reconstruction* (Krüger, 2007) für das Umlernen verwendet. *Conceptual growth* wird für das Dazulernen durch das Ergänzen bestehender Konzepte verwendet.

Um einen erfolgreichen Lernprozess zu ermöglichen, müssen vier Bedingungen erfüllt sein (Posner et al. 1982; Strike u. Posner 1992; Krüger, 2007):

1. Die existierende Vorstellung muss **Unzufriedenheit** auslösen, beispielsweise durch Auftreten eines Problems innerhalb des Konzeptes, sodass die Bereitschaft für eine Konzeptänderung entsteht.
2. Die neue Vorstellung muss durch **Verständlichkeit** gekennzeichnet sein. Sie muss mit vorherigen Elementen der Wissensstruktur zusammenpassen und ein sinnvolles Gesamtkonstrukt ergeben.

3. Die neue Vorstellung muss durch **Plausibilität** gekennzeichnet sein. Sie darf keine Widersprüche aufweisen, wenn sie in Problemlöseprozessen Anwendung finden soll.
4. Durch die Bedingungen 1 - 3 besitzt die neue Vorstellung **Fruchtbarkeit**. Die neue Vorstellung ist gegenüber der existierenden Vorstellung fruchtbar, wenn sie verständlich, plausibel(er) sowie verlässlich(er) anwendbar ist. Sie muss selbst aktiv (re)konstruiert worden sein und Vorzüge gegenüber der ursprünglichen Vorstellung aufweisen.

Die Berücksichtigung von Alltagsvorstellungen als Lernvoraussetzung für Schüler:innen ist für einen erfolgreichen und nachhaltigen Lehr-Lern-Prozess substanziell. Zahlreiche Studien zu Schüler:innenvorstellungen zum Klimawandel (u. a. Boyes & Stanisstreet, 1997; Schuler, 2011) haben gezeigt, dass einzelne Subkonstrukte des Gesamtkonzeptes Klimawandel besonders anfällig für lebensweltliche Vorstellungen sind und im Widerspruch zu aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen stehen (Abschnitt 2.2.3). Sie zeigen die Relevanz der Erhebung und Einbeziehung der Perspektive der Lernenden beim naturwissenschaftlichen Kompetenzerwerb in Bezug auf das Thema Klimawandel und stellen den Anknüpfungspunkt für *conceptual reconstruction* dar.

### 2.2.3 Präkonzepte zum Klimawandel

Vorangegangene Studien haben gezeigt, dass bestimmte Präkonzepte zum Klimawandel bei Schüler:innen besonders häufig auftreten (u. a. Boyes & Stanisstreet, 1993; Niebert, 2010; Schuler, 2011; Reinfried et al., 2010; Conrad, 2012; Bissinger, 2018). Dabei fokussierten sich die Autor:innen meist ausschließlich auf spezielle Teilaspekte und nicht auf den Klimawandel als Gesamtkonzept. Außerdem bezogen sich die Untersuchungen und Aussagen auf eine Stichprobe aus älteren Schüler:innen der Sekundarstufen, die bereits einige Schuljahre naturwissenschaftlicher Bildung durchlaufen hatten. Der qualitative Vergleich der Studien zeigt, dass bestimmte Konzepte studienübergreifend festgestellt

werden konnten. Wiederkehrende Konzepte zu bestimmten Teilaspekten des Klimawandels sollen in diesem Abschnitt detaillierter ausgeführt werden. Diese sind im Hinblick auf die Untersuchung der Vorstellungen jüngerer Schüler:innen interessant, da sie im Bereich der deduktiven Untersuchung der Daten die theoretische Grundlage darstellen. Um *conceptual growth* oder *conceptual reconstruction* zu ermöglichen, sind insbesondere solche Schüler:innenvorstellungen relevant, die entweder wissenschaftsnahe Anknüpfungspunkte bilden oder mit der wissenschaftlichen Sichtweise inkonsistent sind (Petermann et al., 2008).

#### 2.2.3.1 Lochkonzept versus Glashausmodell

Die atmosphärischen Prozesse des (anthropogenen) Treibhauseffektes sind anfällig für alternative Vorstellungen. Die anthropogene Erwärmung der Atmosphäre wird dabei von Schüler:innen häufig auf die solare Strahlungskomponente zurückgeführt, indem die Vergrößerung der (Ozon)löcher in der Atmosphäre mit einem erhöhten Strahlungs-Eintrag in einen Zusammenhang gebracht wird (Boyes & Stanisstreet, 1997; Niebert, 2010; Reinfried et al., 2010). Die Kausalität dieser Annahme besteht darin, dass der Strahlungs-Input sich mit der Größe der Löcher in der Atmosphäre vergrößert. Da sowohl der Treibhauseffekt als auch die Vergrößerung der Ozonlöcher auf anthropogene Aktivitäten zurückzuführen sind, erscheint eine Verbindung der beiden Wissens Elemente für Schüler:innen plausibel. Dieses Präkonzept wird als *Lochkonzept* bezeichnet (Reinfried et al., 2010). Begründet wird diese Vorstellung von Schüler:innen unter anderem damit, dass die eingetretenen Strahlen der Atmosphäre nicht mehr entweichen können, beispielsweise, weil sie „das Loch nicht mehr finden“ (Boyes & Stanisstreet, 1997; Reinfried et al., 2010). Im Gegensatz dazu ist das *Glashausmodell* eine wissenschaftsnahe Vorstellung (Reinfried et al., 2010). Danach gelangt die Sonnenstrahlung ungehindert durch das Glas hindurch, während die vom Erdboden abgegebene (Wärme-)Strahlung im Glashaus verbleibt, da die Abgase bzw. eine Schicht von Abgasen sie daran hindert, auszutreten (Reinfried et al., 2010). Die solare Strahlungskomponente stellt in dieser Vorstellung eine Konstante dar: Die

Erwärmung der Atmosphäre beruht in dieser Vorstellung auf einem verringerten Strahlungs-Output und ist damit wissenschaftsnäher. Boyes & Stanisstreet zeigten 1993, dass die Vorstellung von Ozonlöchern als Ursache der Erderwärmung bei Schüler:innen der Sekundarstufe 1 alterskonsistent bei über 80 % lag. 2011 identifizierte Schuler (2011) bei über 50 % von Schüler:innen der Sekundarstufe 2 diese Vorstellung.

#### *2.2.3.2 Polareis-Überflutungs-Konzept*

Conrad (2012) und Schuler (2011) konnten zeigen, dass die Vorstellung einer Wirkungskette zwischen dem Schmelzen der Polkappen, dem Anstieg des Meeresspiegels und der Überschwemmung von Küsten besteht. In der Studie von Conrad (2012) gaben über 80 % der Realschüler:innen (n = 47) an, dass durch das Schmelzen von (Meer)eis zusätzliches Wasser hinzukommt und der Meeresspiegel steigt. Er zeigte auch, dass 98 % der Befragten das Schmelzen des Eises *beider* Polarregionen mit dem Anstieg des Meeresspiegels in einen Zusammenhang bringen, obwohl das Schmelzen des Meereises der Arktis nahezu keinen Beitrag zum Meeresspiegelanstieg leistet.

Der Kausalzusammenhang von schmelzendem Eis in den Polarregionen, einem Meeresspiegelanstieg und Überflutungen wird auch von Online-Medien reproduziert (u. a. ARD alpha, 2023; WWF, 2020). Vorstellungen zu thermostatischen Ursachen für den Meeresspiegelanstieg konnten von Schuler (2011) und Conrad (2012) nicht identifiziert werden.

#### *2.2.3.3 Verschmutzungskonzepte*

Im Kontext der Ursachen des Klimawandels sind zudem *Verschmutzungskonzepte* (Niebert, 2010) hervorzuheben. Dabei werden das Ökosystem beeinflussende Faktoren wie Müll, Luftverschmutzung und Ölpest (Niebert, 2010), Giftstoffe und Atomunfälle (Conrad, 2012) oft direkt mit der globalen Erwärmung in einen Zusammenhang gebracht. Demzufolge werden die anthropogenen Ursachen verschiedener Umweltprobleme oft miteinander vermischt.

#### *2.2.3.4 Fotosynthese*

Bissinger (2012) zeigte, dass das Themengebiet Fotosynthese besonders anfällig für nicht-wissenschaftliche Präkonzepte ist. Sie stellte fest, dass die menschliche Eigenschaft, organische Nahrungsmittel aufzunehmen, auf Pflanzen übertragen wird. Pflanzenwachstum wird von Zehntklässler:innen mit Sonneneinstrahlung sowie der Aufnahme von Erde als Nahrungsquelle assoziiert (auch Haslam & Treagust, 1987). Im Kontext des Klimawandels ist diese Vorstellung relevant, da Pflanzen als autotrophe Primärproduzenten eine bedeutsame Senke für das Treibhausgas CO<sub>2</sub> darstellen und das anorganische Gas selbstständig in organische Biomasse umwandeln. Niebert (2010) untersuchte Schüler:innenvorstellungen zur Rolle des Kohlenstoffdioxid im Kohlenstoffkreislauf. Die Hälfte der Schüler:innen der Sekundarstufe 2 führte den Anstieg des Treibhausgases in der Atmosphäre auf die wissenschaftsnahe Vorstellung eines antropogenen Ungleichgewichtes von Verbrennung und Abholzung zurück (Niebert, 2010). Etwa 40 % schrieben hingegen ausschließlich Verbrennungsprozessen eine Bedeutung zu, ohne die Pflanzen im Klimasystem zu berücksichtigen.

#### 2.2.4 Experimentelles Lernen (an außerschulischen Lernorten)

Da der Klimawandel mit nicht direkt wahrnehmbaren Prozessen einhergeht, können Klimaveränderungen vom Individuum nicht unmittelbar beobachtet werden (Reinfried, et al., 2010). Diese „Wahrnehmungsdefizite“ (Reinfried et al., 2010) tragen zu realitätsverzerrenden Vorstellungen bei, der grundlegenden Annahme folgend: „Was man nicht sieht, das existiert auch nicht!“ (Marohn & Messing, 2021). Um Kausalzusammenhänge naturwissenschaftlicher Phänomene beobachtbar zu machen, eignen sich Experimente, da durch sie „Ursache-Wirkungs-Beziehungen“ (Gropengießer et al., 2017) untersucht werden. Ob lebensweltlich oder wissenschaftlich - eine Theorie kann durch systematisches Vorgehen und das Prüfen von Hypothesen nachhaltig verändert werden (Gropengießer et al., 2017). Daher haben Experimente neben der Funktion des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns auch das Potential, subjektive Theorien von Schüler:innen zu verändern.

Für aufwendige, zusammenhängende oder zeitintensive Experimente kann es sich im schulischen Kontext anbieten, zusätzlich außerschulische Lernorte zu nutzen. In einem „authentischen Laborkontext [können sich Schüler:innen hier projektartig, kooperativ und aktiv mit] lebensweltbezogenen, authentischen Problemen“ (Gropengießer et al., 2018, S. 432) befassen. Eine experimentelle Ausrichtung kann Erlebnisse ermöglichen, die neben den kognitiven auch die affektiven Domänen ansprechen (Sellmann, D. (2012).

Da der Klimawandel nicht direkt als Inhalt in den Rahmenlehrplänen der Bundesländer Berlin und Brandenburg aufgeführt wird (nicht vorhanden in: Naturwissenschaften für die Primarstufe, Chemie für die Sekundarstufe I, Biologie für die Sekundarstufe I; vorhanden in Geografie für die Sekundarstufe I in Klasse 10; LISUM, 2015a-d), bieten Schüler:innenlabore das Potential, den Klimawandel thematisch aufzugreifen, wissenschaftlich fundierte Fachinhalte zu vermitteln, diese altersentsprechend didaktisch zu reduzieren und gleichzeitig die Vorstellungen der Lernenden miteinzubeziehen und so zu einer ganzheitlichen Klimabildung beizutragen.

## 3 Forschungsfragen und Erwartungen

### 3.1 Forschungsfragen

Auf der Lehr-Lern-Prozessebene bilden Schüler:innenvorstellungen den Anknüpfungspunkt für *conceptual reconstruction* und ein erfolgreiches nachhaltiges Lernen. Die inhaltliche Komplexität des Themas Klimawandel begünstigt lebensweltnahe Präkonzepte, die nicht mit der naturwissenschaftlichen Sichtweise übereinstimmen (Abschnitt 2.2.3). Da sich vorherige Studien mit den Vorstellungen älterer Schüler:innen befasst haben, werden im Rahmen dieser Arbeit Präkonzepte von Schüler:innen erfasst, die sich in der Anfangsphase des naturwissenschaftlichen Unterrichtes befinden. Die Rahmenlehrplaninhalte in Berlin und Brandenburg ermöglichen Lehrkräften indirekt, verschiedene fachwissenschaftliche Aspekte des Klimawandels in ihrem eigenen Unterricht aufzugreifen oder entsprechende außerschulische Lerngelegenheiten zu nutzen. Mit der Erhebung und Analyse von Präkonzepten der jungen Lernenden der fünften Klassenstufe soll daher die Lernausgangslage erfasst werden, die als Grundlage für das fachdidaktisch fundierte Planen, Durchführen und Auswerten von Lerngelegenheiten zum Klimawandel dienen kann. Aus diesem Ziel ergibt sich folgende Hauptfragestellung:

***Welche Präkonzepte haben Schüler:innen der fünften Jahrgangsstufe zum Klimawandel?***

Aufgrund der Komplexität des Themas soll die Hauptfragestellung in zwei Unterfragestellungen aufgegliedert werden. Unter der Annahme, dass komplexe subjektive Theorien aus einzelnen Denkfiguren, untergeordneten Konzepten und einzelnen Begriffen aufgebaut sind (Gropengießer, 2001), sollen die Fragestellungen zwei verschiedene Ebenen der komplexen Vorstellungen erfassen:

Fragestellung 1:

**Welche Vorstellungselemente haben Schüler:innen der fünften Jahrgangsstufe innerhalb der Denkfiguren zu den a) Ursachen, b) Folgen und c) Handlungsoptionen in Bezug auf den Klimawandel?**

Fragestellung 2:

**Welche erklärenden Zusammenhänge nutzen einzelne Schüler:innen innerhalb ihrer individuellen subjektiven Theorie zum Gesamtbereich Klimawandel?**

Erhebungen vorangegangener Studien in den Sekundarstufen legen nahe, dass bestimmte Präkonzepte besonders häufig von Schüler:innen reproduziert werden. Im Rahmen der Hauptfragestellung soll vergleichend mit vorangegangenen Studien diskutiert werden, inwiefern Präkonzepte älterer Schüler:innen auch bei jüngeren Schüler:innen zu identifizieren sind.

### 3.2 Erwartungen

Ob und inwiefern Schüler:innen der *Primarstufe* bereits über Konzepte, Denkfiguren oder subjektive Theorien zum Klimawandel verfügen, wurde bis jetzt noch nicht untersucht. Die Stichprobe umfasst Schüler:innen des naturwissenschaftlichen Anfangsunterrichts, sodass davon auszugehen ist, dass der Großteil der Schüler:innenvorstellungen auf nicht-unterrichtlichen Quellen basiert. Die geringe Lebenserfahrung und der niedrige Ausbildungsstand der jungen Zielgruppe lassen annehmen, dass die Schüler:innenvorstellungen

- a) eher lebensnah als wissenschaftsnah sind,
- b) einen geringen Komplexitätsgrad aufweisen und
- c) es durch Wissenslücken zu Vermischungskonzepten kommt.

Untersuchungen zu Präkonzepten älterer Schüler:innen legen nahe, dass auch ein großer Teil der Lernenden während der Schullaufbahn falsche bzw. nicht-wissenschaftliche



Konzepte entwickelt (u. a. Reinfried et al., 2010). Wenn diese Konzepte auf Alltagserfahrungen beruhen, ist zu erwarten, dass sie ebenfalls bei den Primarschüler:innen vorkommen. Wenn die Konzepte jedoch auf den naturwissenschaftlichen Unterricht zurückzuführen sind, so sind diese bei den Primarschüler:innen eher nicht zu erwarten.

## 4 Methoden

Das Ziel dieser Arbeit war, Schüler:innenvorstellungen von Lernenden des naturwissenschaftlichen Anfangsunterrichts zum Themenbereich Klimawandel zu ermitteln und Anknüpfungspunkte für didaktische Implikationen zu identifizieren. Das Methodenspektrum zur Erfassung von Schüler:innenvorstellungen ist breit und die Methodenwahl abhängig vom Ziel (Schuler, 2011). Die Fragestellungen dieser Arbeit zielten auf zwei Ergebnisse ab:

I) die Häufigkeit bestimmter Vorstellungselemente von Berliner Primarschüler:innen zu erfassen, um aus einer möglichst großen Stichprobe Aussagen über die Lernausgangslage der Grundgesamtheit treffen zu können und

II) qualitativ einen möglichst tiefgehenden Einblick in die subjektive Vorstellungswelt einzelner Schüler:innen zu gewinnen, um individuelle Erklärungsansätze für Prozesszusammenhänge im Klimasystem als Anknüpfungspunkt für *Conceptual Change* zu identifizieren. Um tiefgehenden Zugang zu kindlichen Vorstellungen zu erlangen, eignen sich Methoden wie Interviews, Zeichnungen oder Strukturlegetechniken (Heinrich-Dönges et al., 2018).

Um beide Ziele zu erreichen, wurden daher zwei Erhebungsinstrumente genutzt; ein Fragebogen sowie leitfadenorientierte Einzelinterviews.

### 4.1 Stichprobe

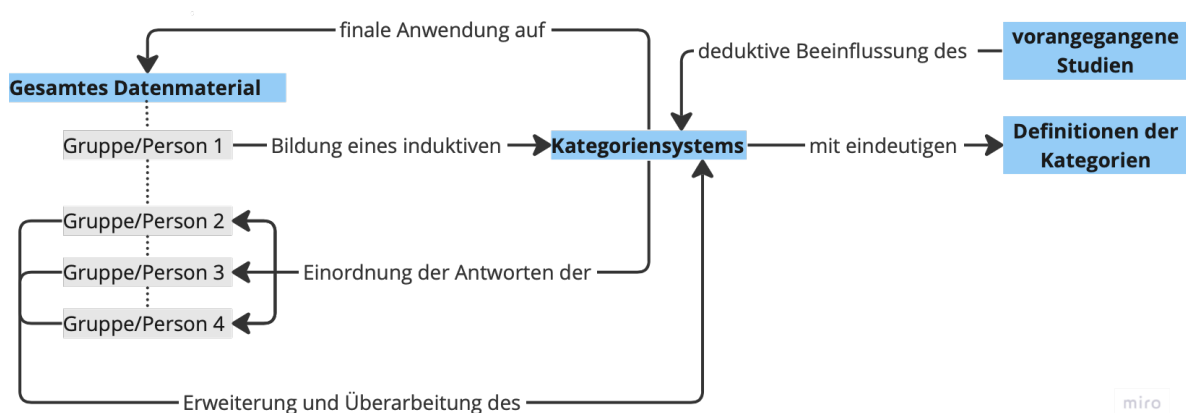
Mit dem Ziel, die Lernausgangslage von Primarschüler:innen in Bezug auf den Klimawandel zu ermitteln, setzte sich die Stichprobe aus Schüler:innen der fünften Jahrgangsstufe zusammen, die das Schülerlabor NatLab der Freien Universität Berlin im Rahmen ihres naturwissenschaftlichen Anfangsunterrichts besuchten. In Bezug auf das Alter, das Bundesland, die Jahrgangsstufe und den Schultyp Grundschule war die Grundgesamtheit weitestgehend homogen. Um die Beeinflussbarkeit der Daten durch lerngruppenspezifische Charakteristika – wie die Lehrkraft oder das Schulprofil – zu minimieren, wurden vier

verschiedene Lerngruppen von drei verschiedenen Grundschulen in Berlin einbezogen. Insgesamt wurden 78 Berliner Grundschüler:innen (36 weiblich, 42 männlich) der fünften Klassenstufe zu ihren Präkonzepten zum Klimawandel schriftlich befragt. Die schriftliche Einzelbefragung wurde anonym, freiwillig und mit Einverständnis der Lehrkraft im Schülerlabor NatLab der Freien Universität Berlin durchgeführt. Das Alter der Lernenden lag zwischen 10 und 12 Jahren mit einem Median von 11 Jahren. Drei der Fünftklässler:innen wurden zusätzlich mündlich interviewt. Die Stichprobe für die Interviews setzte sich aus Schüler:innen zusammen, die sich freiwillig meldeten und Interesse an der Teilnahme bekundeten.

#### 4.2 Qualitativ-orientierter Forschungsansatz

Da noch keine Studien über die Präkonzepte von Lernenden der Primarstufe vorliegen, sollte der Gegenstandsbereich möglichst offen erkundet werden. Die Datenerhebung erfolgte daher qualitativ und explorativ durch offene Fragestellungen über einen Fragebogen und leitfadenorientierte Einzelinterviews. Der qualitative Forschungsansatz wurde für das Erheben von Schüler:innenvorstellungen gewählt, da am Individuum angesetzt wird und durch induktives Vorgehen verallgemeinernde Aussagen abstrahiert werden können. Das Hineinversetzen in die Gedankenwelt eines Individuums wird auch als *Introspektion* bezeichnet. Da so die volle Komplexität eines Gegenstandes erfasst werden kann (Mayring, 2015), war das Vorgehen in Bezug auf die Fragestellungen zielführend. Im Gegensatz dazu steht die quantitative Forschung, die an allgemeinen Prinzipien und Gesetzen ansetzt und durch trennscharf getrennte Variablen die Erhebung isolierter und möglichst störungsfreier Daten zulässt (Mayring, 2015). Theoretisch wäre es möglich, die Zustimmung oder Ablehnung bestimmter lebenswelt- oder wissenschaftsnaher Vorstellungen durch quantitatives und deduktives Vorgehen zu quantifizieren. Damit würden allerdings nur Teilaspekte abgedeckt werden, die der Komplexität des Themas Klimawandel und der Individualität von Vorstellungen nicht gerecht werden.

Um die qualitativen Daten quantifizierbar zu machen und Verallgemeinerungen zu ermöglichen, bietet sich ein *qualitativ-orientiertes Vorgehen* nach dem *Mixed-Method-Ansatz* an, das neben qualitativen zusätzlich quantitative Analyseschritte beinhaltet (Mayring, 2015). Der Hauptbestandteil der qualitativ-orientierten Inhaltsanalyse nach Mayring besteht in der Entwicklung, Anpassung und Anwendung eines induktiven Kategoriensystems. Ein Kategoriensystem dient der Vergleichbarkeit von Ergebnissen und der Erhöhung der Reliabilität (Mayring, 2015). Die offene Gegenstandserkundung ermöglicht eine inhaltliche Kategorisierung von Aussagen oder Aussageelementen, die zunächst das Grundgerüst für die Einordnung weiterer Daten bildet. Das Kategoriensystem wird kontinuierlich angepasst und schlussendlich auf den gesamten Datensatz angewendet (Abb. 5).



**Abb. 5 Allgemeines Vorgehen: Entwicklung, Anpassung und Anwendung eines induktiven Kategoriensystems.** Konkret erfolgte die Anpassung des Kategoriensystems anhand der Datensätze für die Lerngruppen („Gruppe 1 - 4“) bei der Fragebogenerhebung und anhand der Einzelfälle („Person 1 – 4“) bei der Interviewauswertung. Angepasst nach Mayring, 2015.

Insbesondere qualitatives bzw. qualitativ-orientiertes Vorgehen eignet sich für die Erhebung von Schüler:innenvorstellungen. Jedoch kann der Einzelfallorientierung aufgrund der Zufälligkeit der Daten – je nach Fragestellung - eine mangelnde Verallgemeinerbarkeit unterstellt werden. Hier gilt: Je repräsentativer die Stichprobe ist, desto eher ist eine Verallgemeinerung und Quantifizierung möglich (Mayring, 2015).

Zur Beantwortung der Fragestellung 1 sollte die Stichprobe daher möglichst viele Individuen von verschiedenen Schulen umfassen. Fragestellung 2 zielte auf das tiefergehende Verständnis individueller Aussagen ab. Ein eindeutiges Kategoriensystem (Abb. 5) ermöglichte hier die Vergleichbarkeit einzelner subjektiver Theorien, wobei die Aussagekraft über die Grundgesamtheit eingeschränkt war.

Um eine konkretere Vergleichbarkeit der Daten mit in vorangegangenen Studien ermittelten Konzepten zu ermöglichen, wurde das offene induktive Vorgehen um einen deduktiven Schritt ergänzt. Dafür wurden zwei der meistgeäußerten lebensweltnahen Konzepte zum Treibhauseffekt sowie zum Schmelzen von Polareis (nach Schuler, 2011; Conrad, 2012) durch deduktives Vorgehen ermittelt (Abb. 5).

### 4.3 Datenerhebung und -auswertung

#### 4.3.1 Datenerhebung 1: Schriftliche Befragung mittels Fragebogen

Die erste Erhebung erfasste explorativ und induktiv, welche elementaren Vorstellungen Schüler:innen der fünften Jahrgangsstufe zu den Ursachen, Folgen und Handlungsoptionen in Bezug auf den Klimawandel haben. Außerdem wurden einzelne Vorstellungselemente auf der Prozessebene der Entstehung der Erderwärmung erhoben, um durch deduktives Vorgehen Elemente des *Lochkonzepts* bzw. *Glashausmodells* und ggf. der *Fotosynthese* (Abschnitt 2.2.3) zu identifizieren. Eine weitere Frage diente der Identifikation von Vorstellungselementen zum Schmelzen von Meereis vor dem Hintergrund des *Polareis-Überflutungs-Konzeptes* (Abschnitt 2.2.3).

Der Hauptuntersuchung ging eine Pilotierung voraus, in der vier Schüler:innen verschiedene Fragebogenformate ausfüllten. Dabei stellte sich heraus, dass quantifizierbare Zustimmung- und Ablehnungs-Antworten anhand einer Likert-Skalierung anhand von Aussagen von älteren Schüler:innen (u. a. aus Reinfried et al., 2010) kognitiv überfordernd waren. Außerdem führten komplexe Fragen, die mehr als eine Denkfigur beinhalteten (zum Beispiel Verursacher und Ursachen sowie Folgen und Betroffene in einer Frage (aus Schuler,

2011)) zu lückenhaften Antworten und waren für die Schüler:innen schwer verständlich. Der finale Fragebogen wurde angepasst an Schuler (2011) und Conrad (2012) altersentsprechend reduziert und operationalisiert (Anhang 9.1.1). Im Laufe der Untersuchung wurde der Fragebogen nochmals angepasst (Anhang 9.1.2). Der Fragebogen wurde den verschiedenen Lerngruppen im Schüler:innenlabor Natlab der Freien Universität Berlin jeweils morgens um 9.00 Uhr vor Kursbeginn ausgegeben.

Der schriftlichen Befragung gingen jeweils folgende Bearbeitungshinweise voraus:

- 1) Die Befragung ist anonym und freiwillig.
- 2) Die Bearbeitung erfolgt in Einzelarbeit.
- 3) Es soll zuerst die Vorder-, dann Rückseite bearbeiten werden.
- 4) Es gibt keine falschen Antworten!
- 5) Wer Interesse hat, kann freiwillig und anonym an einem Interview teilnehmen.

#### 4.3.2 Datenerhebung 2: Leitfadenorientierte Einzelinterviews

Während es in der Fragebogenerhebung darum ging, einzelne Vorstellungselemente innerhalb der *Denkfiguren* zu Ursachen, Folgen, Handlungsoptionen und Prozessen zu identifizieren, zielten die Einzelinterviews darauf ab, erklärende Zusammenhänge innerhalb der individuellen *subjektiven Theorien* (nach Gropengießer, 2001) zum Gesamtbereich Klimawandel zu erfassen. Da „Sprache [...] das Abbild von Präkonzepten“ (Straub und Thesing, 2023, S. 40) ist, eignen sich insbesondere Interviews für eine explorative Gegenstandserhebung von subjektiven Sichtweisen und Theorien. Da der Klimawandel die zentrale Problematik der Befragung darstellt, eignet sich das problemzentrierte Interview nach Witzel (1985). Anhand eines halbstrukturierten Leitfadens wurde daher eine offene Befragung durchgeführt, die auf eine möglichst freie Beantwortung der Fragen abzielte und auf eine „bestimmte Problemstellung [hier: den Klimawandel] zentriert“ (Kurz et al., 2007, S. 265) war. Interne kognitive Gedächtnisinhalte können neben der Verbalisierung

außerdem über Strukturvisualisierungsverfahren sichtbar gemacht werden. Diese bieten den Vorteil, Assoziationsstrukturen innerhalb individueller subjektiver Theorien (Duit et al, 1981) durch *Mappings* in eine äußere Struktur zu überführen (Schuler, 2011).

Methodisch wurde die Erfassung der Komplexität individueller kognitiver Konzepte daher durch drei Einzelinterviews mit simultaner Strukturvisualisierung (angepasst nach Schuler, 2011) umgesetzt, die auf die Fragebogenerhebung aufbauten. Einzelne Vorstellungselemente der Fragebogenerhebung sollten dafür miteinander in Verbindung gebracht werden. Dafür wurden in Vorbereitung auf das Interview einzelne Antwortelemente des Fragebogens als Begriffe auf Karteikarten geschrieben. Im Interview konnten die einzelnen Elemente wahlweise verbal oder haptisch strukturiert und in einen Zusammenhang gebracht werden (Anhang 9.5).

Die Auswahl der Schüler:innen erfolgte nicht zufällig, sondern anhand individueller Interessensbekundungen, am Interview teilnehmen zu wollen. Die Schüler:innen wurden vor dem Interview darüber aufgeklärt, dass das Interview anonym und freiwillig ist, eine Audioaufnahme durchgeführt wird und dass sie ihr Einverständnis jederzeit widerrufen können. Die teilstrukturierten leitfadenorientierten Einzelinterviews folgten der inhaltlichen Struktur des Fragebogens, wobei die Reihenfolge je nach Gesprächsverlauf variiert wurde (Anhang 9.2). Zusätzlich zum Fragebogen genannte Begriffe wurden während des Interviews in den Notizen festgehalten und nachträglich in der gelegten Struktur ergänzt. Die Struktur wurde nach Abschluss des Interviews fotografiert. Die Dauer der Interviews lag bei maximal 15 Minuten.

#### 4.3.3 Datenauswertung 1: Fragebögen

Die Auswertung der Fragebögen erfolgte *qualitativ-orientiert* nach der Frequenzanalyse nach Mayring, 2015 über das Aufstellen eines zyklisch angepassten Kategoriensystems (Abb. 5). Für jede einzelne Fragestellung wurden einzelne Textelemente aus den Antworten extrahiert, in Excel übertragen und kategorisiert. Die Analyseeinheiten umfassten mindestens ein Wort oder eine Wortersatzkonstruktion (z. B. „CO<sub>2</sub>“) und maximal einen

Abschnitt aus mehreren Sätzen, wenn diese nur Aussagen zu einem einzelnen Element enthielten. Beinhalteten die Sätze mehr als eine Assoziation zu einer der Denkfiguren, zum Beispiel in Form von Auflistungen, wurde der Inhalt mehreren Kategorien zugeordnet. Die abschließende Codierung des gesamten Datenmaterials erfolgte anhand des finalen Kategoriensystems (Anhang 9.3). Die Verrechnung der einzelnen Kategorien erfolgte quantifizierend über eine Häufigkeitsanalyse mittels Microsoft Excel. Bei den Fragen 3, 4 und 7 erfolgte die Kategorisierung rein induktiv. Die Auswertung der Fragen 5 und 6 erfolgte unter dem Einfluss vorangegangener fachdidaktischer Studien und schloss theoriegeleitetes deduktives Vorgehen mit ein.

#### 4.3.4 Datenauswertung 2: Einzelinterviews

Die Audioaufnahmen der Interviews wurden in MAXQDA nach den Transkriptionsregeln nach Kuckartz (2014) (Tab. 3) in Textform überführt. Die Transkription erfolgte wörtlich, wobei umgangssprachliche Aussagen an das Schriftdeutsche angepasst wurden. Lautäußerungen (*Äh, Hm, Mhm, ...*) wurden nicht transkribiert, wenn sie nicht inhaltsrelevant waren. Die interviewende Person wurde mit einem I, die befragte Person mit B kenntlich gemacht (Kuckartz, 2014).

**Tab. 3 Regeln für die Transkription der Einzelinterviews.** Angepasst nach Kuckartz, 2014.

Zeichen	Bedeutung
(...)	Sprechpause (> 1 Sekunde)
Die Tiere sind <u>besonders</u> gefährdet	Betonte Begriffe
(Lachen, Seufzen)	Non-verbale inhaltsrelevante Reaktionen
((zeigt auf das Bild))	Non-verbale inhaltsrelevante Aktivitäten
[Handy klingelt]	Störungen, Unterbrechungen
I	Interviewerin
B1 - 3	Befragte*r
(unv.)	Unverständliche Äußerung
(Person X)	Anonymisierung



Die qualitative Inhaltsanalyse erfolgte schrittweise und regelgeleitet nach Mayring, 2015 (Abb. 6). Im ersten Schritt erfolgte eine Paraphrasierung der Aussagen: Inhaltstragende Textbestandteile wurden in die grammatikalische Kurzform überführt, Ausschmückungen wurden gestrichen. Im zweiten Schritt wurden die einzelnen Paraphrasen auf ein höheres Abstraktionsniveau generalisiert (z. B. „Es wird wärmer“ → Erderwärmung; „Die eingetretenen Strahlen bleiben drinnen“ → Verringerter Strahlungs-Output). Im dritten Schritt erfolgte eine Reduktion durch das Streichen bedeutungsgleicher Generalisierungen. Im vierten Schritt wurden induktive Kategorien aus den jeweiligen Generalisierungen nach dem Verlaufsschema in Abb. 5 (Abschnitt 4.1) gebildet. Zur Vereinfachung der Strukturierung in der Concept Map wurden den einzelnen Kategorien sechs Konstrukte zugeordnet: Verursacher, Ursachen, Subsystematische Prozesse (u. a. Treibhauseffekt, Eisschmelze, Pflanzen), Folgen, Betroffene und Handlungsperspektiven. Nach Finalisierung des Kategoriensystems (Anhang 9.6) erfolgte die Codierung des gesamten Rohmaterials in MAXQDA. Die Anwendung des gleichen Kategoriensystems auf die verschiedenen Interviews sollte hier eine Vergleichbarkeit ermöglichen, zumindest im Rahmen deckungsgleicher Kategorien.

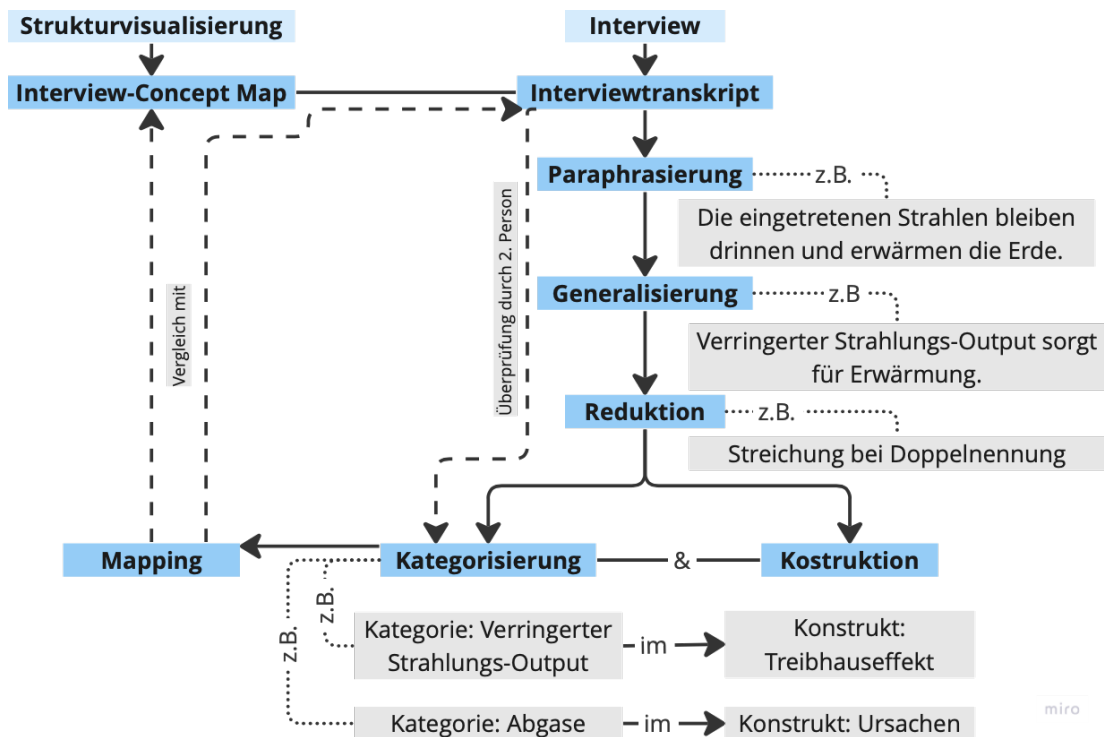
Ziel der Aufbereitung des Materials war, die internen kognitiven Konzepte in eine äußere Assoziationsstruktur zu überführen. Die Visualisierung der individuellen Konzepte erfolgte mit dem Online-Programm Miro. Jeder Code wurde als Element in einer Map dargestellt. Elementzusammenhänge (z. B. führt zu, Vergrößerung/Verringerung von, abgegeben von) wurden anhand der Generalisierungen als Pfeil dargestellt. Zur Erhöhung der Validität wurde die Concept-Map mit dem Foto der gelegten Struktur aus dem Interview sowie mit dem ursprünglichen Transkript verglichen. Bei Abweichung der Anordnung erfolgte eine Überprüfung der einzelnen Auswertungsschritte, sodass beispielsweise Generalisierungen überarbeitet bzw. die Concept-Maps angepasst wurden.

Zur Überprüfung der Intercoder-Reliabilität wurde das Rohmaterial (Interviewtranskripte) von einer zweiten Person durch Anwendung des induktiven Kategoriensystems codiert (Rädiker & Kuckartz, 2018). Nach der ersten Überprüfung der Intercoder-Übereinstimmung

wurde das Codesystem spezifiziert und das Material unabhängig voneinander ein zweites Mal codiert. Die Codier-Einheit war jeweils ein Interview-Transkript. Die der Inter-coder-Reliabilität wurde über den Koeffizienten Kappa nach Brennan & Prediger (1981) bestimmt für:

1. Die Übereinstimmung der mind. einmaligen Vergebung eines Codes.
2. Die Übereinstimmung der Codierung innerhalb einzelner Antworten (Segmente).

Auf die Übereinstimmung der Anzahl der Vergabungen der Codes wurde verzichtet, da die Interviews auf die Qualität der Aussagen analysiert werden sollte, die eine Quantifizierung einzelner Elemente nicht erforderte.



**Abb. 6 Schritte der qualitativen Inhaltsanalyse von Einzelinterviews nach Mayring.** Die Aussagen des Interviews wurden paraphrasiert, auf eine höhere Abstraktionsebene generalisiert und nach einer Reduktion irrelevanter Informationen anhand eines Kategoriensystems codiert und in Einzel-Mappings überführt. Abbildung angepasst nach Mayring, 2015 und Schuler, 2011.

## 5 Ergebnisse

Die Relevanz dieser Erhebung ergab sich aus der fehlenden Datenlage zu Präkonzepten von Primarschüler:innen in Berlin, der zunehmenden Bedeutsamkeit des Klimawandels im Alltag der Schüler:innen, in ihrem zukünftigen Leben sowie einer bedarfsorientierten Entwicklung von Lerngelegenheiten. Zunächst wurden die genutzten Informationsquellen der befragten Schüler:innen zum Thema Klimawandel quantifiziert. Die einzelnen Vorstellungselemente der Schüler:innen innerhalb der einzelnen Denkfiguren Ursachen, Folgen und Handlungsperspektiven wurden induktiv kategorisiert und über eine Frequenzanalyse quantifiziert. Vorstellungselemente innerhalb der Prozesse des anthropogenen Treibhauseffektes sowie des Schmelzens von Meereis wurden teils deduktiv kategorisiert und frequenzanalytisch ausgewertet. Individuelle subjektive Theorien einzelner Schüler:innen wurden anhand der Interview-Transkripte in MAXQDA codiert und mit Miro in Concept-Maps visualisiert.

### 5.1 Der Klimawandel im Unterricht und im Alltag

Drei Viertel der befragten Fünftklässler:innen (73,1 %; n = 78) gaben an, dass der Klimawandel noch nicht in ihrem Unterricht thematisiert wurde. Die Informationsquellen zum Klimawandel sind überwiegend außerschulischen Ursprungs, wobei der Großteil der Schüler:innen ihre Informationen aus den digitalen, neuen und sozialen Medien (64,1 % Fernsehen, 35,9 % Internet, 30,8 % Social Media) sowie durch ihre Familie (47,4 %) und Freunde (20,5 %) beziehen. Printmedien, wie Zeitungen oder Plakate, spielen eine untergeordnete Rolle. Abb. 7 zeigt die detaillierte Aufschlüsselung der einzelnen Informationsquellen.

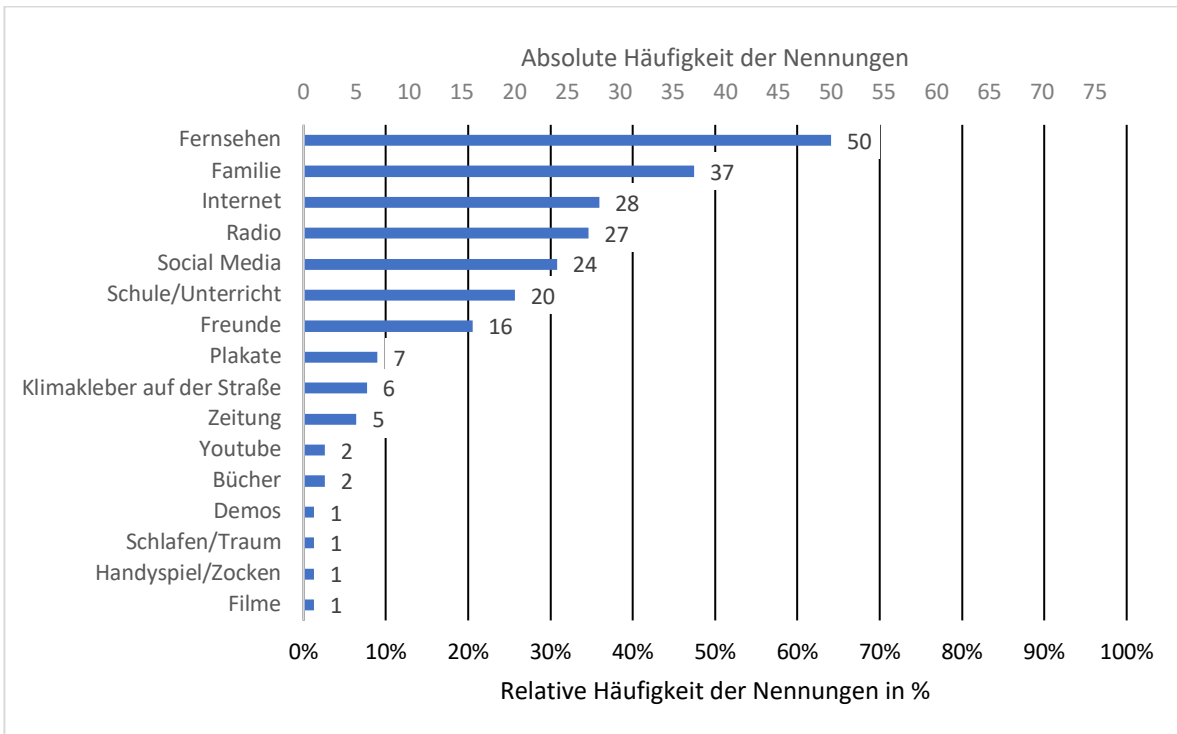


Abb. 7 Von Berliner Fünftklässler:innen (n = 78) genutzte Informationsquellen zum Thema Klimawandel.

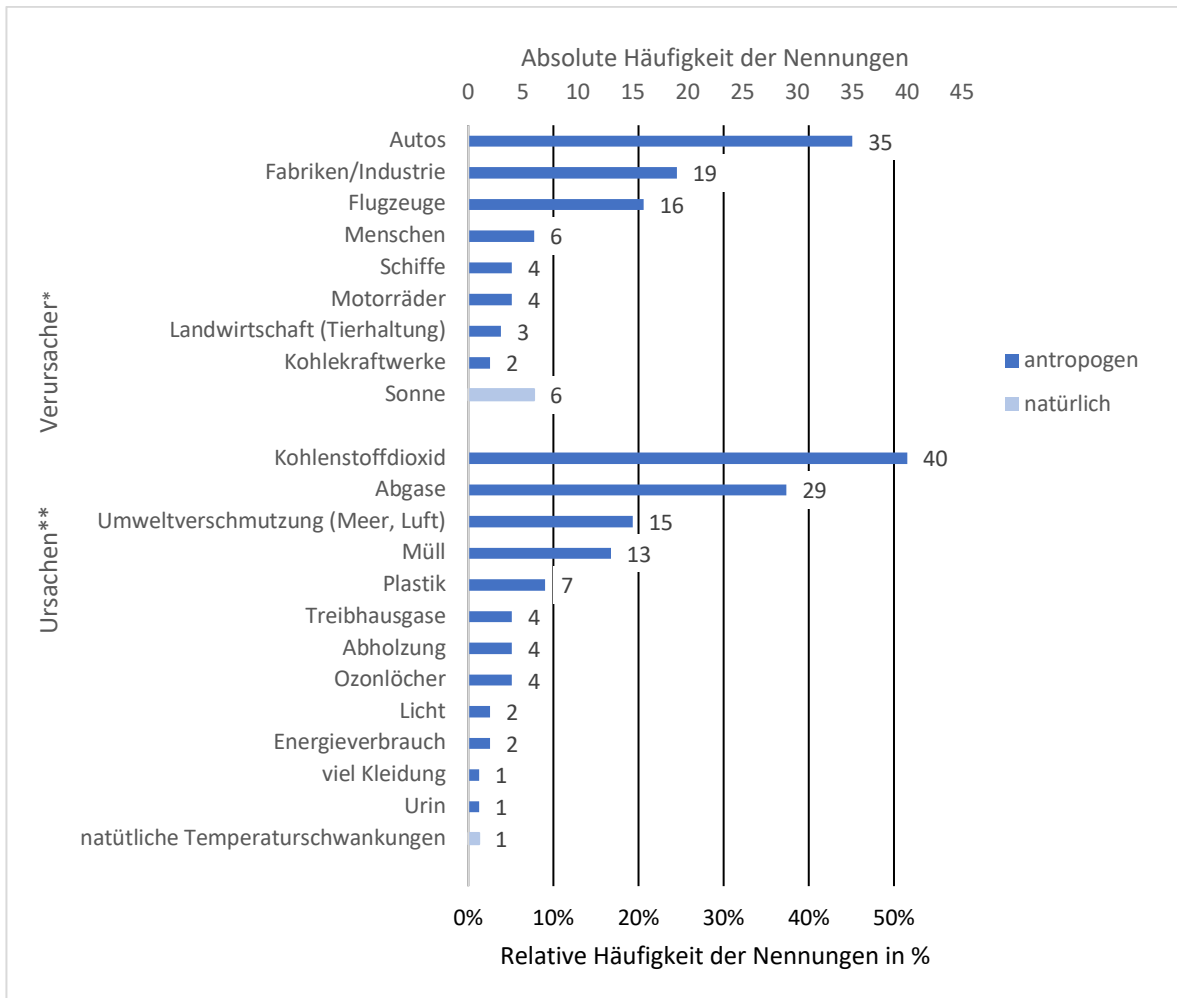
## 5.2 Fragebogenerhebung: Elementare Schüler:innenvorstellungen

Über den Fragebogen wurde ermittelt, welche elementaren Vorstellungen Schüler:innen der fünften Jahrgangsstufe innerhalb der Denkfiguren Ursachen, Folgen und Handlungsoptionen in Bezug auf den Klimawandel haben.

### 5.2.1 Vorstellungen über Ursachen des Klimawandels

Die Pilotierung zeigte, dass eine Differenzierung zwischen Verursachern und Ursachen für die jungen Lernenden überfordernd war. Daher wurden die Antworten zu den Ursachen des Klimawandels in der Datenauswertung kategorisiert. Als Verursacher für den Klimawandel wurden hauptsächlich anthropogene Quellen (Autos 44,9 %, Flugzeuge 20,5 %, Schiffe 5,1 %, Motorräder 5,1 %) sowie Fabriken und die Industrie (24,4 %) angegeben (Abb. 8). 7,7 % geben die Sonne als nicht-anthropogen Quelle des Klimawandels an. Mit über 50 %

wurde CO<sub>2</sub> als Hauptursache für den Klimawandel angegeben. Ohne eine Angabe der Art des Gases, stehen Abgase (37,2 %) an zweiter Stelle der angegebenen Ursachen, eine Spezifizierung auf Treibhausgase nehmen 5,1 % vor. Die Umweltverschmutzung, Müll und Plastik (19,2 %; 16,7 %; 9 %) werden ebenfalls unter den Top 10 der Ursachen genannt.



**Abb. 8 Verursacher und Ursachen des Klimawandels aus Sicht von Berliner Fünftklässler:innen (n = 78).**

\* Verursacher = Emissions- und/oder Strahlungsquellen, die anthropogen und natürlich sein können;

\*\* Ursachen = Im Klimasystem wirksame Faktoren, die einer Quelle entspringen.

### 5.2.2 Vorstellungen über die Folgen des Klimawandels

Die Mehrheit der Schüler:innen (60,3 %) ist sich sicher, dass der Klimawandel zu einer Erderwärmung führt (Abb. 9). An zweiter Stelle folgt das Tiersterben, das etwa ein Drittel (29,5%) der Schüler:innen mit dem Klimawandel assoziiert. Der Rückgang der Kryosphäre durch Schmelzprozesse in den Polar- (20,5 %) und Gletscher-Regionen (15,4 %) wird genannt sowie Extremwetterereignisse (15,4 %) und Überschwemmungen (14,1 %).

In den Vorstellungen der Schüler:innen beschränken sich die Folgen der Klimaänderungen größtenteils auf die Biosphäre. Vorstellungen über die Auswirkung im ökonomischen sowie im sozialen Bereich (Abschnitt 2.1.3) werden kaum direkt geäußert. Die mit dem Klimawandel assoziierten Folgen sind bei den Schüler:innen fast ausschließlich negativ konnotiert, einschließlich der dystopischen Vorstellung, dass "die Welt untergeht". Ein Schüler sieht im Klimawandel jedoch das Potential dafür, dass „neue Technik entsteht“.

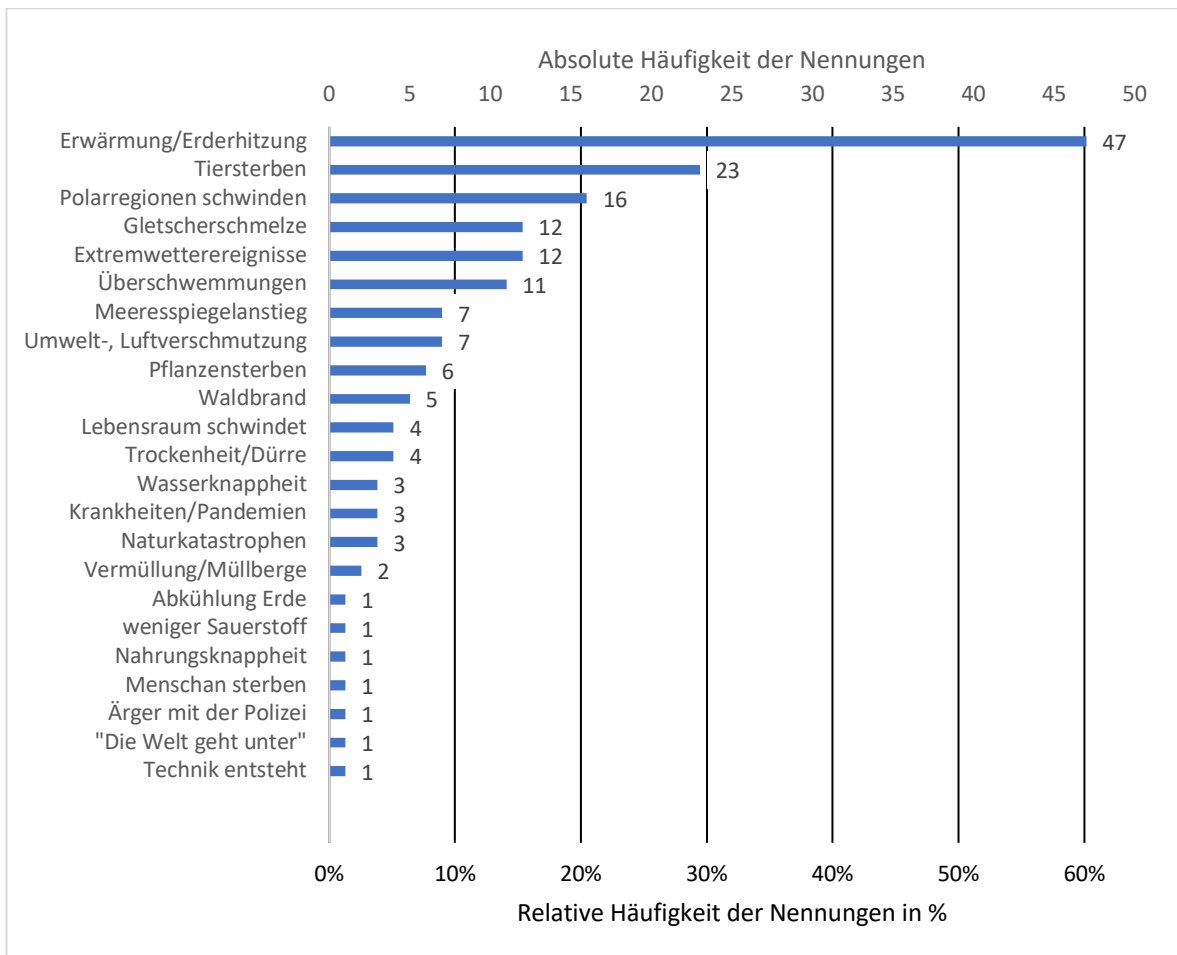


Abb. 9 Folgen des Klimawandels aus Sicht von Berliner Fünftklässler:innen (n = 78).

### 5.2.3 Vorstellungen über die Handlungsmöglichkeiten im Klimawandel

Vorstellungen über die Handlungsoptionen im Klimawandel geben Aufschluss über die Beeinflussbarkeit der Ursachen (kuratives Handeln) und Folgen (symptomatisches Handeln) des Klimawandels. Wenngleich die Frage darauf abzielte, bestimmte Elemente innerhalb der Denkfigur der Handlungsoptionen zu ermitteln, stehen diese in einem übergeordneten Zusammenhang mit den anderen Fragestellungen. Die Antworten können daher auch Einblicke in elementübergreifende Denkfiguren geben.

Der Beeinflussbarkeit des Klimawandels wird von über zwei Dritteln der Schüler:innen einer Änderung in der Verkehrsmittelnutzung zugeschrieben (Abb. 10). Da die

Verkehrsmittelnutzung in den Vorstellungen der Schüler:innen als Hauptverursacher für den Klimawandel gilt (Abb. 8), zeigt sich in den Handlungsoptionen, dass ein Großteil der Schüler:innen bei einer kurativen Ursachenbekämpfung ansetzen würde. Auch die Verbesserung der Abfallsysteme (42,3 %) passt zu den Angaben zu den beiden Klimaursachen Verschmutzung und Müll (19,2 %; 16,7 %; Abb. 8)

Die Angaben der Handlungsoptionen zeigt, dass ein Teil der Fünftklässler:innen bereits ein konzeptuelles Verständnis zum Klimawandel entwickelt hat und den Ursprungsort eines Prozesses als sinnvollen Angriffspunkt für Veränderungen sieht. Auch weitere Angaben in den Bereichen Emissionen, Konsum, Ernährung und Energienutzung fallen in den kurativen Ansatz der Ursachenbekämpfung. Lediglich das Helfen von Tieren (2,6 %) ist eher als symptomatische Folgenbekämpfung zu interpretieren.



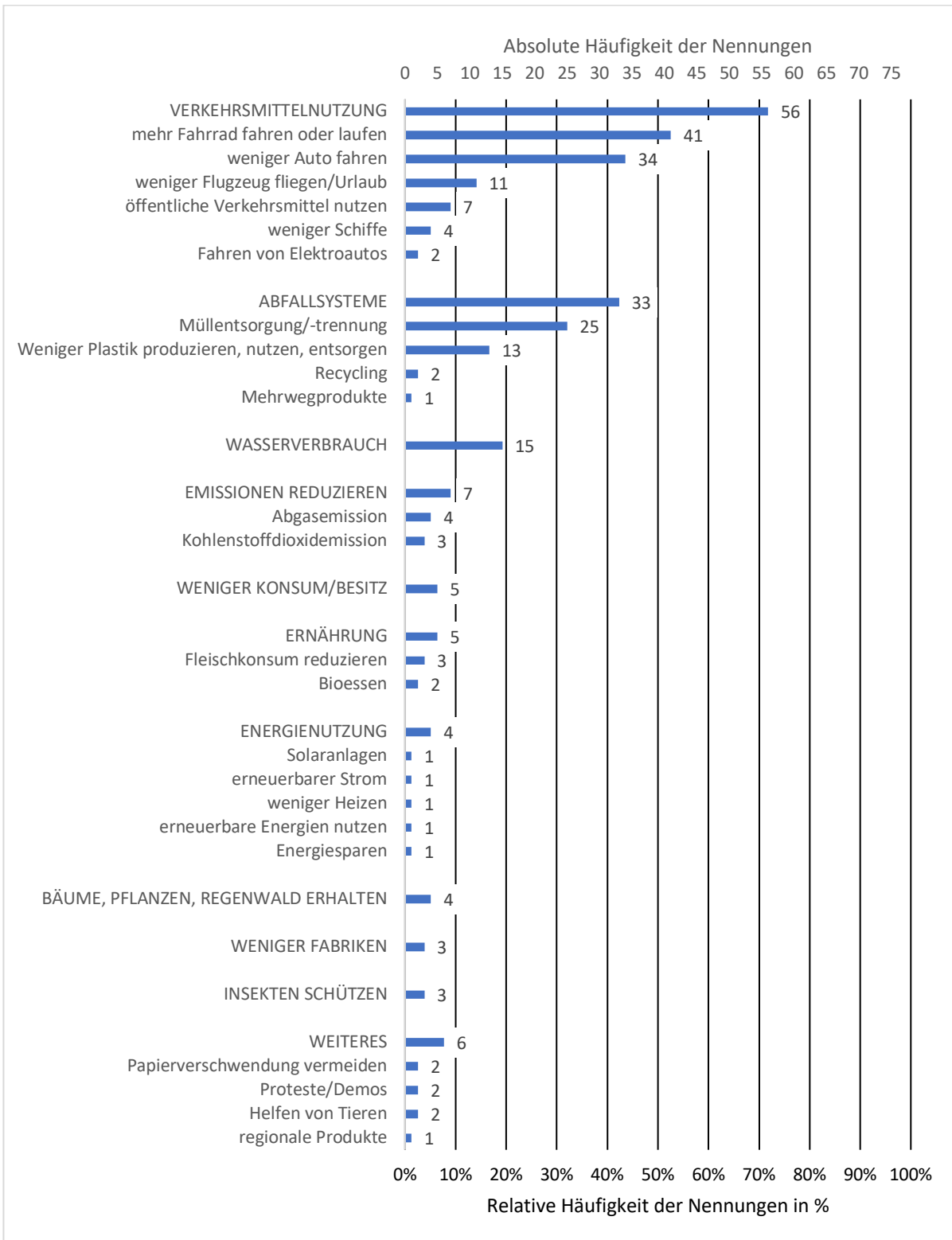


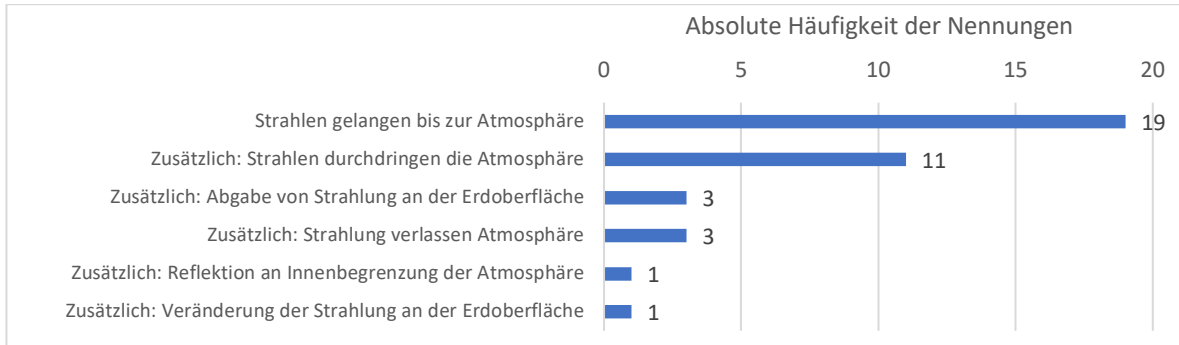
Abb. 10 Vorstellungen von Berliner Fünftklässler:innen über Handlungsmöglichkeiten in Bezug auf den Klimawandel (n = 78).

#### 5.2.4 Vorstellungen zum anthropogenen Treibhauseffekt und zum Schmelzen von Meereis

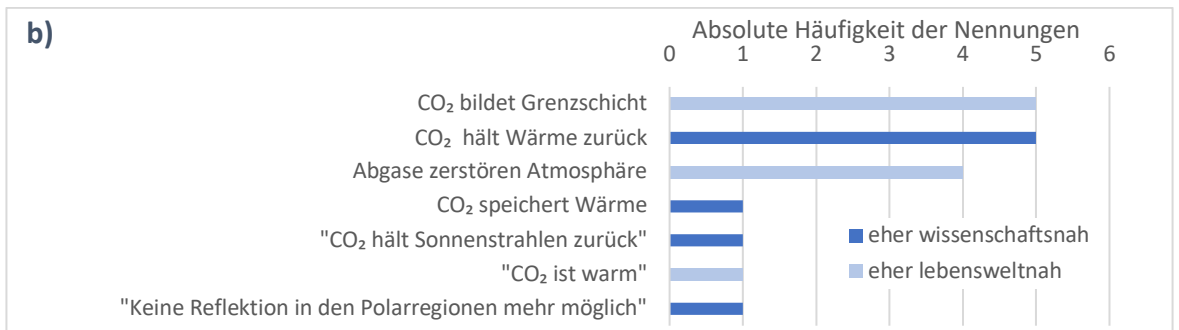
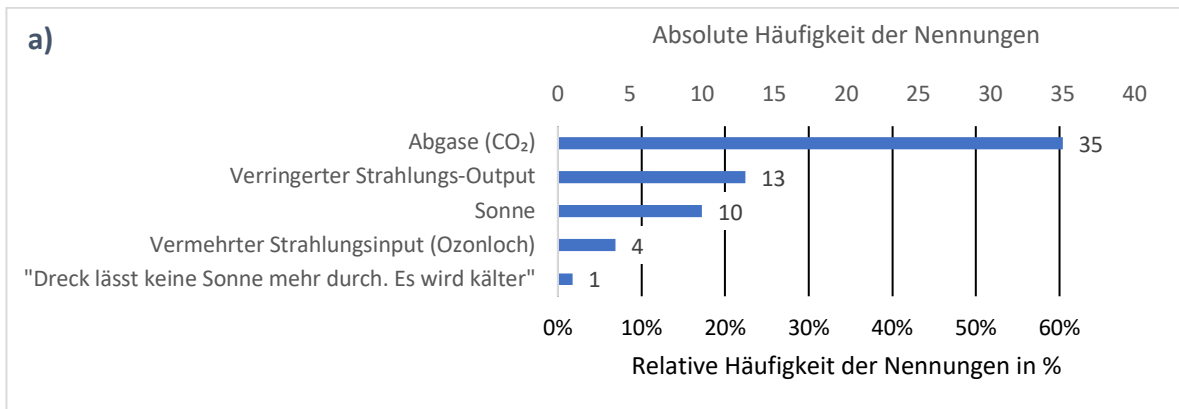
Um Einblicke in Erklärungsmuster auf der Prozessebene zu erlangen, wurden zwei Fragen gestellt, die jeweils einen Einblick über den Grad des konzeptuellen Wissens zum Treibhauseffekt und zum Schmelzen von Meereis ermöglichen sollten. Der induktiven Kategorisierung unter Einbeziehung deduktiver theoriebasierter Kategorien folgte eine Frequenzanalyse nach Mayring (2015).

In der ersten Umfrage zum Treibhauseffekt ( $n = 20$ ) sollten Schüler:innen eine Zeichnung ergänzen, die die Erde, die Atmosphäre und die Sonne zeigte (Anhang 9.1.1). Während fast alle Schüler:innen den Strahlungsverlauf der Sonnenstrahlung bis zur Atmosphäre zeigten, stellte nur die Hälfte der Kinder dar, dass die Strahlen die Atmosphäre durchdringen (Abb. 11). Ein vernachlässigbar kleiner Anteil (drei Personen), zeichnete die Abgabe von Strahlung an der Erdoberfläche und einen Strahlungsausstritt aus der Atmosphäre. Da sich das Ergänzen der Zeichnung nicht als zielführend erwies, wurde die Aufgabenstellung für die folgenden Lerngruppen in eine offene Fragestellung geändert (Anhang 9.1.2; Abb. 12 a - b). Der anthropogene Treibhauseffekt wurde zu 60,3 % auf den Einflussfaktor  $\text{CO}_2$ , zu 22,4 % auf einen verringerten Strahlungs-Output (auch durch Ozonlöcher), zu 17,2 % auf die solare Komponente und zu 6,9 % auf einen vermehrten Strahlungs-Input durch das Ozonloch zurückgeführt. Eine Person dementierte die Erderwärmung und hatte die Vorstellung, dass atmosphärischer Dreck solare Strahlung abhält und eine Abkühlung zur Folge hat (Abb. 12 a). Die spezifischen individuellen Erklärungen zu den Wirkweisen der Abgase in der Atmosphäre (Abb. 12 a) unterschieden sich bezüglich ihrer Lebenswelt- bzw. Wissenschaftsnähe (Abb. 12 b). Grundlegend wissenschaftsnaher Annahmen darüber, dass  $\text{CO}_2$  am Zurückhalten von Strahlung bzw. Wärme beteiligt ist (Abb. 12 b:  $\text{CO}_2$  hält Wärme zurück;  $\text{CO}_2$  speichert Wärme, „ $\text{CO}_2$  hält Sonnenstrahlen zurück“), trafen insgesamt sieben Befragte. Fünf Kinder hatten die lebensweltnahe Vorstellung, dass das Gas eine Grenzschicht bildet. Vier Schüler:innen gaben an, dass Abgase die Atmosphäre zerstören (Abb. 12 b). Die wissenschaftsnaher Vorstellung über die Verringerung der

Oberflächenalbedo der Erde durch das Abschmelzen der Kryosphäre nannte ein Kind (Abb. 12b).

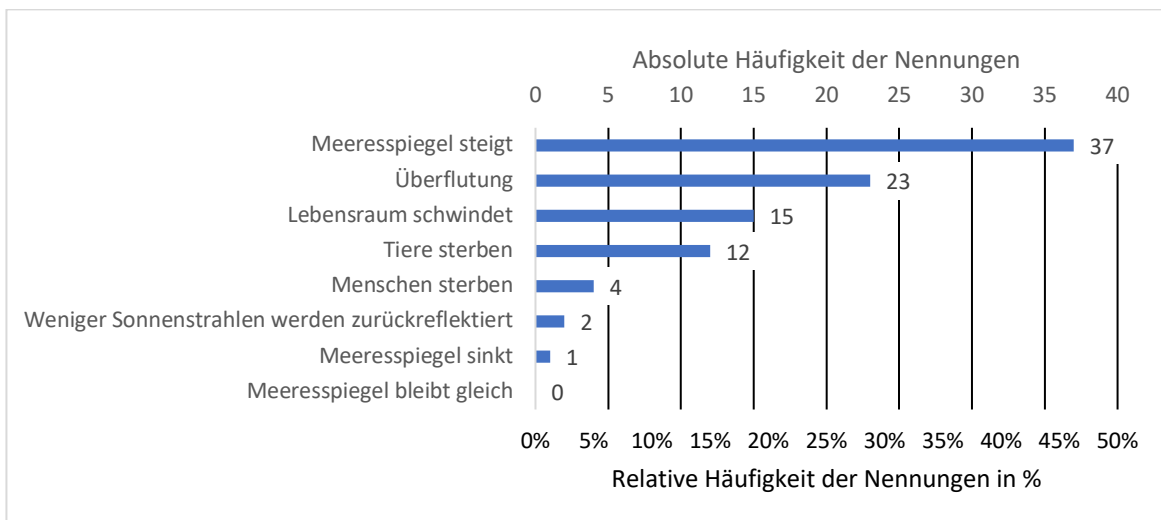


**Abb. 11 Ergänzung einer Abbildung zum Treibhauseffekt durch Berliner Fünftklässler:innen (n = 20).** In der Aufgabenstellung war gefordert ein Bild zu ergänzen, um zu veranschaulichen, wie die Sonnenstrahlung und die Erwärmung der Atmosphäre zusammenhängen.



**Abb. 12 a - b Verfassen eines Freitextes zum Treibhauseffekt durch Berliner Fünftklässler:innen (n = 58).** In der Aufgabenstellung war gefordert, zu erklären, wie genau es zu einer Erwärmung der Atmosphäre kommt. Aus den Freitextantworten wurden Vorstellungselemente isoliert und kategorisiert (a). Die individuellen Erklärungsansätze zur Wirkweise der Abgase in der Atmosphäre wurde für die 35 Nennungen differenziert aufgeschlüsselt, wenn über die Vorstellungselemente hinaus Zusammenhänge formuliert wurden.

Da die Erderwärmung zu Schmelzprozessen in der Kryosphäre führt, sollten spezifische Vorstellungen über das Schmelzen von Meereis mit einer Frage erfasst werden. Dass Eis bei einer Erhöhung der Umgebungstemperatur schmilzt, ist ein gut beobachtbares Alltagsphänomen. Im Kontext des Klimawandels ist das Konzept jedoch sehr anfällig für wissenschaftsferne Präkonzepte, wie u. a. Conrad (2012) zeigen konnte. Fast die Hälfte (47,4 %) der Fünftklässler:innen geht davon aus, dass der Meeresspiegel steigt, wenn ein Eisberg im Meer schmilzt (Abb. 13). Von diesen Kindern nehmen 62,1 % an, dass es zu Überflutungen kommt. Die wissenschaftliche Erkenntnis, dass Meereis keinen (bzw. einen vernachlässigbar kleinen) Volumeneffekt hat, nennt keines der Kinder.



**Abb. 13 Vorstellungen von Berliner Fünftklässler:innen über die Folgen des Schmelzens eines Eisberges im Meer (n = 78).**

### 5.3 Interviews: Von erklärenden Zusammenhängen zu subjektiven Theorien

Neben den elementaren Vorstellungen sollten erklärende Zusammenhänge innerhalb der individuellen subjektiven Theorien zum Klimawandel identifiziert werden. Zur Visualisierung individueller Konzepte wurden die Einzelinterviews transkribiert, codiert und in Struktur-Maps zusammengefasst. Die subjektiven Erklärungsmuster liefern Anknüpfungspunkte für einen schüler:innenorientierten Unterricht, da Knotenpunkte für Verständnisschwierigkeiten identifiziert werden konnten. Zur Übersichtlichkeit wurden die einzelnen Konzepte farbcodiert, um zwischen den eher lebensweltnahen (grau) und den eher wissenschaftsnahen und inhaltlich relevanten Vorstellungen (blau) zu differenzieren (Abb. 14 - 16).

Die subjektiven Denkfiguren und Konzepte von Schülerin B1 (Abb. 14) sind verhältnismäßig detailliert, komplex und teilweise hochvernetzt. Der Anteil naturwissenschaftsnaher Konzepte ist im Vergleich zu denen der anderen Schüler:innen insgesamt hoch. Relativ wissenschaftsnah sind ihre Vorstellungen über den anthropogenen Klimawandel durch Abgase, wie CO<sub>2</sub>, die gegenseitige Abhängigkeit von Insekten, Pflanzen und den Menschen sowie die globalen Auswirkungen, wie Überschwemmungen und Stürme. Innerhalb der Ursachen kommen *Verschmutzungskonzepte* vor, wie der negative Einfluss von Müll und „Atombatterien“ (Anhang 9.4, Interview B1, Z. 213) auf das Klima. Sie erklärte, dass durch den Einfluss von Müll Meerestiere sterben. Inwiefern der Müll oder das Tiersterben zum Klimawandel beitragen, erklärte sie nicht. Ihre Denkfiguren im Ursachenbereich weisen sowohl in sich konsistente Erklärungsmuster als auch fragmentierte Vorstellungselemente auf. Die Schülerin hat detaillierte Vorstellungen von Pestiziden als Umweltgift und schreibt ihnen außerdem eine Klimawirksamkeit zu. Das zeigt, dass sie verschiedene anthropogen hervorgerufene Umweltproblematiken miteinander in einen Zusammenhang bringt und ihr lebensweltnahe *Vermischungskonzepte* als Erklärungsansatz dienen. Wie der Großteil aller Schüler:innen liegt bei Schülerin B1 das *Polareis-Überflutungs-Konzept* vor. Außerdem hat sie eine in der Befragung einzigartige Vorstellung geäußert, nämlich die, dass sich das

Wasser lokal und global durch das schmelzende Eis abkühlt. In sich ist diese Vorstellung schlüssig, denn diese Energieübertragung kann im Alltag beobachtet werden, wenn ein Getränk durch Eiswürfel abgekühlt wird. Auch wenn eine kurzfristige und lokale Abkühlung im Meer auftreten kann, äußerte sie keine Vorstellungen über Erwärmungsprozesse im Ozean. Schülerin B1 stellt keine Verbindung zu der solaren Komponente im Schmelzprozess oder der Verringerung der Albedo und eine damit einhergehende Erwärmung der Ozeane her. Die Übertragung eines lokalen Phänomens auf die globale Ebene ohne Einbezug anderer Vorstellungselemente zeigt auch hier eine Fragmentierung ihrer Vorstellungen. Zum Treibhauseffekt konnte ebenfalls eine Denkfigur identifiziert werden, die Vorstellungen zu regionalen und kurzfristigen Phänomenen enthielt – wie die tageszeitabhängige Lage der Erde und die jahreszeitabhängige Strahlungsintensität der Sonne – die sie als Erklärungsansätze für einen periodisch auftretenden Treibhauseffekt nutzte. Obwohl die Schülerin anthropogene Ursachen für den Klimawandel nannte, beschrieb sie die Erderwärmung als natürliches, phasisches und sonnenabhängiges Phänomen. Ihr Konzept kann daher weder dem *Glashaus*- noch dem *Ozonloch-Konzept* zugeschrieben werden.

Die Vorstellungen von Schüler B2 (Abb. 15) sind größtenteils wissenschaftsfern, wenig vernetzt und fragmentiert. Ein wissenschaftsnahes Konzept liegt zum Einfluss von Autoabgasen auf das Klima vor. Außerdem führt er den Klimawandel auf Plastik zurück, das „giftige Chemikalien“ enthält, die durch den Einfluss der Sonne „kleiner [werden, sich] erwärmen [und zu] Gasen“ werden (Anhang 9.4, Interview B2, Z. 44 - 46). Die Vorstellungen über die Beeinflussung des Klimas durch Plastik, wie beispielsweise die Energieaufwendung bei der Plastikherstellung, präziserte Schüler B2 jedoch nicht. Die Umweltschädlichkeit von giftigen Chemikalien aus dem Plastik kann auch hier als *Verschmutzungskonzept* interpretiert werden. Als fragmentierte Wissens Elemente kommen in der Vorstellung des Schülers B2 Recycling und Mehrwegsysteme als Handlungsoptionen im Klimawandel vor. Diese Information passt mit seiner Vorstellung zusammen, dass Plastik das Klima

beeinflusst, sodass ein ursachenbekämpfender Ansatz zur Reduktion des Klimawandels interpretiert werden kann. Wie beim Großteil der Schüler:innen, liegt auch bei Schüler B2 das Konzept vor, dass ein schmelzender Eisberg im Meer zum Meeresspiegelanstieg beiträgt. Er sagte, er habe „auch schon einmal in den Nachrichten gehört, dass der Wasserspiegel sich erhöht [...] wegen dem Klima.“ (Anhang 9.4, Interview B2, Z. 137). Durch konkretes Nachfragen konnten jedoch keine kausalen Erklärungsansätze diesbezüglich festgestellt werden. Als weiteren Faktor nannte er Regenzeiten als fragmentiertes Wissensselement. Das Konzept von Schüler B2 zum Treibhauseffekt kann weder dem *Glashaus-* noch dem *Lochkonzept* eindeutig zugeordnet werden. Löcher in der Atmosphäre stellen zwar ein Vorstellungselement dar, werden aber aufgrund des Sauerstoffverlustes als schädlich für den Menschen dargestellt und nicht als klimawirksames Element. Wenngleich das Konzept sehr lebensweltnah ist, hat der Schüler die Vorstellung, dass die Atmosphäre die Funktion erfüllt, Strahlung zurückzuhalten und dass ein verringerter Strahlungs-Output zu einer Erderwärmung führt, was zumindest einem Teil des *Glashauskonzeptes* entspricht.

Schüler B3 (Abb. 16) hat vor allem im Bereich der Ursachen und Handlungsoptionen im Klimawandel wissenschaftsnahe Vorstellungen. Fabriken, Autos und Flugzeuge werden als CO<sub>2</sub>-Quelle, Pflanzen als CO<sub>2</sub>-Senke verstanden. Die weiteren Vorstellungen sind hauptsächlich als wissenschaftsfern zu interpretieren. Das *Verschmutzungskonzept* („Und dieser Schrott von Handys [ist] vielleicht [eine Ursache des Klimawandels]“ (Anhang 9.4, Interview B3, Z. 25)) sowie das *Polareis-Meeresspiegelanstieg-Konzept* sind bei dem Schüler ausgebildet. Für die Erklärung des anthropogenen Treibhauseffekts wird das *Lochkonzept* herangezogen. In seiner individuellen Denkfigur sind die Löcher der Ozonschicht auf die zerstörerische Funktion des Kohlenstoffdioxids zurückzuführen. Da anthropogen verursachte FCKW die Zerstörung der Ozonschicht fördern und das anthropogen verursachte CO<sub>2</sub> klimawirksam ist, ist der Erklärungsansatz des Schülers auf ein *Vermischungskonzept* zurückzuführen. Der Schüler stellt sich vor, dass die Ozonlöcher den Strahlungs-Input erhöhen, was wiederum dem *Lochkonzept* entspricht. Parallel dazu hat der

Schüler B3 die Vorstellung, dass die Atmosphären­grenze Strahlung reflektieren kann und so den Strahlungs-Output aus der Atmosphäre verringert. Die beiden Erklärungsansätze des Schülers zeigen, dass sich innerhalb der Denkfigur zum Treibhauseffekt sowohl *Loch-* und *Glashauskonzept* ergänzen können.

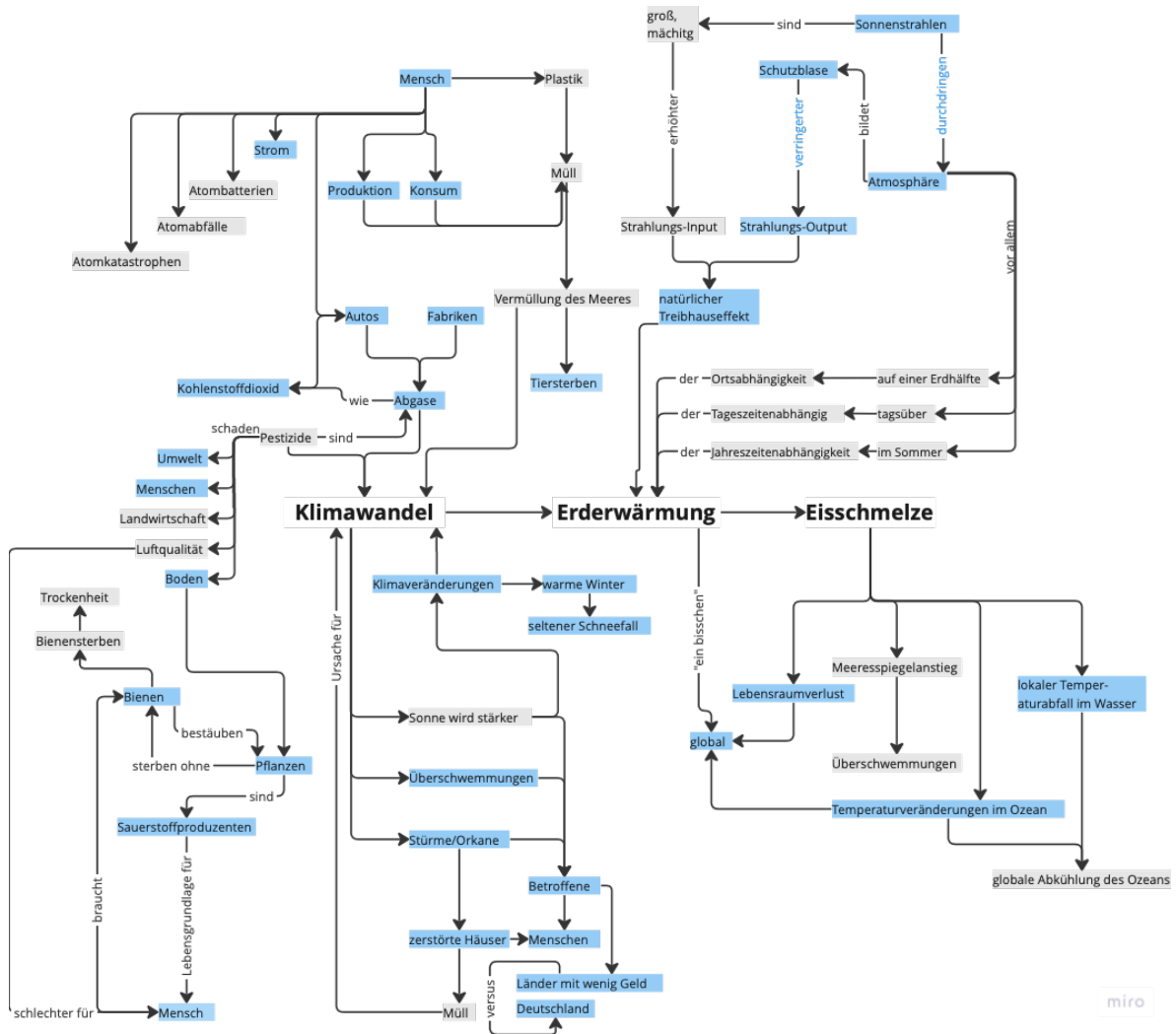


Abb. 14 Individuelle subjektive Theorie der Fünftklässlerin B1 zu den Ursachen und Folgen des Klimawandels, zum Prozess der Erderwärmung sowie zu den Folgen von schmelzendem Meereis.



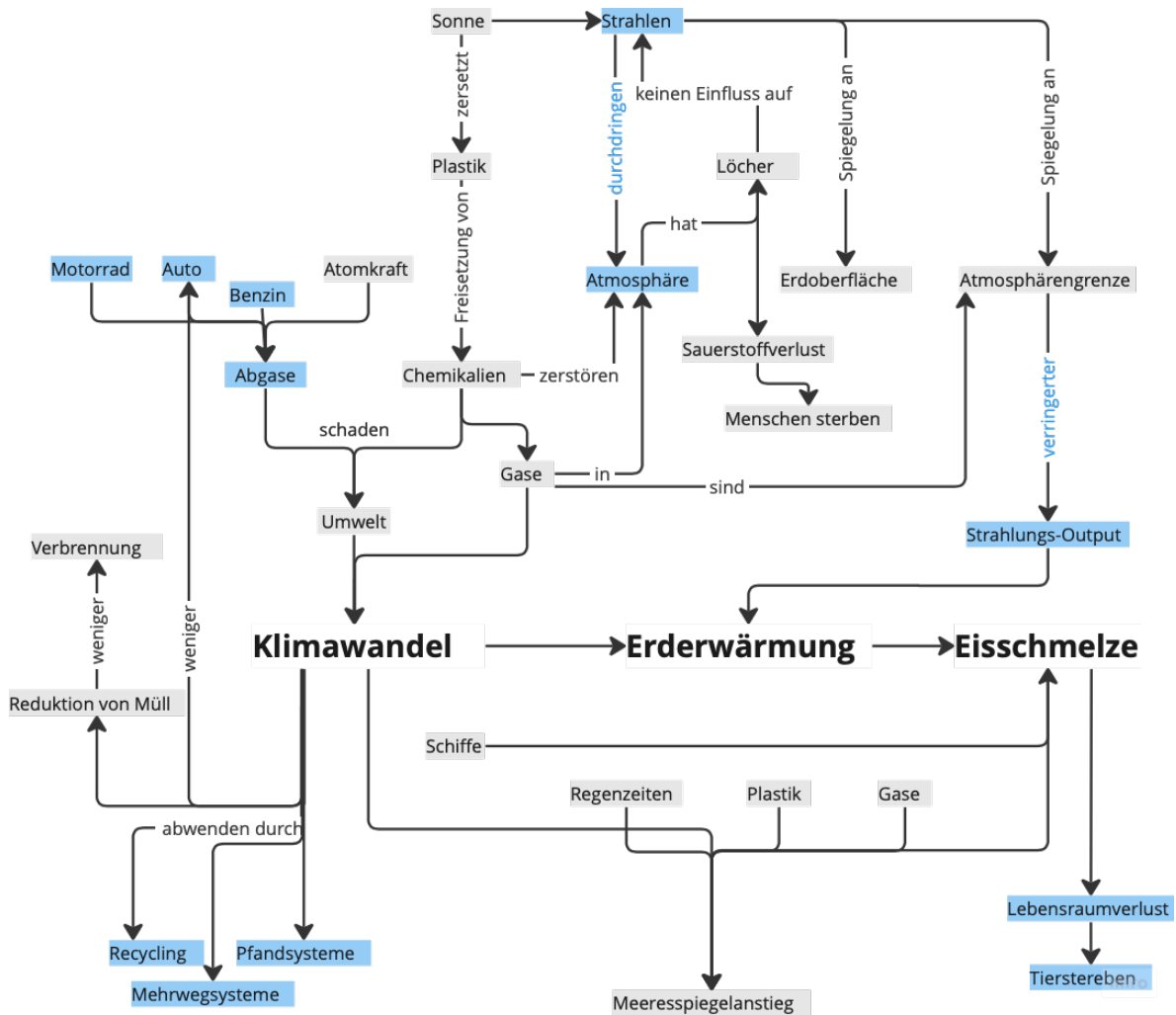


Abb. 15 Individuelle subjektive Theorie des Fünftklässlers B2 zu den Ursachen und Folgen des Klimawandels, zum Prozess der Erderwärmung sowie zu den Folgen von schmelzendem Meereis.

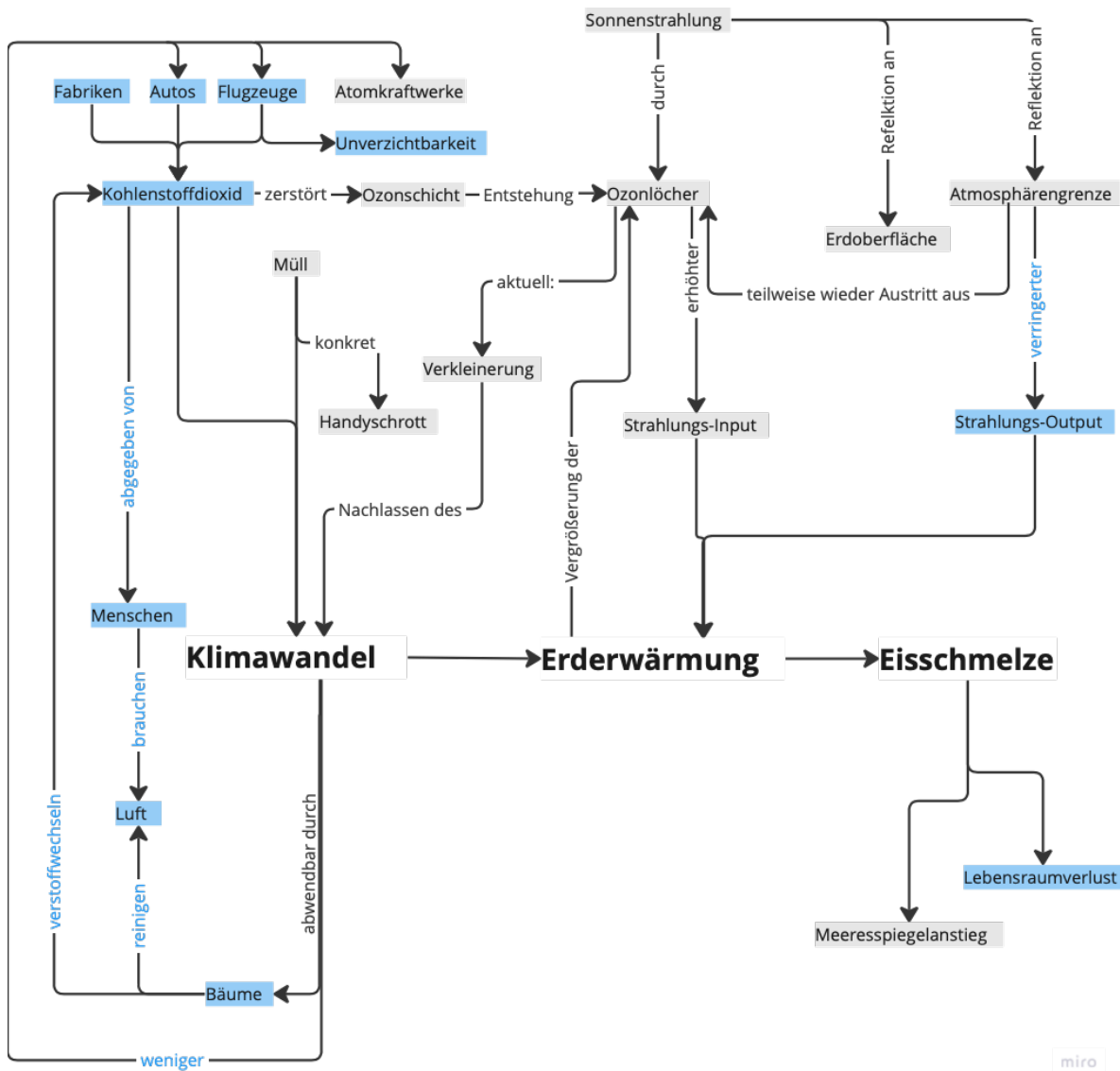


Abb. 16 Individuelle subjektive Theorie des Fünftklässlers B3 zu den Ursachen und Folgen des Klimawandels, zum Prozess der Erderwärmung sowie zu den Folgen von schmelzendem Meereis.

#### 5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Fragebogenerhebung zur Ermittlung elementarer Schüler:innenvorstellungen hat gezeigt, dass der Klimawandel überwiegend anthropogenem Handeln zugeschrieben wird und die Verkehrsmittelnutzung als Hauptsektor verantwortlich gemacht wird. Die Vorstellungen zu Handlungsoptionen verdeutlichen, dass die Primarschüler:innen bereits in

kausalen Zusammenhängen denken und übergreifende Zusammenhänge über die einzelnen Denkfiguren hinaus haben. Auffallend häufig wurden innerhalb der Ursachen-Denkfigur *Vermischungskonzepte* identifiziert. So wird die anthropogene Verschmutzung – v. a. durch Müll – unmittelbar mit dem Klimawandel in einen Zusammenhang gebracht sowie die Ozonlochproblematik mit der globalen Erwärmung. Die Vorstellungen über die Folgen des Klimawandels sind fast ausschließlich negativ konnotiert, wobei insbesondere negative Auswirkungen auf die Tiere hervorgehoben werden und weniger die auf die Menschen. Präkonzepte zum natürlichen Treibhauseffekt – insbesondere zum Einfluss der Sonnenstrahlung – sind kaum ausgeprägt, wohingegen der anthropogene Treibhauseffekt hauptsächlich auf den Einfluss des Treibhausgases CO<sub>2</sub> im Allgemeinen zurückgeführt wird. Der Einfluss des Gases CO<sub>2</sub> auf den Klimawandel stellt den größten gemeinsamen Nenner innerhalb der elementaren Schüler:innenvorstellungen zum Klimawandel dar. Die Häufigkeit des lebensweltnahen Zusammenhangs zwischen schmelzendem Eis und einem Meeresspiegelanstieg bis hin zu Überflutungen zeigt, wie folgerichtig dieser Zusammenhang für Kinder erscheint, wenngleich er nicht den wissenschaftlichen Vorstellungen entspricht.

Die individuellen Erklärungsansätze der Schüler:innen haben gezeigt, wie sich die subjektiven Theorien zum Klimawandel in ihrer Komplexität und Wissenschaftsnähe voneinander unterscheiden. Die größten Unterschiede bestanden in den Konzepten zum Treibhauseffekt. Jedoch wird auch hier deutlich, dass bestimmte Präkonzepte besonders anfällig für lebensweltnahe Denkfiguren sind: Innerhalb der Ursachen des Klimawandels ist das *Verschmutzungskonzept* und innerhalb der Eisschmelze das *Meeresspiegelanstieg-* bzw. *Überflutungskonzept* weitestgehend konsistent. Die Vorstellungen zum anthropogenen Treibhauseffekt sind inkonsistent und werden sowohl auf erhöhten Strahlungs-Input als auch auf verringerten Strahlungs-Output zurückgeführt.

## 6 Diskussion

### 6.1 Inhaltliche Diskussion

Nach dem Modell der Didaktischen Strukturierung (nach Gropengießer, 2006) erfordert die Konzeption von Lehr-Lern-Gelegenheiten neben der fachlichen Klärung des Klimawandels die Berücksichtigung der entsprechenden Schüler:innenperspektiven.

Die in dieser Arbeit ermittelten Schüler:innenvorstellungen können zwei übergeordneten Kategorien zugeordnet werden. Die erste Kategorie bilden wissenschaftsnahe Konzepte. Sie können als Anknüpfungspunkt für die Konzept-Erweiterung (*conceptual growth*; Krüger, 2007) durch die Vermittlung dazu passender Anschlusselemente und -konzepte dienen. Hier ist beispielsweise das Vorstellungselement CO<sub>2</sub> zu nennen, das einem Großteil der Schüler:innen als Ursache des Klimawandels bekannt ist (Abb. 8). Die zweite Kategorie bilden nicht-wissenschaftliche lebensweltnahe Vorstellungen. Diese sind ein Anknüpfungspunkt dafür, bestehende Konzepte zu hinterfragen und neu zu konstruieren (*conceptual reconstruction*; Krüger, 2007). Vor dem Hintergrund, dass Schüler:innenvorstellungen schwer veränderbar sind (Hammann & Asshoff, 2017), erfordert insbesondere die zweite Kategorie das Angebot von Lerngelegenheiten, die verständlich, plausibel und fruchtbar sind (Krüger, 2007). Denn die Bereitschaft für eine Konzeptänderung entsteht insbesondere dann, wenn Unzufriedenheit bezüglich des eigenen Konzeptes hervorgerufen wird (Posner et al. 1982; Strike u. Posner 1992). Die Plausibilität und Funktionalität wissenschaftsferner Konzepte, wie dem *Lochkonzept* oder *Verschmutzungskonzepten*, zeigt sich auch dadurch, dass sie sowohl bei den im Rahmen dieser Arbeit befragten Grundschüler:innen als auch bei älteren Schüler:innen der gymnasialen Oberstufe auftreten (u. a. Boyes & Stanisstreet, 1997; Reinfried et al., 2010). Auffallend ist im Vergleich mit vergangenen Studien (u. a. Boyes & Stanisstreet, 1997) jedoch, dass die Grundschüler:innen das *Lochkonzept* zum größeren Teil nicht mehr zur Erklärung der Erderwärmung nutzen. Dass die Berliner Grundschüler:innen die Erderwärmung eher auf das Treibhausgas CO<sub>2</sub> sowie einen verminderten Strahlungs-Output

zurückführen als auf (Ozon)löcher in der Atmosphäre, könnte auf die Verminderung der Ozonlochproblematik seit den 1990er Jahren (Dameris, 2010) und einer Abnahme der medialen Präsenz zurückzuführen sein. Dass einige Grundschüler:innen die Erderwärmung trotzdem mit Löchern in der Atmosphäre erklären, könnte darauf zurückzuführen sein, dass ältere Familienmitglieder (Informationsquelle bei 47,4 % der Befragten) ihre Präkonzepte weitergeben oder dass die Idee von Löchern in der Atmosphäre im Alltag funktional ist. Bereits Boyes & Stanisstreet (1993) und Conrad (2012) konnten zeigen, dass ältere Schüler:innen verschiedene Umweltproblematiken miteinander vermischen. In den Ergebnissen der Berliner Grundschüler:innen fällt auf, dass insbesondere die Umweltverschmutzung und Müll häufig vorkommende Vorstellungselemente innerhalb der subjektiven Theorien zum Klimawandel sind und wiederkehrend in den Denkfiguren zu den Ursachen und den Handlungsoptionen auftreten. Da die anthropogene Umweltverschmutzung über Ökosystemverluste mit dem Klimawandel indirekt zusammenhängen kann, sind Verschmutzungskonzepte nicht unbedingt wissenschaftsfern. Dass die Zersetzung von Plastik ozonschichtzerstörende Chemikalien (Abb. 15) freisetzt, ist hingegen ein wissenschaftsferner Erklärungsansatz und vermischt verschiedene Problematiken miteinander. Anhand der vielseitigen - meist wissenschaftsfernen - Theorien bieten sich daher zwei Ausrichtungen für Lehr-Lern-Ansätze an:

- a) subjektive lebensweltnahe Vorstellungen auf individueller Ebene hinterfragen und rekonstruieren lassen oder
- b) wissenschaftsnahe Vorstellungen um anschlussfähige Konzepte erweitern lassen.

Beide Ansätze werden für die didaktischen Implikationen in dieser Arbeit genutzt.

Die Lernausgangslage für den Themenbereich Klimawandel ist bei Berliner Fünftklässler:innen vor allem auf außerschulische Alltagserfahrungen zurückzuführen, insbesondere auf den Einfluss von Medien und den Menschen im sozialen Umfeld. Die Wissenschaftsferne der Schüler:innenvorstellung könnte daher u. a. auch darauf beruhen, dass das individuelle Mediennutzverhalten das Wissen zum Klimawandel qualitativ

beeinflusst (Taddicken & Neverla, 2011), dass Eltern die Meinungsbildung ihrer Kinder beeinflussen (Fend, 2009) und dass die Kompetenz, mediale Informationen zu bewerten, erst mit dem Alter und dem Ausbildungsstand zunimmt (u. a. LISUM, 2015b - c). Der große Einfluss der Medien auf Schüler:innenvorstellungen zeigt, dass neben der Vermittlung von Fachwissen auch das Fördern einer fachspezifischen Medienkompetenz ein elementarer Teil der Klimabildung sein muss. Die Kompetenzförderung im „kritischen Umgang mit Medien“ (LISUM, 2015a) wird auch im Rahmenlehrplan des Nawi-Unterrichts der Klassenstufen fünf und sechs als elementares Unterrichtsziel aufgeführt.

Im Vergleich zu den aktuellen Angaben des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWi; neu: BMWK) fällt auf, dass die relative Bedeutsamkeit der einzelnen CO<sub>2</sub>-emittierenden Sektoren nicht den Nennungshäufigkeiten der Schüler:innen entspricht. Zum Beispiel nennen die Fünftklässler:innen den Verkehrssektor am häufigsten, während die Sektoren Energiewirtschaft und Industrie nach Angaben des BMWi (2021) den größten Beitrag zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen leisten. Eine Ursache der verzerrten Schüler:innenvorstellung könnte auch hier ein Abbild medialer Präsenz bestimmter Themen oder das individuelle Mediennutzverhalten sein (Taddicken & Neverla, 2011).

Im Bereich der Denkfiguren zu den Folgen des Klimawandels und der Erderwärmung fiel auf, dass die Begriffe für die 78 befragten Primarschüler:innen fast ausschließlich negativ konnotiert waren. Im Gegensatz dazu hat Niebert (2010) festgestellt, dass der Wärmebegriff „als lebensweltliche[s] Konzept ein Synonym für Wohlbefinden darstellt“ (Niebert, 2010) und das Phänomen der Erderwärmung bei Schüler:innen auch positive Assoziationen erzeugt. Unter Berücksichtigung der lebensweltlichen Assoziationen zum Wärmebegriff betont er, dass der Begriff Erderhitzung der Gefahr der Auswirkungen entsprechend angemessener sein könnte, wenn der Klimawandel im Unterricht thematisiert wird. Anhand der ermittelten Vorstellungen dieser Arbeit über die Folgen des Klimawandels und der Erderwärmung wird jedoch deutlich, dass den jungen Lernenden die

Bedrohlichkeit der Erderwärmung durchaus bewusst ist. Auch eine aktuelle Umfrage der Bertelsmann-Stiftung zeigt, dass 80 % der Jugendlichen zwischen 12 und 18 Jahren den Klimawandel als eine besorgniserregende Bedrohung wahrnehmen (Bertelsmann-Stiftung, 2022), wenngleich auch hier problemzentriertere Begriffe, wie die Klimakrise oder die Klimakatastrophe, der Problematik entsprechend angemessener wären. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass eine Ersetzung des Begriffes *Erderwärmung* im Unterricht nicht erforderlich ist. Allerdings kann das Gegenüberstellen der Begriffe *Erderwärmung* und *Erderhitzung* eine Diskussionsgrundlage für die Auseinandersetzung mit der Gefahr für den Menschen bilden, denn die „Hitze“ wird vom Duden als eine „sehr starke, unangenehm empfundene Wärme“ (Duden, 2023) definiert. Vor dem Hintergrund, dass die Berliner Grundschüler:innen den Klimawandel vor allem für Tiere als gefährlich erachten, könnte die Diskussion zu einem *conceptual growth* beitragen. Da es sich bei der Erhöhung der Erdmitteltemperatur um einen sehr langsamen Prozess handelt, könnte der Hitzebegriff wissenschaftsferne Vorstellungen fördern oder zu Vermischungskonzepten mit lokal auftretenden Hitzeperioden führen. In den konkreten didaktischen Implikationen wird daher der Begriff *Erderwärmung* genutzt.

Im Gegensatz zu den selektiv konsumierten Medien, kann die Schule wissenschaftlich fundierte und umfassende Kompetenzen verlässlicher vermitteln (Weingart et al., 2007), sodass im Folgenden konkrete didaktische Implikationen für eine naturwissenschaftliche Bildung im Bereich Umwelt und Klima bei Primarschüler:innen formuliert werden. Als Schlüsselkonzept kann dafür die *Environmental Literacy* herangezogen werden. Sie umfasst die Vermittlung von Kernkompetenzen, wie individuelles Wissen über ökologische Zusammenhänge aufzubauen, kognitive Fähigkeiten zum Analysieren von Umweltproblemen zu erwerben, Fertigkeiten zum Erarbeiten von Naturschutzstrategien zu erlernen sowie ein individuelles Umweltbewusstsein zu entwickeln (Bissinger, 2018). Hervorzuheben ist dabei das individuelle Verständnis der konkreten Ursachen des Klimawandels, da es zu den stärksten Prädiktoren für die Ausbildung umweltbewussten

Handelns gehört (Bord et al., 2000). Daher steht das Verständnis der Ursachen im Fokus der entwickelten Lehr-Lern-Einheit für den naturwissenschaftlichen Unterricht.

## 6.2 Konkrete didaktische Implikationen

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern Ansatzpunkte für eine didaktische Strukturierung einer schüler:innenorientierten Aufarbeitung von Fachinhalten (nach Gropengießer, 2006) zum Klimawandel. Die Präkonzepte von Primarschüler:innen in Berlin sind die Anknüpfungspunkte für eine Kompetenzförderung nach dem *Conceptual Change* Ansatz (nach Krüger, 2007) im NaWi-Unterricht. Die in den Ergebnissen identifizierten einzelnen Vorstellungselemente sowie komplexere Konzepte sollen daher als Anknüpfungspunkt für konkrete didaktische Implikationen für Lehr-Lern-Gelegenheiten zum Klimawandel dienen. Die Konzeption soll einen experimentell ausgerichteten Ansatz verfolgen, da insbesondere experimentelle Lehr-Lern-Gelegenheiten durch das Erfahrbarmachen von naturwissenschaftlichen Zusammenhängen erfolgversprechende Rekonstruktionsgelegenheiten darstellen (Gropengießer et al., 2017). Die Subjektivität der individuellen Vorstellungen erschwert es jedoch, jede der identifizierten Vorstellungen aufzugreifen. Bei den Lerngelegenheiten handelt es sich um Vorschläge, die sich vor allem an häufig auftretenden Konzepten orientieren, aber auch das Auseinandersetzen mit den individuellen Konzepten fördern sollen. Außerdem sollen die konkreten Vorschläge zu den Rahmenlehrplaninhalten des NaWi-Unterrichtes in den Ländern Berlin und Brandenburg passen, sodass sie auch im schulischen Unterricht auf die Lerngruppe angepasst nutzbar sind.

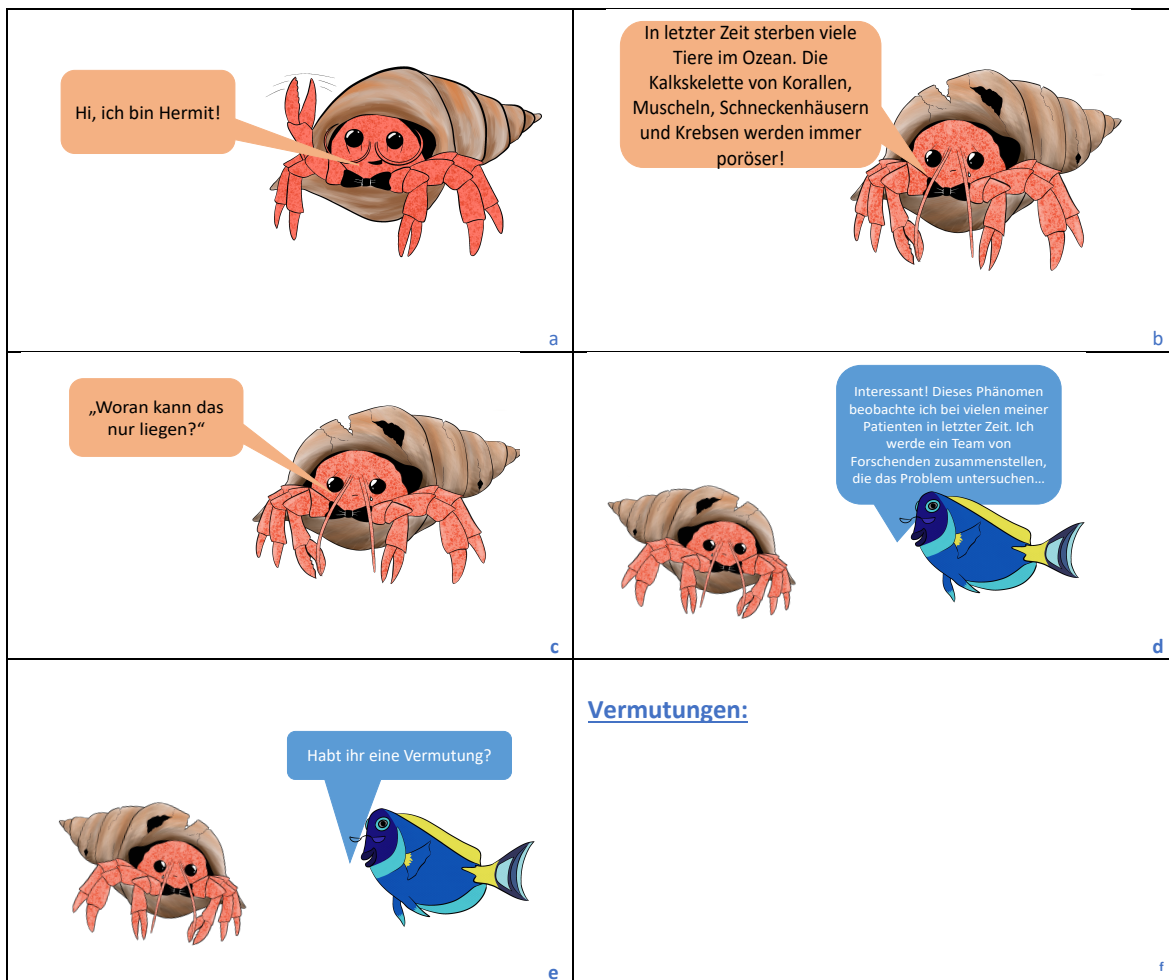
Die Entwicklung einer schüler:innenorientierten Lehr-Lerneinheit zum Klimawandel habe ich im Rahmen eines vierstündigen Kurses im Schülerlabor NatLab der Freien Universität Berlin umgesetzt. Um einen Beitrag zur Nachhaltigkeit zu leisten und den Papierverbrauch zu minimieren, wurden die Anleitungen für die Versuche in einem interaktiven Dialog im Chatformat digitalisiert. Dieser soll die Aktivität der Lernenden über inhaltliche Zwischenabfragen auf einem hohen Niveau halten und so einen Beitrag zur Begünstigung



von Konzeptveränderungen leisten (Prenzel & Alolio-Näcke, 2006). Die QR-Codes der digitalen Versuchs-Anleitungen sind im Anhang 9.8 zu finden. Des Weiteren sollen Vorstellungen der individuellen Lerngruppe aktiviert, hinterfragt und diskutiert werden, um Lernprozesse zu reflektieren (Prenzel & Alolio-Näcke, 2006).

### 6.2.1 Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) als Anknüpfungspunkt für *conceptual growth*

Die am meisten genannte Ursache für den Klimawandel der Primarschüler:innen war Kohlenstoffdioxid. Diese Vorstellung ist wissenschaftsnah und kann als Anknüpfungspunkt für *conceptual growth* (Krüger, 2007) dienen. Zur Förderung des verständnisorientierten und konzeptuellen Denkens (Fähigkeit bei Fünftklässler:innen teilweise ausgeprägt, Abschnitt 5.2.3) wird über eine zunächst unerklärbare Folge des Klimawandels eingestiegen, die auf das Gas zurückzuführen ist. Um das Bedürfnis nach Klärung hervorzurufen, bietet sich ein problemorientierter Einstieg nach dem forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahren nach Schmidkunz & Lindemann (1992) an, bei dem ein zunächst unerklärliches Problem systematisch und schrittweise gelöst wird. Hierfür soll der Einsiedlerkrebs „Hermit“ dienen, der beobachtet, dass sich die Kalkskelette im Ozean beginnen aufzulösen (Abb. 17 a - c). Auf das zunächst unerklärliche Problem folgt im Erkenntnisgewinnungsprozess das Aufstellen von individuellen Vermutungen (Abb. 17 d - e) nach dem *nature of Science*-Ansatz (Billion-Kramer et al., 2021). Der Einstieg bietet zwei Vorteile auf inhaltlicher und methodischer Ebene. Zunächst wird hier verdeutlicht, dass auch Wissenschaftler:innen Erklärungen für Folgen des Klimawandels (z. B. Veränderungen im Ökosystem, Tiersterben) suchen. Zudem bietet das Aufstellen von Vermutungen einen Einblick in die Vorstellungswelt der individuellen Lerngruppe. Die Ergebnisse dieser Arbeit legen nahe, dass die Grundschüler:innen hier *Verschmutzungskonzepte* als Ursache für das Tiersterben äußern könnten (Abschnitt 5.2.1; Abschnitt 5.3: Abb. 14). Die Vermutungen werden dokumentiert, um den Lernprozess am Ende der ersten Einheit reflektieren zu können.



**Abb. 17 a - f** Comic für einen problemorientierten Einstieg in eine experimentelle Lehr-Lern-Einheit zum Gas CO<sub>2</sub>. Die Problemorientierung ist Teil des forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahrens nach Schmidkunz & Lindemann (1992). Digitale Zeichnungen: Mara Garbe.

Über drei Versuche soll der „Weg“ des Kohlenstoffdioxids von einer beobachtbaren Folge aus bis hin zur verursachenden Quelle schrittweise und systematisch veranschaulicht werden (Tab. 4). Die ausführliche digitale Versuchsanleitung für die Schüler:innen wurde über einen interaktiven Chat mit dem Einsiedlerkrebs Hermit über das Online-Programm Learning Snacks realisiert (Anhang 9.8). Zwischenergebnisse werden im Chatformat interaktiv gesichert; auf einem Arbeitsblatt (Anhang 9.9) notiert und abschließend im Unterrichtsgespräch gesichert. Die Versuchsauswertungen werden mit den Ausgangsvermutungen verglichen, um den Lernprozess sichtbar zu machen.

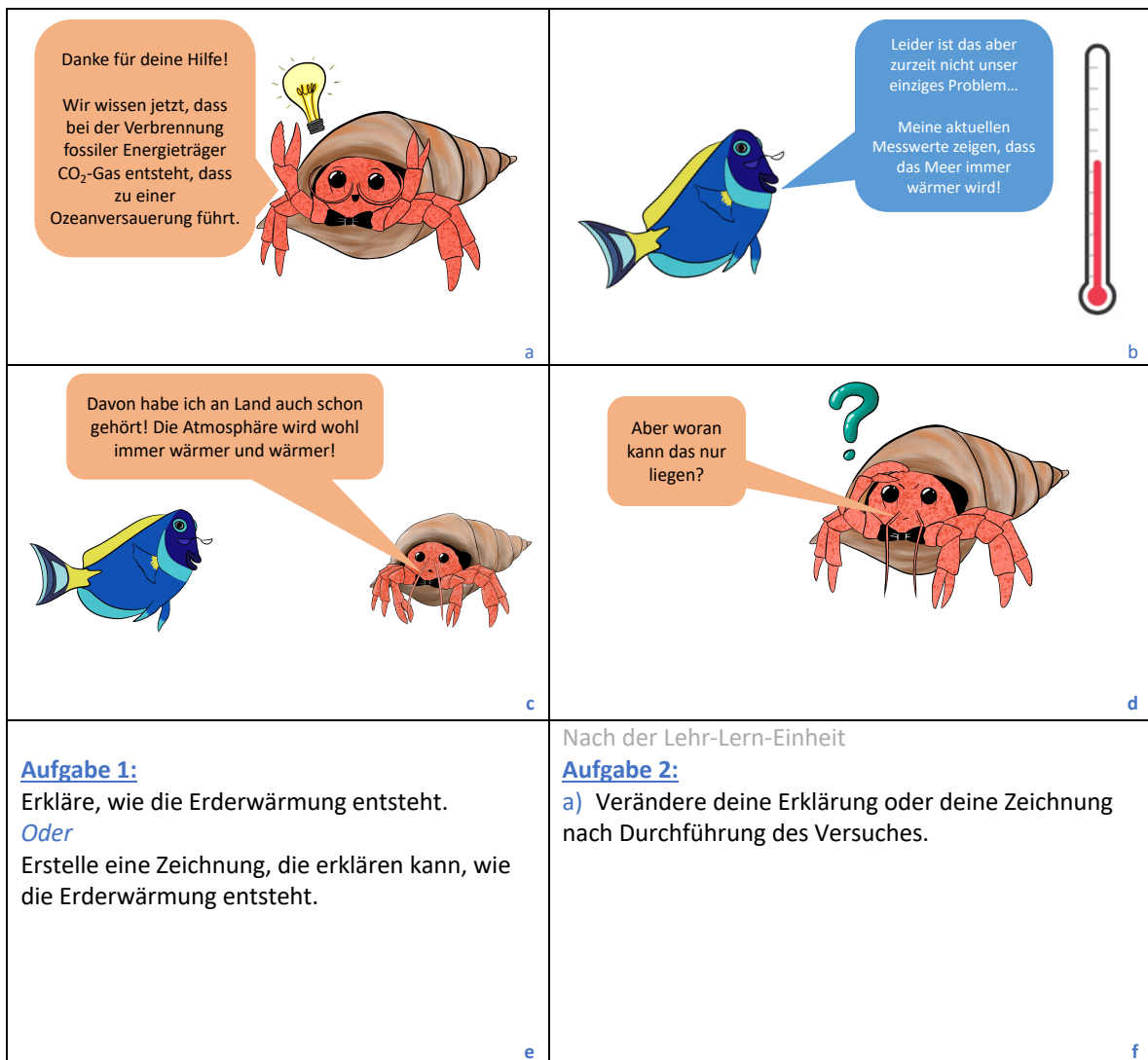
**Tab. 4 Versuchsreihe zum Vorstellungselement CO<sub>2</sub> für Primarschüler:innen.** Die Versuche wurden mit Schüler:innen der Jahrgangsstufen fünf und sechs bereits erfolgreich durchgeführt und in ihrer Durchführbarkeit optimiert.

Versuchsfragestellung und Erkenntnis	Versuchsdurchführung
<p>1. <b>Welcher Faktor im Ozeanwasser zerstört das Schneckenhaus?</b> → Säure zerstört Kalk</p>	<p>6 (8) Reagenzgläser werden befüllt mit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Schneckenhaus + Meerwasser*</li> <li>- Kalkpulver + Meerwasser*</li> <li>- Schneckenhaus + Säure</li> <li>- Kalkpulver** + Säure</li> <li>- Schneckenhaus + schmutziges Meerwasser</li> <li>- Kalkpulver + schmutziges Meerwasser</li> <li>- (Schneckenhaus + Wahlsbstanz aus Vermutungen)</li> <li>- (Kalkpulver + Wahlsbstanz aus Vermutungen)</li> </ul> <p>*Negativkontrolle **Positivkontrolle</p>
<p>2. <b>Woher kommt die Säure im Ozean?</b> → Durch das Lösen von CO<sub>2</sub> in Wasser wird das Meer saurer</p>	<p>a) Mit einem Wassersprudler wird Sprudelwasser hergestellt.* Mit einem pH-Wert-Indikator wird der Säuregehalt bestimmt in:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Einem Becherglas mit Meerwasser (pH = 8,1)</li> <li>- Einem Becherglas mit Sprudelwasser (pH = 5,5)</li> </ul> <p>*so wird sichtbar gemacht: CO<sub>2</sub>-Gas kann mit Druck in das Wasser gepresst werden.</p> <p>b) In einem Erlenmeyerkolben wird Meerwasser (pH = 8,1) mit Bromthymolblau versetzt (blau). CO<sub>2</sub> wird in Form von Trockeneis hinzugegeben bis sich eine Farbveränderung zeigt (über grün zu gelb).</p>
<p>3. <b>Woher kommt das CO<sub>2</sub>?</b> → Durch (anthropogene) Verbrennungsprozesse, nicht nur durch den Verkehrssektor</p> <p><b>Ergänzung: Wie können CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert werden?</b> → nachhaltige Energieumwandlungsprozesse ohne Verbrennung</p>	<p><u>Demoversuch</u> Die Quellen der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Verbrennungsprozessen können phänomenologisch über die Verbrennung von Propangas in einem Camping-Kocher und der Kalkwasserprobe sichtbar gemacht werden. Es wird sichtbar:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> entsteht</li> <li>- Wärme entsteht (z. B. nutzbar zum Kochen, Heizen)</li> </ul> <p>Hier bietet es sich an, verschiedene Energieformen zu thematisieren, wie:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Chemische Energie → Bewegungsenergie (Auto)</li> <li>- Chemische Energie → Wärmeenergie (Heizen, kochen)</li> <li>- Chemische Energie → elektrische Energie (Kraftwerke zur Stromerzeugung)</li> </ul> <p>Um Handlungsoptionen zu vermitteln, können emissionsfreie Energieformen thematisiert werden, wie die Energieumwandlung durch Solarzellen, Windräder und Wasserkraft.</p>

### 6.2.2 Der Treibhauseffekt: *conceptual growth* und *reconstruction*

Innerhalb der Wirkzusammenhänge ist insbesondere die Entstehung der Erderwärmung anfällig für Unterschiede zwischen den subjektiven Theorien (Abschnitt 5.3). Das stark fragmentierte Wissen zur Erderwärmung und die großen Unterschiede in den Vorstellungen zum Treibhauseffekt erfordern eine starke Orientierung an der spezifischen Lerngruppe. Auch hier bietet es sich an, zu Beginn dieser Einheit individuelle Vorstellungen zum Treibhauseffekt zu erfassen, beispielsweise in Form von sprachlichen Äußerungen oder Zeichnungen (Abb. 17 e). Hier ist zu erwarten, dass ein Großteil der Vorstellungen wenig detailliert und wissenschaftsfern ausfällt (Abschnitt 5.2.4, Abb. 11). *Conceptual growth* bzw. *reconstruction* kann anhand der individuellen Konzepte erfolgen, wenn für die Lernenden

individuell sichtbar gemacht wird, dass das „neue“ bzw. „andere“ Konzept plausibler (Krüger, 2007) ist. Die Fruchtbarkeit des Experimentes kann am Ende der Einheit durch das Reflektieren individueller Vermutungen erfolgen (Abb. 18 f). Auch hier kann ein problemorientierter Einstieg in die experimentelle Untersuchung der Wirkzusammenhänge funktional sein (Abb. 18 a - d). Aufgrund der elementaren Wissenslücken bei den Primarschüler:innen werden komplexe klimatische Veränderungen, wie Klimazonenverschiebungen, in dieser Lehr-Lern-Einheit nicht berücksichtigt. Da selbst Schüler:innen der Sekundarstufe Unterscheidungsschwierigkeiten zwischen Lichtstrahlung und Wärmestrahlung haben (Niebert, 2010), könnte eine Differenzierung in verschiedene Strahlungsarten für die Primarschüler:innen überfordernd sein. Daher findet eine Unterscheidung in dieser Einheit nicht statt. Um die Bedeutung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre auf die Temperatur zu veranschaulichen, eignet sich ein einfacher experimenteller Ansatz (Tab. 5). Im Vergleich zur Raumluft wird mit CO<sub>2</sub> angereicherte Luft zur Vereinfachung direkt mit Wärme-Strahlung im IR-Bereich bestrahlt. Da die Einstellungen der Strahlungsquelle sowie die Begrenzungsschicht durch den Erlenmeyerkolben konstant bleiben, kann ein Konzeptwechsel von der Vorstellung eines erhöhten Strahlungs-Inputs hin zu der Vorstellung eines verminderten Strahlungs-Outputs durch das Treibhausgas CO<sub>2</sub> erfolgen. Der Versuch veranschaulicht, dass die Menge des Treibhausgases beeinflusst, wie stark die Erwärmung ausfällt.



**Abb. 18** Comic für einen problemorientierten Einstieg in ein Experiment zur Erderwärmung. Die Problemorientierung ist Teil des forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahrens nach Schmidkunz & Lindemann (1992) und soll eine individuelle Rekonstruktion individueller Vorstellungen ermöglichen. Digitale Zeichnungen: Mara Garbe.

**Tab. 5** Modellversuch zum Treibhauseffekt für Primarschüler:innen. Die Versuche wurden mit Schüler:innen der Jahrgangsstufen fünf und sechs bereits erfolgreich durchgeführt und in ihrer Durchführbarkeit optimiert.

Versuchsfragestellung und Erkenntnis	Versuchsdurchführung
<p>4. <b>Wie kommt es zu einer Erwärmung der Atmosphäre?</b>  → Je mehr CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre, desto stärker erwärmt sie sich.</p>	<p>Zwei mit Septen verschlossene Erlenmeyerkolben werden mit einer IR-Lampe bestrahlt und die Temperatur im Innenraum gemessen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erlenmeyerkolben mit Luftgemisch</li> <li>- Erlenmeyerkolben mit angereichertem CO<sub>2</sub> (z. B. über den Wassersprudler)</li> </ul>

### 6.2.3 Meeresspiegelanstieg: *conceptual reconstruction*

Die Schüler:innenvorstellungen über den Einfluss von schmelzendem Meereis auf den Meeresspiegel waren hauptsächlich wissenschaftsfern. Das lebensweltnahe *Polareis-Überflutungskonzept* ist eine für Grundschüler:innen plausibel erscheinende Vorstellung, die im Vergleich mit vergangenen Studien zu den Präkonzepten von Oberstufenschüler:innen (u. a. Conrad, 2012) als äußerst belehrungsresistent zu interpretieren ist. Da Schüler:innenvorstellungen schwer veränderbar sind (Hamman & Asshoff, 2017), müssen die alternativen Konzepte überzeugend sein, um *conceptual reconstruction* zu ermöglichen. Zum Einstieg sollen zwei seriös wirkende mediale Inhalte gegenübergestellt werden, die einander widersprechen (Abb. 19). Ziel ist, diese anhand einer experimentellen Einheit zum Meeresspiegelanstieg bezüglich ihrer Wissenschaftsnähe bewerten zu können. Verschiedene (u. a. mediale) Darstellungen komplexer Zusammenhänge zum Klimawandel (u. a. WWF, 2020; NDR, 2023) rufen vor allem dann Unsicherheiten hervor, wenn das naturwissenschaftliche Verständnis über diese Zusammenhänge gering ist (Bord et al., 2000). Die im Einstieg geplante hervorgerufene Verunsicherung sollte zum Ende der Versuchsreihe einem Gefühl von Sicherheit durch naturwissenschaftliches Verständnis weichen. In der Versuchsreihe sollen zunächst die Schmelzprozesse der Polarregionen in zwei Bechergläsern unter Wärmebestrahlung modelliert werden (Tab. 6), sodass für die Schüler:innen sichtbar wird, dass das Schmelzen der Arktis nicht zum Meeresspiegelanstieg beiträgt (Alfred-Wegener-Institut, 2020). Die *conceptual reconstruction* des *Polareis-Meeresspiegelanstiegs-Konzeptes* kann über die erneute Positionierung der sich widersprechenden Aussagen (Abb. 19) sichtbar gemacht werden. Zur Konzept-Erweiterung dient ein weiteres Experiment, das den Einfluss der Temperatur auf den Meeresspiegel veranschaulicht (Tab. 6).

### Aufgabe: Positioniere dich – wer hat Recht?

<p style="color: blue; font-weight: bold;">Der WWF schreibt...</p> <p style="font-weight: bold;">Arktische Eisschmelze bedroht Menschen weltweit [...]</p> <p>Mehr als eine Milliarde Menschen weltweit in den Küstenregionen werden im Jahr 2050 unter den Folgen schmelzenden Eises leiden. Auf der ganzen Welt werden Menschen ihre Heimat aufgrund des steigenden Meeresspiegels verlassen müssen.“<sup>1</sup></p>	<p style="color: blue; font-weight: bold;">Der NDR schreibt...</p> <p>„ [...] Das Meereis der Arktis [...] Das schmelzende Meereis trägt - anders als die schmelzenden Gletscher in [der Antarktis] - nicht direkt zum Meeresspiegelanstieg bei, weil es bereits im Wasser ist.“<sup>2</sup></p>
---	--

**Abb. 19 Einstieg und Ausstieg für die experimentelle Lehr-Lern-Einheit zum Meeresspiegelanstieg.** Die zweifache Positionierung soll a) den Lernprozess sichtbar machen und b) am Ende der Lehr-Lern-Einheit ein Sicherheitsgefühl vermitteln. <sup>1</sup>WWF, 2020; <sup>2</sup>NDR, 2023.

**Tab. 6 Versuche zu Einflussfaktoren auf den Meeresspiegelanstieg.** Die Versuche wurden mit Schüler:innen der Jahrgangsstufen fünf und sechs bereits erfolgreich durchgeführt und in ihrer Durchführbarkeit optimiert.

Versuchsfragestellung und Erkenntnis	Versuchsdurchführung
<p>5. <b>Was passiert, wenn das Polareis schmilzt?</b> → Das Eis der Arktis hat keinen Einfluss auf den Meeresspiegel. Das Eis der Antarktis hat einen Einfluss auf den Meeresspiegel.</p>	<p>Die Arktis und die Antarktis werden simuliert in:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Becherglas 1: Eiswürfel am Boden</li> <li>- Becherglas 2: Eiswürfel auf einem kleinen umgedrehten Becherglas</li> </ul> <p>Beide Bechergläser werden bis zur gleichen Höhenmarkierung aufgefüllt. Die Veränderung des Flüssigkeitsspiegels wird nach dem Schmelzen des Eises verglichen.</p>
<p>6. <b>Warum steigt der Meeresspiegel?</b> → Der Meeresspiegel steigt durch die Erderwärmung, denn warmes Wasser nimmt mehr Volumen ein.</p>	<p>Ein Erlenmeyerkolben wird vollständig mit Wasser gefüllt, dicht mit einem Stopfen mit Steigrohr verschlossen und mit einer IR-Lampe erwärmt.</p>

#### 6.2.4 Die Rolle der Pflanzen

Die Schüler:innenvorstellungen zu den Handlungsoptionen im Klimawandel haben gezeigt, dass die Lernenden den Pflanzen größtenteils keine große Bedeutung als Einflussfaktor im Klimawandel zuschreiben. Die wissenschaftsnächste Denkfigur zur Rolle der Pflanzen im Kohlenstoffkreislauf laut Nibert (2010) erfordert das Verständnis über die Entstehung des anthropogenen Ungleichgewichtes von Verbrennung und Abholzung. Um die steigenden Emissionen und die schrumpfenden natürlichen Senken zu verdeutlichen, wird eine Abwandlung des Priestley-Versuchs modellhaft genutzt (Kremer, 2011). Dass bei der Verbrennung fossiler Energieträger Kohlenstoffdioxid entsteht, wissen die Schüler:innen

bereits aus Experiment 3 (Tab. 4). Die Schüler:innen sollen eine Kerze entzünden, die durch das Abdecken mit einem Becherglas erlischt (Tab. 7). Zum Übergang in den Modellversuch wird das beobachtete Phänomen auf einer laminierten Karte dargestellt. Eine weitere Karte zeigt, dass die Kerze nicht erlischt, wenn sich eine Pflanze mit unter der Kuppel befindet. Hier wird deutlich, dass Verbrennungsprozesse und Pflanzen über einen  $\text{CO}_2\text{-O}_2$ -Gasaustausch in einem Gleichgewicht existieren. Durch entweder überschüssiges  $\text{CO}_2$  oder weniger Pflanzen verändert sich dieses Gleichgewicht, was in zwei weiteren Karten über Pfeile dargestellt werden kann (Tab. 7). Zusätzlich bietet es sich an, die Ausatemluft experimentell mittels Kalkwasserprobe auf den  $\text{CO}_2$ -Gehalt zu untersuchen. In Abhängigkeit von der Lerngruppe können weitere Faktoren, wie der Einfluss von Licht, der Einfluss von Wasser sowie die Umwandlung von Licht in chemische Energie (Kremer, 2011) ergänzt werden.



**Tab. 7 Modellversuch nach Priestley (Kremer, 2011) zum Verständnis von Pflanzen im Klimasystem.** Die laminierten Karten können durch die Schüler:innen anhand von Pfeilen beschriftet werden. Die Abbildungen wurden erstellt mit Apple Pages.


Versuchsfragestellung und Erkenntnis	Versuchsdurchführung	
<p><b>7. Welcher Zusammenhang besteht zwischen Menschen und Pflanzen im Klimasystem?</b></p>		
<p><b>Teil 1:*</b> → Menschen atmen CO<sub>2</sub> aus.</p>	<p>Die eigenen Ausatemluft wird in eine Plastiktüte gepustet und die Kalkwasserprobe durchgeführt.*</p>	
<p><b>Teil 2:</b> → Verbrennungsprozesse (unter CO<sub>2</sub>-Abgabe; bereits bekannt aus Versuch 4) kommen ohne Luftaustausch zum Erliegen.</p>	<p>Eine brennende Kerze wird mit einem Becherglas überdeckt.</p>	
<p><b>Teil 3:</b> → Vollständig isoliert voneinander sterben Tiere und Pflanzen; vollständig isolierte Verbrennungsprozesse kommen zum Erliegen.</p> <p>→ Tiere und Pflanzen überleben gemeinsam; Verbrennungsprozesse laufen ab, wenn Pflanzen im System vorhanden sind.</p> <p>→ Die Menge der entstehenden Gase CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> ist von der Menge der Quellen und Senken</p>		
<p>* Zusatz in Abhängigkeit von der Lerngruppe</p>		





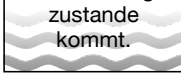
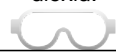










### 6.2.5 Abschluss der Reihe

Eine Lerneinheit übergreifende Sicherung wird abschließend spielerisch über ein Bingo mit begleitendem Unterrichtsgespräch realisiert, das u. a. auch ursachenorientierte Handlungsoptionen enthält (Abb. 20). Alternativ können die Schüler:innen auch selbst ein Bingo für Ihre Mitschüler:innen erstellen. Als abschließende Aufgabe bietet es sich auch an, die gelernten Begriffe in einer Concept-Map anzuordnen, um die individuellen (veränderten) Vorstellungen zu visualisieren und die Lehr-Lern-Einheit ggf. auf ihre Wirksamkeit zu evaluieren. Im Fokus der konzipierten Versuchsreihe steht das Verständnis

der Ursachen des Klimawandels. Da diese mit Handlungsmöglichkeiten zusammenhängen, würde es sich perspektivisch anbieten, gemeinsam mit den Schüler:innen Handlungsmöglichkeiten – auf individueller sowie auf gesellschaftlicher Ebene – zu erarbeiten und zu diskutieren.

**KLIMA BINGO**  
*Kannst du Hermit retten?*



<p>Ich komme zu Fuß oder mit dem Fahrrad zur Schule.</p> 	<p>Ich habe Interesse an neuen Informationen zum Klimawandel.</p> 	<p>Ich kenne eine Ursache für den Klimawandel.</p> 	<p>Ich schalte Elektrogeräte aus, wenn ich sie nicht brauche.</p> 
<p>Ich kann erklären, wie die Ozeanversauerung zustande kommt.</p> 	<p>Ich kenne eine Nachweisreaktion für Kohlenstoffdioxid.</p> 	<p>Ich weiß, welches Gas die Erderwärmung beschleunigt.</p> 	<p>Ich weiß, wie man einen pH-Wert bestimmt.</p> 
<p>CO<sub>2</sub> reflektiert Wärmestrahlung zurück zur Erde und beeinflusst die Temperatur auf der Erde.</p> 	<p>Ich kenne große CO<sub>2</sub>-Verursacher in Deutschland.</p> 	<p>Ich habe Ideen, wie ich zum Klimaschutz beitragen kann.</p> 	<p>In meinen letzten Urlaub bin ich nicht geflogen.</p> 
<p>Ich verstehe, wieso der Klimawandel für Hermit so bedrohlich ist.</p> 	<p>Ich weiß, welchen Effekt ein Treibhausgas hat.</p> 	<p>Ich weiß, wie man sich richtig im Labor verhält.</p> 	<p>Ich kenne wichtige Laborgeräte.</p> 

**Abb. 20 Klima-Bingo zur themenübergreifenden Wiederholung der Lehr-Lerneinhalte.** In einem begleitenden Unterrichtsgespräch kann das Bingo zur Sicherung genutzt werden. Die Abbildung wurde erstellt mit Apple Pages. Digitale Zeichnung des Einsiedlerkrebses: Mara Garbe.

### 6.3 Methodische Diskussion (Limitationen)

Die Kombination aus Fragebogenerhebung und Interview-Studie deckte ein breites methodisches Spektrum ab. Über die Quantifizierung von Vorstellungselementen zum Klimawandel konnten Aussagen über Vorstellungselemente von Berliner Fünftklässler:innen getroffen werden, während Einzelinterviews Aufschlüsse über individuelle Erklärungszusammenhänge zwischen diesen Elementen lieferten.

#### 6.3.1 Fragebogenerhebung

Die schriftliche Befragung erfüllte die Funktion, über eine große Stichprobe möglichst repräsentativ vom Individuum induktiv auf das Allgemeine zu schließen (Mayring, 2015) und Aussagen über die Grundgesamtheit der Berliner Fünftklässler:innen bezüglich häufig vorkommender Vorstellungselemente zu treffen.

Die Verwendung von offenen Fragen ermöglichte ein exploratives Vorgehen. Da die Vorstellungen von Primarschüler:innen zum Klimawandel erstmals erfasst wurden, war das Vorgehen zielführend. Es ist jedoch anzumerken, dass die Ergebnisse sich ausschließlich auf die expliziten Nennungen bestimmter Begriffe innerhalb bestimmter Denkfiguren beziehen. Nicht-genannte Begriffe kommen nicht in den Ergebnissen vor, können aber trotzdem Teil der kognitiven Konzepte der Schüler:innen sein. Beispielsweise gaben 60 % der Befragten die Erderwärmung als Folge des Klimawandels an. Die Zahl könnte bei geschlossenen Fragen deutlich höher sein, da die Abfrage nach einer Zustimmung oder Ablehnung auch eine Antwort von denjenigen verlangt, die den Begriff nicht selbstständig genannt haben. Dass auch geschlossene Fragen für die Erfassung von Schüler:innenvorstellungen zielführend sein können, haben u. a. Boyes & Stanisstreet (1993) gezeigt. Allerdings generierten sie ihren Fragebogen anhand von Antworten auf offene Fragen in einer vorangegangenen Befragung. Ein entsprechendes Vorgehen könnte für die Ergebnisse dieser Arbeit genutzt werden, um einen geschlossenen Fragebogen zu erstellen. So könnte es Lehrkräften ermöglicht werden, Schüler:innenvorstellungen von Primarschüler:innen zum Klimawandel

unter geringem Zeitaufwand zu ermitteln und ihren Unterricht schüler:innenorientiert didaktisch zu strukturieren (Gropengießer, 2006).

Die offenen Fragen orientierten sich am Fragebogen von Schuler (2011), der aufgrund des Alters der Lernenden angepasst wurde. Die Entwicklung des Fragebogens entspricht daher einer Neuentwicklung, die Limitationen im Bereich der Aussagekraft sowie der Vergleichbarkeit mit vorangegangenen Studien aufweist. Ob die entwickelten Fragen tatsächlich die zu messenden Vorstellungselemente erfassen, könnte über eine Validitätsstudie untersucht werden. Hier wäre allerdings zu beachten, dass auch wissenschaftsferne Vorstellungen valide Antwortelemente darstellen können. Bezüglich der Objektivität wurde auf gleichbleibende Untersuchungsbedingungen bei der Durchführung Wert gelegt, um Störfaktoren zu minimieren. Da die Befragungen morgens um 9 Uhr stattfanden, waren die Schüler:innen größtenteils ruhig und konzentriert. Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass vereinzelt bei der benachbarten Person abgeschrieben wurde. Unterschiede in den Gruppendynamiken der verschiedenen Lerngruppen könnten außerdem das individuelle Antwortverhalten einzelner Schüler:innen beeinflusst haben.

Die Auswertungs- und Interpretationsobjektivität des Fragebogens wurde durch das zyklische Vorgehen bei der Erstellung des Kategoriensystems erhöht, da die Fragebögen so mehrfach analysiert wurden. Zur weiteren Erhöhung der Auswertungs- und Interpretationsobjektivität könnte zusätzlich eine zweite Person ein Kategoriensystem erstellen und/oder die Fragebogenantworten quantifizieren. Eine weitere Limitation der Fragebogenuntersuchung ist ihre Replizierbarkeit. Die Möglichkeit einer Mehrfach-Befragung der Schüler:innen-Gruppen zur Erhöhung der Reliabilität bot sich im Rahmen des einmaligen Besuches der Schüler:innen im NatLab nicht an.

### 6.3.2 Einzelinterviews

Im Fokus der Einzelinterviews standen die individuellen detaillierten Erklärungsansätze einzelner Schüler:innen. Das leitfragenorientierte, problemzentrierte Interview (Witzel, 1985; Kurz et al., 2007) bot den Vorteil, auch im Detail auf individuelle Vorstellungen eingehen zu können und spezifische Nachfragen zu stellen.

Die synchrone Strukturvisualisierung der individuellen Vorstellungselemente während des Interviews durch die befragte Person ermöglichte indirekt eine kommunikative Validierung der Struktur-Maps (Schuler, 2011; Mayring, 2015). Da die Struktur-Map in einem mehrschrittigen zeitaufwendigen Prozess anhand des Interviewtranskriptes erstellt wurde, konnten die befragten Schüler:innen nicht mehr am selben Tag zu ihrer Übereinstimmung mit der erstellten Map befragt werden. Die im Interview erstellte Map diente so der Erhöhung der Validität. Zur Erhöhung der Reliabilität wurde das Material zwei Mal mit verschiedenen Methoden analysiert. Die Aussagen des Interviews wurden sowohl händisch paraphrasiert, generalisiert und reduziert als auch in MAXQDA direkt codiert.

Als spezifisches Gütekriterien der qualitativen Inhaltsanalyse führt Mayring (2015) die Interrater-Reliabilität an, die in MAXQDA bestimmt wurde. Da die detaillierten individuellen Vorstellungen bei der Codierung der Interviews im Fokus standen, wurde durch offenes und größtenteils induktives Codieren ein sehr dicht am Material liegendes und differenziertes Kodierungssystem (Rädiker & Kuckartz, 2018) mit 105 verwendbaren Codes aufgestellt (Anhang 9.6). Die Codes waren übergeordneten Kategorien zugeordnet, um sie inhaltlich anhand des Interviewleitfadens zu strukturieren (Rädiker & Kuckartz, 2018). Die Interview-Transkripte wurden sowohl zur Aufstellung als auch zur Anwendung des Kategoriensystems genutzt. Zur Überprüfung der Interrater-Reliabilität wurde das Kategoriensystem von einer zweiten Person auf das Datenmaterial angewendet (Rädiker & Kuckartz, 2018). Das Kategoriensystem wurde nach dem ersten Durchgang spezifiziert, sodass die Codierung anschließend unabhängig voneinander nochmals für das gesamte Datenmaterial vorgenommen wurde. Die Interrater-Reliabilität wurde mit MAXQDA berechnet und die Übereinstimmung des Vorhandenseins der Codes lag bei 90,7 %. Für die jeweiligen

Interviews lag der zufallskorrigierte Koeffizient Kappa (nach Brennan und Prediger, 1981) zwischen 0,88 und 0,93 (Tab. 8).

**Tab. 8 Bestimmung der Interrater-Reliabilität anhand der Überprüfung der Übereinstimmung der zugewiesenen Codes durch zwei Rater.**

Dokumentname	Übereinstimmung	Nicht-Übereinstimmung	Prozentual	Kappa (RK)
Audiotranskript - B3	114	11	91,20	0,91
Audiotranskript - B2	116	9	92,80	0,93
Audiotranskript - B1	110	15	88,00	0,88
<Total>	340	35	90,67	-

Die Codeüberlappung an Segmenten bei einer Vorgabe eines Überlappungsintervalls von mind. 95 % lag bei 30,8 %. Bei erneuter Durchsicht war der niedrige Wert zum Großteil auf die Länge der codierten Segmente zurückzuführen und nicht auf die inhaltlich interpretierte Aussage. Hier erschwerten insbesondere die Antworten der Schüler:innen den Codiervorgang, da sie in einer Antwort oft mehrere Elemente nannten und diese mit weiteren, sich nicht auf die Frage beziehenden, Elementen in Verbindung brachten. Durch das Unterbrechen von Sätzen wurden einem Code teilweise mehrere Zeilen, mehrere Textstellen oder lediglich einzelne Wörter zugewiesen. Insbesondere Codes, die eine Interpretationsleistung erforderten (wie „Strahlen [...] gehen [...] leichter rein als raus“ (Anhang 9.4, Interview B2, Z. 67) für einen „erhöhten Strahlungsinput“) waren anfällig für Abweichungen in den Codierungen bzw. der Anzahl der zugeordneten Codes.

Auf inhaltlicher Ebene bot das differenzierte Code-System den Vorteil, wenig Interpretationsspielraum und eindeutige Zuordnungen zuzulassen. Ein Nachteil der starken Differenzierung war jedoch die Verringerung der Vergleichbarkeit zwischen den Interviews, da die Aussagen im Gegensatz zur Fragebogenerhebung weniger verallgemeinernden Konzepten zugeordnet wurden. Das Kategoriensystem ließe sich jedoch in seinem Abstraktionsgrad anpassen (Rädiker & Kuckartz, 2018), um die Interviews anhand

übergeordneter Kategorien zu codieren, um – wie in der Fragebogenerhebung – vorzugsweise Vorstellungselemente zu identifizieren.

Da mit den Interviews die subjektiven Theorien von Einzelpersonen ermittelt wurden, ist eine Übertragung der Vorstellungen auf die Grundgesamtheit nicht uneingeschränkt möglich, da eine Generalisierbarkeit mit dem methodischen Vorgehen der Einzelperson-Fokussierung nicht sichergestellt werden kann (Niebert, 2010). Daher ist anzunehmen, dass das Durchführen weiterer Interviews zu einer Erweiterung des Kategoriensystems führen würde. Die Ergebnisse wären dann gesättigt, wenn keine neuen Vorstellungen mehr erhoben würden (Niebert, 2010). In Anbetracht der Einzigartigkeit von Vorstellungen (Straub & Thesing, 2023) müsste die Datenmenge dafür sehr hoch sein. Für den Unterricht könnte es daher zielführend sein, die Vorstellungen der eigenen Lerngruppe ausschließlich für einen kleinen Teilbereich des Themas Klimawandel zu erheben.

Neben der qualitativen Erfassung von Assoziationen bestünde die Möglichkeit, diese bei einer größeren Datenmenge über ihre Frequenz zu quantifizieren (Duit et al., 1981; auch Mayring, 2015). Dieses Vorgehen würde sich vor allem dann anbieten, wenn Vorstellungen auf der Prozessebene detailliert erfasst werden sollen und zudem verallgemeinernde Aussagen getroffen werden sollen. Beispielsweise fasste Schuler (2011) Einzel-Mappings in sogenannten „Model-Mappings“ zusammen, indem er ähnliche Konzepte bündelte, häufig wiederkehrende Konzepte identifizierte und sie jeweils in die zusammenfassende Map integrierte.

Für die offene und explorative Erhebung detaillierter individueller Vorstellungen war das Vorgehen der Einzelerhebungen sinnvoll. Eine Erhöhung der Datenmenge würde ein Anpassen der Methoden erfordern. Auf der Durchführungsebene könnte ein festgelegter Interview-Leitfaden für eine bessere Vergleichbarkeit genutzt werden. Da dies mit Einbußen in der Rücksichtnahme auf die Vorstellungen des Individuums einhergehen würde, könnte

auch an der Auswertungsebene angesetzt werden. Dafür könnte ein kürzeres und übergreifendes Kategoriesystem erstellt werden, das die Schüler:innenaussagen stärker abstrahiert.

Die Einzelfallorientierung der Interviews gibt nur begrenzt Aufschluss über die Grundgesamtheit, da es sich um zufälliges, nicht-repräsentatives Material handelt (Mayring, 2015). Während der Interviews stellte sich zum Beispiel heraus, dass sich individuell große Unterschiede in der Redebereitschaft zeigten. So äußerte die Schülerin B1 detaillierte Konzepte, die teilweise weit über die Fragestellungen hinausgingen. Die Schüler B2 und B3 gaben bevorzugt kurze Antworten. Jedoch sind Verallgemeinerungen aus diesen Einzelfällen in begrenztem Umfang trotzdem legitimiert, zum Beispiel dann, wenn man sie „dem begrenzten und lokal beschränkten Untersuchungszweck“ (Heinze et al., 1975, S. 70), wie der Entwicklung möglicher Lerngelegenheiten, anpasst. Die Ergebnisse dieser Studie haben gezeigt, dass immer wiederkehrende wissenschaftsferne Konzepte von Sekundarschüler:innen, wie *Verschmutzungskonzepte* (Niebert, 2010), das *Lochkonzept* (Boyes & Stanisstreet, 1997) oder das *Polareis-Überflutungs-Konzept* (Conrad, 2012), auch bei Grundschüler:innen vorkommen. Daraus lässt sich schließen, dass diese Konzepte (auch) auf außerschulische Informationsquellen zurückzuführen sind und nicht erst im Laufe des naturwissenschaftlichen Unterrichts entstehen. Umso wichtiger ist ein frühzeitiges Lernangebot zur Erweiterung der Konzepte der Kinder, um sowohl ihr Verständnis als auch ihre Handlungsfähigkeit in der Klimakrise zu erweitern.



## 7 Fazit und Ausblick

Um die bedrohliche Entwicklung des anthropogenen Klimawandels zu verlangsamen bzw. zu stoppen, ist ein gesellschaftliches Umdenken und politisches Handeln erforderlich. Entscheidungsgrundlage bilden vor allem naturwissenschaftliche Erkenntnisse über die Beeinflussbarkeit von Klimaprozessen. Ein fachwissenschaftliches Verständnis ist das Fundament für die Fähigkeit, Entscheidungen zu treffen, Informationen kritisch zu hinterfragen und Maßnahmen zur Reduktion der Klimakrise zu bewerten. Die junge Generation ist in der Position, die Folgen des Klimawandels in ihrem vollen Umfang zu erleben. Gleichzeitig wird diese Generation zunehmend in der Position sein, die Folgen abwenden zu müssen.

Die Untersuchung zu den Präkonzepten von Lernenden der Primarstufe in Berlin hat gezeigt, dass vor allem außerschulische Informationsquellen zu lebensweltnahen Vorstellungen führen und dass diese den naturwissenschaftlichen Erkenntnissen – insbesondere auf der Prozessebene – oft widersprechen. Die einzelnen Vorstellungselemente erstrecken sich von wissenschaftsfernen Vorstellungselementen, wie Müll als Ursache des Klimawandels, bis hin zu wissenschaftsnahen Vorstellungselementen, wie dem Treibhausgas CO<sub>2</sub> als klimawandelverursachend. Die komplexen globalen Prozesse der Erderwärmung sind anfällig für Unterschiede zwischen den subjektiven Theorien individuell befragter Schüler:innen. Sowohl in der Fragebogenerhebung als auch in den Einzelinterviews zeigte sich eine Gemeinsamkeit der befragten Fünftklässler:innen in der Wiederkehr des *Polareis-Überflutungskonzeptes*. Dieses ist – auch im Vergleich mit vergangenen Studien und vor dem Hintergrund medialer Fehlinformationen - als äußerst belehrungsresistent einzustufen.

Der große Teil lebensweltnaher Vorstellungen der Primarschüler:innen in Berlin zeigt, dass die Klimabildung zum aktuellen Zeitpunkt einen zunehmenden Stellenwert in der schulischen Bildung einnehmen sollte. Insbesondere in der Primarstufe kann der langfristigen Festigung von wissenschaftsfernen Konzepten frühzeitig entgegengewirkt

werden. Lernen ist insbesondere dann erfolgreich und nachhaltig, wenn Schüler:innenvorstellungen miteinbezogen werden und *conceptual change* ermöglicht wird. Die didaktischen Implikationen dieser Arbeit bieten Lehrkräften eine Möglichkeit, die Klimabildung unter Berücksichtigung des Lehrplans (Anhang 9.8) in ihren NaWi-Unterricht zu integrieren und die Präkonzepte vor allem durch einen experimentellen Vermittlungsansatz zu verändern. Insbesondere der Besuch außerschulischer Lernorte bietet sich hier aus zeitökonomischen Gründen an.

Die Limitationen des methodischen Vorgehens könnten in einer weiteren Studie minimiert werden, um verlässlichere Ergebnisse in Bezug auf die Präkonzepte der Schüler:innen in Berlin zu liefern. Konkret würden sich eine größere Stichprobe für die Interviews eignen, um allgemeingültigere Häufigkeitsaussagen über konkrete Assoziationsketten innerhalb der subjektiven Theorien zu treffen. Wie auch in der Fragebogenerhebung könnten wiederkehrende Assoziationsketten über eine Frequenzanalyse nach Mayring untersucht werden. Eine Erweiterung der Grundgesamtheit auf nationaler bzw. internationaler Ebene würde Untersuchungen zu häufig reproduzierten Präkonzepten, aber auch vergleichende Analysen zu regionalen Unterschieden zulassen. Die Erweiterung der Stichprobe auf andere Bundesländer würde Hinweise für die Umsetzung nationaler didaktischer Konzepte liefern, die in Anbetracht der Tragweite des Klimawandels zu begrüßen wären. Die Entwicklung schüler:innenorientierter didaktischer Konzepte könnte erleichtert werden, indem ein Tool entwickelt wird, das häufig auftretende Schüler:innenvorstellungen im Unterricht ohne großen Zeitaufwand abfragt und das zielgerichtete Einsetzen konkreter Unterrichtsmaterialien ermöglicht (Straub & Thesing, 2023). Die entwickelten Lerngelegenheiten werden derzeit im Schülerlabor NatLab der Freien Universität Berlin im Rahmen eines von mir entwickelten Kurses zum Klimawandel angeboten. Über eine Evaluation des Kurses könnte die Wirksamkeit der Experimente auf die Konzeptveränderung von Schüler:innen untersucht werden, auch dahingehend, ob Schüler:innen die Beobachtungen der Laborsituationen auf Phänomene des Klimawandels erfolgreich anwenden können (Conrad, 2012).

## 8 Literaturverzeichnis

- Alfred-Wegener-Institut (2020). Was passiert, wenn die Polkappen schmelzen?. In Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V. (Hrsg.), *Experimente für Zuhause, Vol. 3* (S. 8-9). Frankfurt a. M.: Druck- und Verlagshaus Zarbock.
- Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union (2016). *Übereinkommen von Paris*. Amtsblatt der Europäischen Union, Zugriff am 16.08.2023 um 11.44 Uhr unter [https://www.focus.de/wissen/natur/schueler-in-berlin-wollen-klimawandel-im-lehrplan-haben\\_id\\_10284962.html](https://www.focus.de/wissen/natur/schueler-in-berlin-wollen-klimawandel-im-lehrplan-haben_id_10284962.html)
- Arbeitsgemeinschaft der öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten der Bundesrepublik Deutschland (ARD) alpha, (2023). *Klimawandel lässt Pegel steigen*. Zugriff am 02.05.23 um 14.22 Uhr unter <https://www.ardalpha.de/wissen/umwelt/klima/klimawandel/meeresspiegel-steigt-klimawandel-meer-eis-eisschmelze-pole-100.html>
- Bertelsmann-Stiftung (2022). *Was bewegt die Jugend in Deutschland? Einstellungen und Sorgen der jungen Generation Deutschlands*. Liz Mohn Center. Ansprechpartner: Habich, J., 1. Auflage. Zugriff am 24.06.23 um 14.28 Uhr unter <https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/publikationen/publikation/did/was-bewegt-die-jugend-in-deutschland>
- Billion-Kramer, T., Lohse-Bossenz, H., Dörfler, T., & Rehm, M. (2021). *Nature of Science*. Wiesbaden, Heidelberg: Springer.
- Bissinger, K. (2018). Environmental Literacy: eine Studie zu Schülervorstellungen, kognitivem Wissen, Umwelteinstellungen und umweltbewusstem Verhalten. Doctoral dissertation. Universität Bayreuth.
- Bondeau A., Smith, P. C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., Müller, C., Reichstein, M., & Smith, B. (2007). Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology*, 13, 679-706.
- Bord, R. J., O'connor, R. E., & Fisher, A. (2000). In what sense does the public need to understand global climate change?. *Public understanding of science*, 9(3), 205.
- Boyes, E., & Stanisstreet, M. (1993). The 'Greenhouse Effect': Children's perceptions of causes, consequences and cures. *International Journal of science education*, 15(5), 531-552.
- Boyes, E., & Stanisstreet, M. (1997). Children's models of understanding of two major global environmental issues (ozone layer and greenhouse effect). *Research in Science & Technological Education*, 15(1), 19-28.
- Brennan, R. L., & Prediger, D. J. (1981). Coefficient kappa: Some uses, misuses, and alternatives. *Educational and psychological measurement*, 41(3), 687-699.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWi) & Umweltbundesamt (UBA) (2021). Abbildung: Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren. In *Energiewende direkt*. Ausgabe 03/2021. Zugriff am 24.06.23 um 14.33 Uhr unter [https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2021/03/Meldung/direkt-erfasst\\_infografik.html](https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2021/03/Meldung/direkt-erfasst_infografik.html)
- Collins, J. & Osborne, L. (2021). *Schüler in Berlin wollen Klimawandel im Lehrplan haben*. Deutsche Welle. Veröffentlicht in: Focus online. Zugriff am 16.06.23 um 18.03 Uhr unter [https://www.focus.de/wissen/natur/schueler-in-berlin-wollen-klimawandel-im-lehrplan-haben\\_id\\_10284962.html](https://www.focus.de/wissen/natur/schueler-in-berlin-wollen-klimawandel-im-lehrplan-haben_id_10284962.html)

- Conrad, D. (2012). Schülervorstellungen zur eisigen Welt der Polargebiete. Ergebnisse einer explorativ angelegten Studie. *Geographie und ihre Didaktik | Journal of Geography Education*, 40(3), 105-126.
- Cubasch, U. & Kasang, D. (2000). Die globale Mitteltemperatur im 20. und 21. Jahrhundert. *Petermanns geographische Mitteilungen*, 144(4), 54-55.
- Dameris, M. (2010). Klimawandel und die Chemie der Atmosphäre – wie wird sich die stratosphärische Ozonschicht entwickeln?. *Angewandte Chemie*, 122, 8268-8279.
- Dubs, R. (1995). Konstruktivismus: Einige Überlegungen aus der Sicht Unterrichtsgestaltung. *Zeitschrift für Pädagogik*, 41(6), 889–903.
- Duden (2023). Suchbegriff „Hitze“. Zugriff am 16.07.23 um 15.31 Uhr unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Hitze>
- Duit, R., Jung, W., & Pfundt, H. (1981). *Alltagsvorstellungen und naturwissenschaftlicher Unterricht*. Köln: Aulis-Verlag Deubner.
- Essl, F., Knapp, H., Lexer, M. J., Seidl, R., Riecken, U., Höltermann, A., & Großheim, C. (2013). Naturschutz als Beitrag zum Klimaschutz. In Essl, F., Rabitsch, W. (Hrsg.), *Biodiversität und Klimawandel: Auswirkungen und Handlungsoptionen für den Naturschutz in Mitteleuropa* (S. 263-281). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Feige, E. M., Rutsch, J., Dörfler, T., & Rehm, M. (2017). Von der Alltagsvorstellung zum fachwissenschaftlichen Konzept: Schülervorstellungen diagnostizieren und weiterentwickeln. *Unterricht Chemie*, 159, 2-8.
- Fend, H. (2009). Was die Eltern ihren Kindern mitgeben – Generationen aus Sicht der Erziehungswissenschaft. In Künemund, H., & Szydlik, M. (Hrsg.), *Generationen: Multidisziplinäre Perspektiven* (S. 81-103). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Global Monitoring Laboratory, (2023). Zugriff am 19.06.23 um 14.51 Uhr unter <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/monthly.html>
- Gropengießer, H. (2001). *Didaktische Rekonstruktion des Sehens: Wissenschaftliche Theorien und die Sicht der Schüler in der Perspektive der Vermittlung*. Oldenburg: Carl-von-Ossietzky-Univ, Didaktisches Zentrum.
- Gropengießer, H. (2006). *Wie man Vorstellungen der Lerner verstehen kann: Lebenswelten, Denkwelten, Sprechwelten*. Oldenburg: Didaktisches Zentrum, Carl-von-Ossietzky-Univ. Hochschulschrift. 2., aktualisierte Aufl.
- Gropengießer, H., Kattmann, U., & Krüger, D. (2017). *Biologiedidaktik in Übersichten*. 3. Auflage. Seelze: Aulis.
- Gropengießer, H., Harms, U., & Kattmann, U. (Hrsg.) (2018). *Fachdidaktik Biologie*. 11. Auflage. Seelze: Aulis.
- Guinotte, J. M., & Fabry, V. J. (2008). Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134(1), 320-342.
- Hammann, M. & Asshoff, R. (2017). *Schülervorstellungen im Biologieunterricht. Ursachen für Lernschwierigkeiten*. 3. Auflage. Seelze: Klett, Kallmeyer.
- Haslam, F., & Treagust, D. F. (1987). Diagnosing secondary students' misconceptions of photosynthesis and respiration in plants using a two-tier multiple choice instrument. *Journal of biological education*, 21(3), 203-211.

- Hawkins, E. (2023). *Show your Stripes*. Institute for Environmental Analytics. Zugriff am 16.07.23 um 15.44 Uhr unter <https://showyourstripes.info>
- Heinrich-Dönges, A., Manz, L., Reinhoffer, B., & Weitzel, H. (2018). Forschend Sachunterricht studieren – Integration des forschenden Lernens in der Modulstruktur des Sachunterrichtstudiums. *GDSU Journal*, 8(8), 66-78.
- Heinze, T., Müller, E., Stickelman, B., Zinnecker, J. (1975). *Handlungsforschung im pädagogischen Feld*. München: Juventa.
- Höttecke, D. (2021). *Wissenschaftskommunikation in einer Welt aus Filterblasen, Echokammern und Fake News: Die Beispiele Corona und Klimawandel*. Vortrag. Universität Hamburg. Zugriff am 01.07.2023 um 15.44 Uhr unter [https://klimawandel-schule.de/sites/default/files/2022-06/ringvorlesung\\_hoettecke.pdf](https://klimawandel-schule.de/sites/default/files/2022-06/ringvorlesung_hoettecke.pdf)
- Ibisch, P. L., Molitor, H., Conrad, A., Walk, H., Mihotovic, V., & Geyer, J. (2018). *Der Mensch im globalen Ökosystem. Eine Einführung in die nachhaltige Entwicklung*. München: oekom.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: *Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC)* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor und H.L. Miller, (Eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin, 2007.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013/2014). *Klimaänderung 2013/2014: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Beiträge der drei Arbeitsgruppen zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)*. Deutsche Übersetzungen durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, ProClim, Bonn/Wien/Bern, 2016.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014a). *Klimaänderung 2014: Minderung des Klimawandels. Häufig gestellte Fragen und Antworten – Teil des Beitrags der Arbeitsgruppe III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel und J.C. Minx (Hrsg.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch die Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle und das Deutsche Klimakonsortium, Bonn, 2018.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014b). *Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Häufig gestellte Fragen und Antworten – Teil des Beitrags der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)* [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P.M. Midgley (Hrsg.)]. Deutsche Übersetzung durch die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle und Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg, Bonn, 2017.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014c). *Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)* [Hauptautoren, R.K. Pachauri und L.A. Meyer (Hrsg.)]. IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018). Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: *1,5 °C globale Erwärmung. Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut (IPCC)* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (Hrsg.)]. World Meteorological Organization, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung auf Basis der Version vom 14.11.2018. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, ProClim/SCNAT, Österreichisches Umweltbundesamt, Bonn/Bern/Wien, November 2018.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019) Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: *IPCC-Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima (IPCC)* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (Hrsg.)]. In Druck. Deutsche Übersetzung auf Basis der Onlineversion inklusive Errata vom 2. März 2020. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, Januar 2021.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021a). Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung. In: *Naturwissenschaftliche Grundlagen. Beitrag von Arbeitsgruppe I zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Eds.)]. Deutsche Übersetzung auf Basis der Druckvorlage, Oktober 2021. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien; Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT, ProClim, Bern, Februar 2022.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021b). *Hauptaussagen. Sechster IPCC-Sachstandsbericht (AR6). Beitrag von Arbeitsgruppe I: Naturwissenschaftliche Grundlagen*. Version vom 29. Oktober 2021.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022a). Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (Hrsg.)]. In: *Klimawandel 2022: Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit. Beitrag der Arbeitsgruppe II zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Hrsg.)]. Deutsche Übersetzung auf Basis der Version vom Juli 2022. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn; Die Luxemburger Regierung, Luxemburg; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien; Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT, ProClim, Bern; Oktober 2022.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022b). Hauptaussagen aus der Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem (Hrsg.)]. In: *Klimawandel 2022: Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit. Beitrag der Arbeitsgruppe II zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Hrsg.)]. Deutsche Übersetzung auf Basis der Version vom Juli 2022. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn; Die Luxemburger Regierung, Luxemburg; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien; Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT, ProClim, Bern; Oktober 2022.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023). Hauptaussagen aus der Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung. In: *Klimawandel 2022: Minderung des Klimawandels. Beitrag der Arbeitsgruppe III zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)* [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.)]. Deutsche Übersetzung auf Basis der Version vom Juli 2022. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn; Die Luxemburger Regierung, Luxemburg; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien; Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT, ProClim, Bern; November 2022.
- Jiang, L. Q., Carter, B. R., Feely, R. A., Lauvset, S. K., & Olsen, A. (2019). Surface ocean pH and buffer capacity: past, present and future. *Scientific reports*, 9(1), 18624.
- Kircher, E., Girwidz, R., & Fischer, H. E. (Hrsg.). (2020). *Physikdidaktik - Methoden und Inhalte*. 4. Auflage. Berlin: Springer Spektrum.
- Kiy, M. (2023). *Basiswissen zur Nachhaltigkeit: Klimawandel - Ursachen Folgen und Lösungsansätze*. Köln: TH Köln.
- Koos, S., & Lauth, F. (2020). Die gesellschaftliche Unterstützung von Fridays for Future. In Haunss, S., & Sommer, M. (Eds.), *Fridays for Future - Die Jugend gegen den Klimawandel: Konturen der weltweiten Protestbewegung* (S. 205-226). Bielefeld: transcript Verlag.
- Kremer, B. P. (2011). Photosynthese. In Bannwarth, H., Kremer, B. P., & Schulz, A., *Basiswissen Physik, Chemie und Biochemie* (S. 381-400). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Krüger, D. (2007). Die conceptual change-Theorie. In Krüger, D., Vogt, H., *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung* (S. 81-92). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kurz, A., Stockhammer, C., Fuchs, S., & Meinhard, D. (2007). Das problemzentrierte interview. In Buber, R., Holzmüller H. H. (Hrsg.), *Qualitative Marktforschung: Konzepte—Methoden—Analysen* (S. 463-475). Wiesbaden: Gabler.
- Landesinstitut für Schule und Medien Berlin-Brandenburg (LISUM) (2015a): Rahmenlehrplan für die Jahrgangsstufen 5/6, Naturwissenschaften. Teil C. Zugriff am 16.07.23 um 16.08 Uhr unter [https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche\\_Fassung/Teil\\_C\\_Nawi\\_5-6\\_2015\\_11\\_16\\_web.pdf](https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche_Fassung/Teil_C_Nawi_5-6_2015_11_16_web.pdf)
- Landesinstitut für Schule und Medien Berlin-Brandenburg (LISUM) (2015b): Rahmenlehrplan für die Jahrgangsstufen 7 - 10, Biologie. Teil C. Zugriff am 16.07.23 um 16.37 Uhr unter [https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche\\_Fassung/Teil\\_C\\_Biologie\\_2015\\_11\\_10\\_WEB.pdf](https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche_Fassung/Teil_C_Biologie_2015_11_10_WEB.pdf)

- Landesinstitut für Schule und Medien Berlin-Brandenburg (LISUM) (2015c): Rahmenlehrplan für die Jahrgangsstufen 7 - 10, Chemie. Teil C. Zugriff am 16.07.23 um 17.00 Uhr unter [https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche\\_Fassung/Teil\\_C\\_Biologie\\_2015\\_11\\_10\\_WEB.pdf](https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche_Fassung/Teil_C_Biologie_2015_11_10_WEB.pdf)
- Landesinstitut für Schule und Medien Berlin-Brandenburg (LISUM) (2015c): Rahmenlehrplan für die Jahrgangsstufen 7 - 10, Geografie. Teil C. Zugriff am 16.07.23 um 17.35 Uhr unter [https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche\\_Fassung/Teil\\_C\\_Geografie\\_2015\\_11\\_10\\_WEB.pdf](https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche_Fassung/Teil_C_Geografie_2015_11_10_WEB.pdf)
- Marohn, A., & Messig, D. (2021). „Was man nicht sieht, das gibt s auch nicht “. Gemeinsame „Wurzeln“ von Lernhürden im Biologie- und Chemieunterricht. *MNU-Journal*, 1, 15-19.
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse*. 12. überarbeitete Auflage. Weinheim, Basel: Beltz.
- Niebert, K. (2010). *Den Klimawandel verstehen: Eine didaktische Rekonstruktion der globalen Erwärmung*. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
- Nikendei, C., Bugaj, T. J., Nikendei, F., Kühl, S. J., & Kühl, M. (2020). Klimawandel: Ursachen, Folgen, Lösungsansätze und Implikationen für das Gesundheitswesen. *Zeitschrift für Evidenz, Fortbildung und Qualität im Gesundheitswesen*, 156, 59-67.
- Norddeutscher Rundfunk (NDR) (2023). *Klimawandel: So schnell schmilzt das Meereis der Arktis*. Zugriff am 17.08.23 um 18.37 Uhr unter <https://www.ndr.de/nachrichten/info/Klimawandel-So-schnell-schmilzt-das-Meereis-der-Arktis,meereis100.html>
- Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) (1999). *Measuring student knowledge and skills: A new framework for assessment*. OECD Publishing.
- Paul, M. (2022). *Der Kampf um den Nordpol: Die Arktis, der Klimawandel und die Rivalität der Großmächte*. Freiburg im Breisgau: Verlag Herder GmbH.
- Petermann, K., Friedrich, J., & Oetken, M. (2008). Das an Schülervorstellungen orientierte Unterrichtsverfahren: Inhaltliche Auseinandersetzung mit Schülervorstellungen im naturwissenschaftlichen Unterricht. *CHEMKON: Forum für Unterricht und Didaktik* 15(3), 110-118. Weinheim: WILEY-VCH Verlag.
- Posner G. J., Strike K. A., Hewson P. W., Gertzog W.A. (1982) Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211–227.
- Rädiker, S., & Kuckartz, U. (2019). *Analyse qualitativer Daten mit MAXQDA: Text, Audio und Video*. Wiesbaden: Springer.
- Reinfried, S., & Tempelmann, S. (2014). Wie Vorwissen das Lernen beeinflusst – Eine Lernprozessstudie zur Wissenskonstruktion des Treibhauseffekt-Konzepts. *Zeitschrift für Geographiedidaktik*, 1/14, 31-51.
- Reinfried, S., Rottermann, B., Aeschbacher, U., & Huber, E. (2010). Alltagsvorstellungen über den Treibhauseffekt und die globale Erwärmung verändern – eine Voraussetzung für Bildung für nachhaltige Entwicklung. *Swiss Journal of Educational Research*, 32(2), 233-274.
- Riedel, E, & Janiak, C. (2007). *Anorganische Chemie*. 7. Auflage. Berlin, Boston: De Gruyter.



- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. et al (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-475.
- Rühl (2021). *Umweltchemie I & II*. Vorlesung im Wintersemester 2021/2022. Freie Universität Berlin.
- Schmidkunz, H., & Lindemann, H. (1992). *Das forschend-entwickelnde Unterrichtsverfahren. Problemlösen im naturwissenschaftlichen Unterricht*. Magdeburg: Westarp Wissenschaften.
- Schönwiese, C. D. (2020). *Klimatologie. Grundlagen, Entwicklungen und Perspektiven*. 5., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer KG.
- Schuler, S. (2011). *Alltagstheorien zu den Ursachen und Folgen des globalen Klimawandels*. Bochum: Europäischer Universitätsverlag / Bochumer Universitätsverlag.
- Schwedt, G. (2015). *Dynamische Chemie - Schnelle Analysen mit Teststäbchen*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Straub, K., & Thesing, A. (2023). Welche Bedeutung haben Präkonzepte für erfolgreiches Lernen im Biologieunterricht und wie kann der Biologieunterricht zu einer Änderung von kognitiven Konzepten beitragen, d. h. zum „biologischen Denken“ hinführen?. In Graf, E. (Hrsg.) *Biologiedidaktik für Studium und Beruf: (5. bis 10. Klasse)*, Ederheim, Hürheim: Auer Verlag.
- Strike, K. A., Posner, G. J. (1992). A revisionist theory of conceptual change. In Duschl, R., & Hamilton, R. (Eds.), *Philosophy of science, cognitive psychology and educational theory and practise* 147–176. New York: Univ Press, New York.
- Taddicken, M., & Neverla, I. (2011). Klimawandel aus Sicht der Mediennutzer. Multifaktorielles Wirkungsmodell der Medienerfahrung zur komplexen Wissensdomäne Klimawandel. *M&K Medien & Kommunikationswissenschaft*, 59(4), 505-525.
- Umweltbundesamt, (2022). Zugriff am 09.07.2023 um 15.30 Uhr unter [https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase#:~:text=Das%20Kyoto%2DProtokoll%20nennt%20folgende,und%20Schwefelhexafluorid%20\(SF6\)](https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase#:~:text=Das%20Kyoto%2DProtokoll%20nennt%20folgende,und%20Schwefelhexafluorid%20(SF6))
- Weingart, P., Engels, A., & Pansegrau, P. (2007). *Von der Hypothese zur Katastrophe: Der anthropogene Klimawandel im Diskurs zwischen Wissenschaft, Politik und Massenmedien*. Leverkusen, Opladen: Barbara Budrich.
- Wiedlich, W. (1991) *Kiwis aus Sybirien? Treibhauseffekt, Ozonloch und Umweltpolitik*. Basel: Springer.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2000). Die Biosphäre im Globalen Wandel. *Erhaltung und nachhaltige Nutzung der Biosphäre: Jahresgutachten 1999*, 245-252.
- Witzel, A. (1985). Das problemzentrierte Interview. In Jüttermann, G. (Hrsg.), *Qualitative Forschung in der Psychologie* (S. 227-255). Weinheim: Beltz.
- World Wide Fund For Nature (WWF), (2020). *Arktische Eisschmelze bedroht Menschen weltweit*. Zugriff am 06.07.23 um 18.37 Uhr unter <https://www.wwf.de/themen-projekte/projektregionen/arktis/arktische-eisschmelze-bedroht-menschen-weltweit>

## 9 Anhang

Kontakt: [linneaschramm@web.de](mailto:linneaschramm@web.de)

