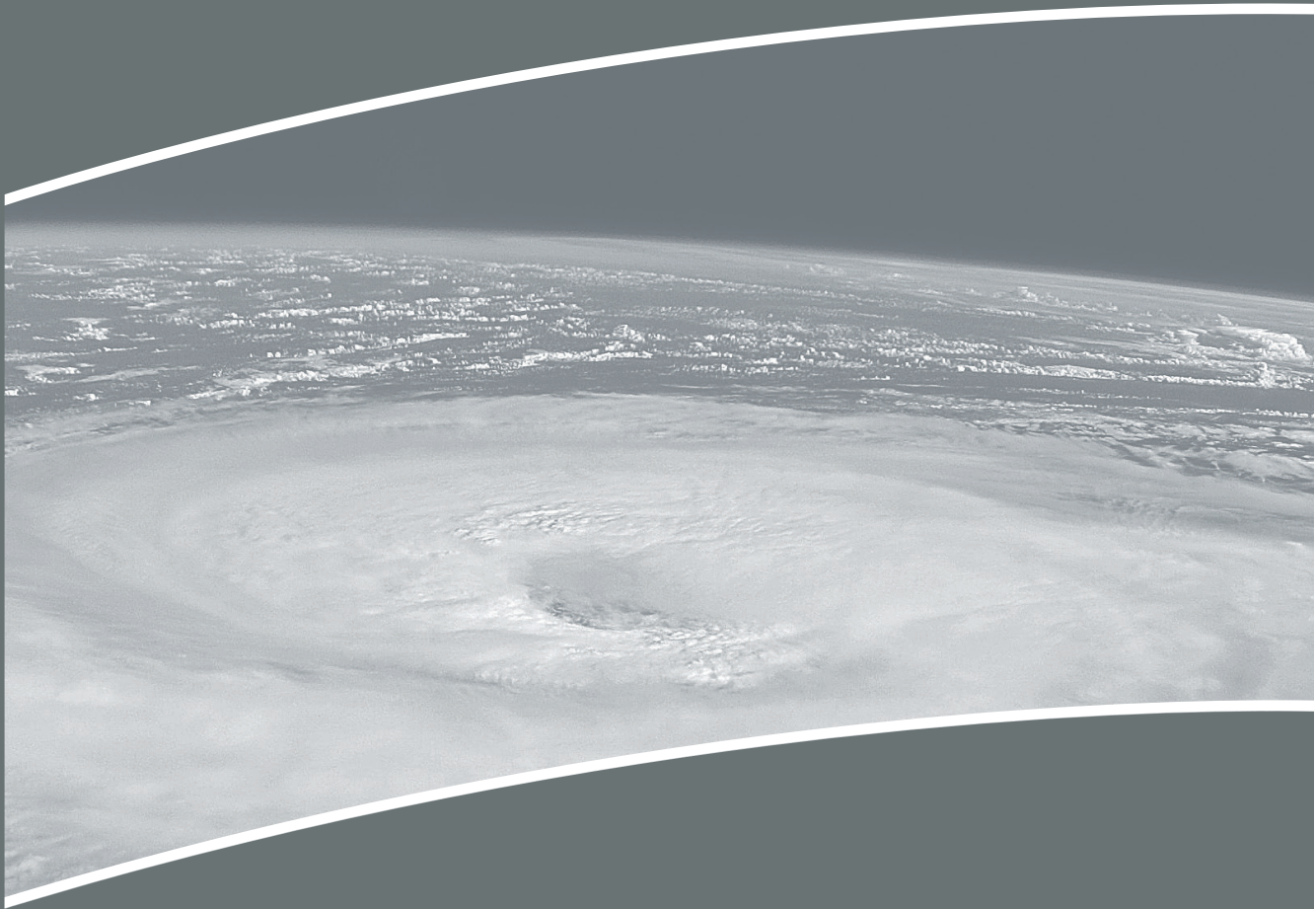


31

Beiträge zur
Didaktischen
Rekonstruktion



Kai Niebert

Den Klimawandel verstehen

**Eine didaktische Rekonstruktion der
globalen Erwärmung**

Beiträge zur Didaktischen Rekonstruktion, Band 31
Niebert: Den Klimawandel verstehen

Beiträge zur Didaktischen Rekonstruktion

Schriftenreihe zur fachdidaktischen
Lehr-Lern-Forschung
herausgegeben von Michael Komorek und
Barbara Moschner

Didaktisches Zentrum
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
ISSN 1617-3139
Band 31, 2010

Auf Basis des Modells der Didaktischen Rekonstruktion werden empirische Forschungsarbeiten durchgeführt, in denen Perspektiven von Lernenden bzw. Lehrpersonen und fachliche Konzepte eng miteinander verknüpft untersucht werden. In der Schriftenreihe werden Arbeiten zur Didaktischen Rekonstruktion und verwandte Arbeiten veröffentlicht. Die Beiträge werden extern begutachtet. Zur Publikation vorgesehene Arbeiten sind bei den Herausgebern einzureichen über:

Didaktisches Zentrum
Carl von Ossietzky Universität
D-26111 Oldenburg

Wissenschaftlicher Beirat

Gerhard Bach / Bremen
Lisa D. Bendixen / Las Vegas
Karl Böhmer / Santiago
Reinders Duit / Kiel
Harald Gropengießer / Hannover
Hilke Günther-Arndt / Oldenburg
Ute Harms / Kiel
Gustav Helldén / Kristianstad
Corinna Hoeßle / Oldenburg
Astrid Kaiser / Oldenburg
Ulrich Kattmann / Oldenburg
Andreas Krapp / München
Peter Labudde / Basel
Dirk Lange / Hannover
Hilbert Meyer / Oldenburg
Carmen Mörsch / Zürich
Michael Neubrand / Oldenburg
Ilka Parchmann / Kiel
Susanne Prediger / Dortmund
Bernd Ralle / Dortmund
Dietmar von Reeken / Oldenburg
Sibylle Reinfried / Luzern
Kristina Reiss / München
Falk Rieß / Oldenburg
Thomas Zabka / Hamburg

Kai Niebert

Den Klimawandel verstehen

Eine didaktische Rekonstruktion der
globalen Erwärmung

Didaktisches Zentrum
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Niebert, Kai:
**Den Klimawandel verstehen. Eine didaktische
Rekonstruktion der globalen Erwärmung.**

1. Auflage
Oldenburg: Didaktisches Zentrum, 2010
ISBN 978-3-8142-2216-5
ISSN 1617-3139
(Beiträge zur Didaktischen Rekonstruktion, Bd. 31)

© Didaktisches Zentrum
der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Ammerländer Heerstraße 114-118
D-26129 Oldenburg
Tel.: +49-(0)441-798-3033
Fax: +49-(0)441-798-4900
E-Mail: diz@uni-oldenburg.de

Alle Rechte vorbehalten.

Den Klimawandel verstehen

Eine evidenzbasierte und theoriegeleitete Entwicklung von
Lernangeboten zur Vermittlung der globalen Erwärmung

Von der **Naturwissenschaftlichen Fakultät**
der **Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover**

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften

Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation
von

Kai Niebert

geboren am 15. September 1979 in Hannover.

2010

Referent: Prof. Dr. rer. nat. Harald Gropengießer
Koreferentin: Prof. Dr. phil. Tanja Riemeier
Tag der Promotion: 01. Juli 2010

Inhaltsverzeichnis

Vorwort von Harald Gropengießer und Ulrich Kattmann	4
Zusammenfassung und Abstract.....	6
1 Einleitung.....	8
2 Theoretischer Rahmen.....	10
2.1 Konstruktivistische Grundlagen des Lernens.....	10
2.2 Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens.....	15
2.2.1 Direktes und imaginatives Verstehen	16
2.2.2 Metaphern, Schemata und metaphorische Konzepte	17
2.2.3 Highlighting and hiding	18
2.2.4 Prominente Schemata zum Verstehen des Klimawandels	18
2.3 Lernen als Conceptual Reconstruction.....	23
2.4 Zusammenfassung	27
3 Stand der Forschung.....	28
3.1 Vorstellungen zum Klimawandel.....	28
3.1.1 Erwärmung durch Treibhauseffekt	29
3.1.2 Erwärmung durch Ozonloch	30
3.1.3 Erwärmung durch Verschmutzung.....	31
3.1.4 Erwärmung durch sonstige Ursachen	32
3.1.5 Herkunft des Kohlenstoffdioxids	32
3.1.6 Zusammenfassung.....	33
3.2 Vorstellungsentwicklungen zum Klimawandel.....	34
3.3 Zusammenfassung	35
4 Fragestellung der Untersuchung.....	37
5 Didaktische Rekonstruktion.....	38
6 Wissenschaftlervorstellungen zum Klimawandel	42
6.1 Fragestellung des Kapitels.....	42
6.2 Methodisches Vorgehen.....	42
6.2.1 Qualitative Inhaltsanalyse der Wissenschaftlervorstellungen	43
6.2.2 Metaphernanalyse der Wissenschaftlervorstellungen	43
6.2.3 Darstellung der Wissenschaftlervorstellungen	44
6.3 Wissenschaftlervorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf	44
6.3.1 Kohlenstoffkreislauf im Speicher-Fluss-Schema	45
6.3.2 Vorstellungen zu den Kohlenstoffspeichern	48
6.3.3 Vorstellungen zu den Kohlenstoffflüssen und ihren Ursachen	49
6.3.4 Denkfigur: Vorindustrielles Gleichgewicht.....	52
6.3.5 Denkfigur: Anthropogenes Ungleichgewicht.....	54
6.3.6 Denkfigur: Erdgeschichtliches Ungleichgewicht.....	56
6.3.7 Denkfigur: Reagierender Kohlenstoffkreislauf	58
6.3.8 Vorstellungen zum Inhalt der Speicher	60

6.3.9	Denkfigur: Unterschiedliches CO ₂	62
6.3.10	Fachlich geklärte Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf	63
6.4	Wissenschaftlervorstellungen zum Treibhauseffekt	65
6.4.1	Quellen der Vorstellungen: Die Atmosphäre als Behälter	66
6.4.2	Denkfigur: Strahlungsgleichgewicht	67
6.4.3	Denkfigur: Verschiebung des Strahlungsgleichgewichts	68
6.4.4	Denkfigur: Erwärmung Durch Treibhauseffekt	70
6.4.5	Fachlich geklärte Vorstellungen zum Treibhauseffekt	77
7	Lernervorstellungen zum Klimawandel	79
7.1	Fragestellung des Kapitels	79
7.2	Methodisches Vorgehen	79
7.2.1	Wahl und Angemessenheit der Methoden	79
7.2.2	Maßnahmen zur Qualitätssicherung	80
7.2.3	Vorgehensweise bei der Erhebung der Lernervorstellungen	81
7.2.4	Vorgehen bei der Interpretation der Lernervorstellungen	81
7.2.5	Vorgehensweise bei der Aufbereitung des Datenmaterials	82
7.2.6	Auswertung der Daten	84
7.3	Lernervorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf im Klimawandel	86
7.3.1	Denkfigur: Künstliches Kohlenstoffdioxid	87
7.3.2	Denkfigur: Natürliches und künstliches Kohlenstoffdioxid	90
7.3.3	Denkfigur: Pflanzennahes und -fernes Kohlenstoffdioxid	92
7.3.4	Denkfigur: Anthropogenes Ungleichgewicht	94
7.3.5	Quellen der Vorstellungen	98
7.3.6	Vergleich der Lernervorstellungen zur CO ₂ -Freisetzung	101
7.4	Lernervorstellungen zum Treibhauseffekt	103
7.4.1	Denkfigur: Erwärmung Durch Ozonloch	103
7.4.2	Denkfigur: Erwärmung Durch Treibhauseffekt	108
7.4.3	Quellbereiche der Vorstellungen	112
7.4.4	Vergleich der Vorstellungen	116
8	Didaktische Strukturierung	119
8.1	Fragestellungen des Kapitels	119
8.2	Methodisches Vorgehen	119
8.3	Vergleich der Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf	120
8.4	Leitlinien zur Vermittlung des Kohlenstoffkreislaufs	124
8.4.1	Kohlenstoff als natürlichen Bestandteil der Atmosphäre begreifen	125
8.4.2	Den Kohlenstoffkreislauf als Speicher-Fluss-Schema erkennen	125
8.4.3	Reflexion des Natürlich-Künstlich-Schemas im Speicher-Fluss-Modell	126
8.4.4	Den Klimawandel auf veränderte Kohlenstoffflüsse zurückführen	127
8.5	Vergleich der Vorstellungen zum Treibhauseffekt	127
8.6	Leitlinien zur Vermittlung des Treibhauseffekts	131
8.6.1	CO ₂ als Ursache der globalen Erwärmung begreifen	131
8.6.2	Ozonloch und Treibhauseffekt unterscheiden	132
8.6.3	CO ₂ speichert Wärme	132
8.6.4	Aus Sonnenstrahlung wird Wärmestrahlung	133
8.6.5	CO ₂ ist durchlässig für Licht- und undurchlässig für Wärmestrahlung	134
8.6.6	Die Atmosphäre als Kontinuum begreifen	134
8.6.7	Den Strahlungshaushalt als Gleichgewicht begreifen	134

9	Evaluation der Lernangebote und Beschreibung individueller Denkpfade	136
9.1	Fragestellung	136
9.2	Methodisches Vorgehen	136
9.2.1	Das Vermittlungsexperiment als Forschungsmethode	136
9.2.2	Durchführung der Vermittlungsexperimente	137
9.2.3	Phasen des Vermittlungsexperiments	138
9.2.4	Auswertung der Vermittlungsexperimente	139
9.3	Lernangebote zum Kohlenstoffkreislauf	139
9.3.1	Der Kohlenstoffkreislauf im Speicher-Fluss-Modell	140
9.3.2	Das Natürlich-Künstlich-Schema im Speicher-Fluss-Modell	146
9.3.3	Lernangebot: Abholzung im Speicher-Fluss-Schema	151
9.4	Lernangebote und Denkpfade zum Treibhauseffekt	155
9.4.1	Lernangebot: Globale Erwärmung und Ozonloch	155
9.4.2	Lernangebot: Treibhausexperiment CO ₂ vs. Luft	158
9.4.3	Lernangebot: Treibhausexperiment mit Folie vs. Pappe	162
9.4.4	Lernangebot: (Un)Durchlässiges CO ₂	165
9.4.5	Lernangebot: Fließgleichgewicht	170
9.5	Denkpfade zum Treibhauseffekt	172
9.5.1	Egons Denkpfad zum Treibhauseffekt	173
9.5.2	Ninas Denkpfad zum Treibhauseffekt	173
9.5.3	Raphaels Denkpfad zum Treibhauseffekt	174
10	Zusammenfassung und Diskussion	175
10.1	Zusammenfassung zentraler Ergebnisse	175
10.1.1	Vorstellungen und Vorstellungsentwicklungen zum Kohlenstoffkreislauf	175
10.1.2	Vorstellungen und Vorstellungsentwicklungen zum Treibhauseffekt	177
10.2	Reflexion des theoretischen Rahmens	179
10.2.1	Der Konstruktivismus als Ausgangspunkt dieser Studie	180
10.2.2	Nutzung der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens	180
10.2.3	Umsetzung des Conceptual Change Ansatzes in der Studie	181
10.3	Reflexion des methodischen Vorgehens	181
10.3.1	Dokumentation des methodischen Vorgehens	182
10.3.2	Das Vermittlungsexperiment in der Didaktischen Rekonstruktion	182
10.3.3	Umsetzung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung	183
10.4	Relevanz der Studie für die Lehr-Lernforschung	184
10.4.1	Lernen als Reflexion der eigenen Vorstellung	184
10.4.2	Das Vermittlungsexperiment in der Lehr-Lernforschung	185
10.4.3	Einordnung der Ergebnisse in die Conceptual Change Forschung	185
10.5	Relevanz der Studie für den Unterricht	187
10.6	Erreichte Ziele	189
11	Literatur	190

Die Arbeit an Vorstellungen führt zum Verständnis des Klimawandels

Vorwort von Harald Gropengießer und Ulrich Kattmann

Erscheinungen wie der Kohlenstoffkreislauf oder der Treibhauseffekt sind schwierig zu verstehen. Die Vorstellungen zum Klimawandel sind bislang sowohl vor wie nach dem Unterricht weit von einem fachlich angemessenen Verständnis entfernt. Dies ist aus mehr als 20 bisher publizierten Untersuchungen zum Thema aus mehreren Ländern bekannt. Aus fachdidaktischer Sicht stellen sich hier zwei Fragen: Warum ist der Klimawandel so schwierig zu verstehen? Und auf welche Weise kann der Klimawandel besser verstanden werden?

Kai Niebert beantwortet diese Fragen, indem er – geleitet vom Modell der Didaktischen Rekonstruktion – zunächst die Vorstellungen der Wissenschaftler anhand verlässlicher Quellen analysiert. Dies geschieht mithilfe der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens. Dabei werden die von den Klimatologen und Ökologen genutzten Verstehenswerkzeuge deutlich: Es sind Schemata wie die vom „Kreislauf“, vom „Gleichgewicht“ sowie von „Speichern und Flüssen“. Diese erfahrungsbasierten aus unmittelbarer Erfahrung und Anschauung stammenden Schemata werden an die unanschaulichen Erscheinungen des Kohlenstoffkreislaufs und des Treibhauseffekts herangetragen und prägen so das wissenschaftliche Verständnis.

Mit der Analyse der Wissenschaftler-Vorstellungen lässt es Kai Niebert nicht bewenden. Er überführt diese Vorstellungen gemäß dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion im Prozess der Fachlichen Klärung in lernförderliche Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf und zum Treibhauseffekt. Die Formulierung der fachlich geklärten Vorstellungen stützt sich dabei sowohl auf die Vorstellungen der Wissenschaftler wie auch auf die antizipierten Denkmöglichkeiten der Lerner.

Die Vorstellungen der Lerner zum Klimawandel sind deutlich vielfältiger als die der Wissenschaftler. Es bestätigt sich auch eine allgemein große Differenz zu den wissenschaftlichen Vorstellungen. Aber die theoriegeleitete Analyse enthüllt darüber hinaus Erstaunliches: Lerner und Wissenschaftler nutzen dieselben Verstehenswerkzeuge. Auch Lerner denken mit dem Schema des Speichers, des Flusses oder mit dem des Gleichgewichts. Aber die Oberstufenschüler verwenden diese Schemata anders als die Wissenschaftler. Andersherum kann man sagen: Die Wissenschaftler nutzen dieselben Schemata wie die Lerner, aber sie verwenden sie in elaborierter Weise.

Das Problem für das Erreichen eines angemessenen Verständnisses besteht darin, dass schon ein Kombinat von nur zwei Schemata, wie es beispielsweise beim Speicher-Fluss-Schema vorliegt, überraschende Eigenschaften aufweist. So kann ein kleiner Speicherinhalt durchaus mit einem zahlenmäßig viel größeren Zufluss einhergehen, wenn nur der Abfluss entsprechend ist. Hier setzen Lernangebote an, die sich als besonders erfolgreich erwiesen haben, ein reflektiertes Verständnis vom Klimawandel zu erreichen. Beispielsweise bekommen die Lerner mehrere Plastikbehälter, die mit »Atmosphäre«, »Ozeane«, »Lebewesen« usw. beschriftet sind und Styroporkugeln enthalten. Das gedankliche Speicher-Fluss-Schema steht damit materiell zur Verfügung. Daran können die Prozesse des Kohlenstoffkreislaufs durchgespielt und die Konsequenzen bedacht werden. Auf diese Weise werden die sonst wie selbstverständlich verwendeten Schemata bewusst gemacht. Den Schemata kann nun die gebührende Aufmerksamkeit geschenkt werden und ihre angemessene bereichsspezifische Verwendung ausgearbeitet werden. Es ist, als würde

mit den Denkwerkzeugen so lange *hantiert*, bis mit ihnen ein adäquates *Begreifen* der Phänomene möglich wird.

Es handelt es sich um eine methodisch kontrollierte Modellierung des Kohlenstoffkreislaufs. Dabei setzt die Modellierung genau am jeweiligen Vorverständnis der Lerner an und bietet zudem die Möglichkeit, das fachliche Verständnis weiter zu entwickeln. Die Modellierung wird hier also nicht allein vom fachlichen Verständnis her betrieben, vielmehr handelt es sich um eine vom Lernen ausgehende und daher dem Lernen unmittelbar förderliche Modellierung.

Kai Niebert hat mit Hilfe des Modells der Didaktischen Rekonstruktion theoriegeleitet empirisch fundierte Lernangebote für das schwierige Thema des Klimawandels entwickelt. Er zeigt, wie durch die Arbeit mit und an den Vorstellungen ein angemessenes Verständnis des Klimawandels erreicht werden kann.

Harald Gropengießer und Ulrich Kattmann

Zusammenfassung

Der vom Menschen verursachte Klimawandel wird seitens des Weltklimarats als eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts bezeichnet (IPCC 2007). Um wirkungsvolle Strategien zur Verminderung der Auswirkungen menschlichen Handelns auf das Klima zu entwickeln, ist ein Verstehen der zugrunde liegenden Prozesse und ihrer Chancen und Risiken auch auf individueller Ebene unabdingbar (Bord et al. 2000). Ziel dieser Studie ist deshalb die evidenzbasierte und theoriegeleitete Entwicklung von Lernangeboten zur Vermittlung von zentralen Aspekten des Klimawandels: dem Kohlenstoffkreislauf und dem Treibhauseffekt. Dabei werden auf Grundlage des Modells der Didaktischen Rekonstruktion die Alltagsvorstellungen von Lernern als Ausgangspunkt der Vermittlung gesehen (Kattmann et al. 1997).

Der theoretische Rahmen dieser Untersuchung wird aufgespannt durch drei Theorien: Der Konstruktivismus betrachtet Lernen als individuelle Konstruktion von Vorstellungen (Glaserfeld 2008; Roth 2009). Die Conceptual Change Forschung beschreibt Faktoren für das erfolgreiche Lernen naturwissenschaftlicher Inhalte (Treagust & Duit 2008). Die Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens (Lakoff & Johnson 1999) beschreibt die Rolle von Erfahrungen und Metaphern beim Lernen. Geleitet durch diese Theorien sucht die vorliegende Arbeit folgende Fragen zu beantworten: (1) Über welche Vorstellungen verfügen Lerner und Wissenschaftler zu zentralen Aspekten des Klimawandels? (2) Welche Vorstellungsentwicklungen zeigen Lerner, wenn sie mit didaktisch rekonstruierten Lernangeboten zum Klimawandel konfrontiert werden? (3) Welche der entwickelten Lernangebote fördern oder behindern ein Lernen zum Klimawandel?

Diese Arbeit orientiert sich am Modell der Didaktischen Rekonstruktion (Kattmann et al. 1997). Dabei werden die Vorstellungen von Wissenschaftlern und Lernern zur Entwicklung effektiver Lernangebote in Beziehung gesetzt. Die Vorstellungen von Wissenschaftlern werden anhand von Hochschullehrbüchern, Forschungsartikeln und dem Vierten Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC) erfasst. Für die Analyse der Lernervorstellungen werden 24 empirische Untersuchungen über Vorstellungen zum Klimawandel reanalysiert, eine eigene Interviewstudie (n=11, 18 Jahre; 6 m., 5 w.) und eine Interventionsstudie (n=24, 18 Jahre; 13 m., 11 w.) durchgeführt. Die Lernprozesse werden in zehn Vermittlungsexperimenten mit Kleingruppen von zwei bis drei Lernern analysiert. Die Interviewstudie wurde audiographiert, die Vermittlungsexperimente videographiert. Alle Daten wurden mithilfe der Qualitativen Inhaltsanalyse (Mayring 2003) und einer Metaphernanalyse (vgl. Schmitt 2005) ausgewertet.

Mithilfe der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens können vier Denkfiguren zur Rolle des CO₂ im Klimawandel identifiziert werden: *Künstliches CO₂*, *Natürliches und Künstliches CO₂*, *Pflanzenfernes und Pflanzennahes CO₂* und *Anthropogenes Ungleichgewicht im Kohlenstoffkreislauf*. Zu den Mechanismen der globalen Erwärmung können zwei Denkfiguren mit verschiedenen Varianten gefunden werden: *Erwärmung durch mehr Einstrahlung* und *Erwärmung durch weniger Abstrahlung*. Dabei zeigt sich, dass Lerner und Wissenschaftler ähnliche Schemata nutzen, diese aber unterschiedlich im Zielbereich Klimawandel konzeptualisieren.

Diese Studie leistet durch die Entwicklung einer auf den Erfahrungen der Lerner aufbauenden Vermittlungsstrategie einen Beitrag zur Conceptual-Change-Forschung. Dabei rekonstruieren die Lerner ihre Vorstellungen zu abstrakten Zielbereichen durch die Reflexion der ihren Vorstellungen zugrunde liegenden Schemata.

Abstract

Global warming presents a serious threat to our biosphere, with economical, ecological and social consequences (IPCC 2007). Translating public concern for global warming into effective every-day action requires knowledge about the causes and risks of climate change (Bord et al. 2000). The aim of this study is an evidence-based and theory-guided development of learning environments on key issues of global warming: the global carbon cycle and the greenhouse effect. Based on students' conceptions different learning environments were developed using the model of educational reconstruction (Duit et al. 2005).

The theoretical framework of this investigation relies on three different but interdependent theories: Constructivism (Glaserfeld 2008; Roth 2009) states learning as a construction of individual conceptions. A theory of conceptual change (Treagust & Duit 2008) describes factors to enable successful learning processes. Experientialism (Lakoff & Johnson 1999) describes understanding based on personal experience, metaphors, and analogies. Based on this framework, the study deals with three main research questions: (1) Which conceptions do students and scientists employ in explaining the causes of global warming? (2) Which learning pathways do students take in working with educationally reconstructed learning environments? (3) Which educationally reconstructed learning environments foster or hinder the learning of key aspects on global warming?

The research design is based on the model of educational reconstruction (Duit et al. 2005). Within this design, scientists' and students' conceptions are compared to develop effective teaching and learning activities. Scientists' conceptions are extracted from different scientific textbooks and the IPCC-Report (2007). Students' conceptions of global warming are collected in a reanalysis of empirical studies on every-day concepts of global warming, an own interview study (n=11, 18 years old; 6 male, 5 female) and during teaching experiments (n=24, 18 years old; 13 male, 11 female). In 10 teaching experiments learning processes on the global carbon cycle and the greenhouse effect were examined in small groups, each consisting of two or three students. All data were gathered with video, transcribed and investigated by qualitative content analysis (Mayring 2003) and metaphor analysis (Schmitt 2005).

Based on experientialism it was possible to find four thinking patterns of the role of CO₂ in global warming in students' conceptions: *man-made CO₂*, *man-made vs. natural CO₂*, *CO₂ near plants vs. CO₂ away from plants* and *anthropogenic imbalance in carbon cycle*. On the mechanism of global warming two thinking patterns with two variations were found: *warming by more input* and *warming by less output*. Experientialism gave insight in the experience based framework theories (i.e. *container schema*) used to explain abstract specific theories (i.e. *greenhouse effect*).

This study contributes to the research on conceptual change by developing a teaching-approach that gave students access to their conceptions by uncovering the applied schemata. By bringing students' mental models in material existence and providing them with new experiences, students reconstructed their domain specific use of the applied schemata to more science-oriented conceptions.

1 Einleitung

„CO₂ ist ein künstliches Gas. Es frisst ein Loch in die Ozonschicht.
Dadurch scheint mehr Sonne auf die Erde und es wird wärmer.“
(Dirk, 18 Jahre)

Der anthropogene Klimawandel bestimmt den Alltag der Menschen in Deutschland zunehmend: Hochwasser und Unwetter werden als Folge von Klimaveränderungen gedeutet, die Bundesregierung verabschiedet Klimaschutzpakete und die internationalen Klimakonferenzen werden zu medialen Großereignissen. Die deutsche Bundeskanzlerin bezeichnet den Klimawandel als größte Herausforderung des 21. Jahrhunderts (Merkel 2007), der Weltklimarat IPCC und der ehemalige Vizepräsident der USA Al Gore erhielten für ihr Engagement gegen den Klimawandel im Jahr 2007 den Friedensnobelpreis. Die Angst vor dem Klimawandel steigt weltweit: Gut zwei Drittel von 24.000 in einer repräsentativen Stichprobe Befragten bewerteten die Erderwärmung als sehr ernstes Problem. Das ist der höchste Stand seit Beginn der regelmäßigen Befragungen vor elf Jahren (GlobeScan 2009).

Die Sorgen über eine Veränderung des Klimas scheinen groß. Wie aber steht es um die Vorstellungen von den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels? Befunde empirischer Studien über Lernervorstellungen zum Klimawandel belegen, dass Laien¹ häufig andere Vorstellungen vom Klimawandel haben als Wissenschaftler. So auch Dirk: Für ihn ist der Klimawandel durch das als künstlich imaginierte Gas Kohlenstoffdioxid verursacht, das Löcher in die Ozonschicht frisst und es somit zu einer verstärkten Sonneneinstrahlung kommt.

Um wirkungsvolle Maßnahmen gegen den Klimawandel auf politischer wie auf individueller Ebene zu initiieren, ist jedoch Wissen über die Grundlagen der globalen Erwärmung ein wichtiger Baustein (UNCED 1992). Eine Forschergruppe um Bord (2000) konnte zeigen, dass allgemeine Vorstellungen von einem umweltfreundlichen Verhalten nicht ausreichen, sondern auf individueller Ebene fachlich angemessene Vorstellungen von zentralen Aspekten des Klimawandels notwendig sind, um ein klimafreundliches Handeln zu ermöglichen. Andrey et al. (2000) beschreiben darüber hinaus für die Initiierung nachhaltiger Handlungen im Rahmen des Klimawandels einen Dreischritt aus *Interesse wecken, die Grundlagen des Problems verstehen und zur Handlung motivieren*.

Die vorliegende Studie zielt dabei auf die mittlere Ebene: Die Vermittlung von Grundlagen zu zentralen Aspekten des Klimawandels. Ziel ist die theoriegeleitete und evidenzbasierte Entwicklung von Vermittlungsstrategien zum Klimawandel. Damit soll zum einen ein Beitrag für eine Bildung für nachhaltige Entwicklung (Haan & Gerhold 2008) und zum anderen für die Orientierung der Lerner in einer von globalen, gesellschaftlichen und naturwissenschaftlichen Herausforderungen geprägten Welt geleistet werden (OECD 2007).

Den Befunden des Konstruktivismus und der Neurobiologie folgend (**Kapitel 2**) werden für die Gestaltung von effektiven Lernangeboten nicht einfach fachwissenschaftliche Konzepte als normgebend übernommen, sondern ebenso die Vorstellungen und damit die Lernvoraussetzungen von Lernern berücksichtigt. Mit dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion (**Kapitel 5**) steht dabei für die Gestaltung von effektiven Lernangeboten ein erprobter Forschungsrahmen zur

¹ Aus Gründen der Lesbarkeit wird für alle allgemeingültigen Darstellungen auf die Verwendung der weiblichen Form verzichtet. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Verwendung der männlichen Form alle weiblichen Personen mit einschließt.

Verfügung, der die Vorstellungen von Lernern und Wissenschaftlern miteinander in Beziehung setzt.

In dieser Arbeit findet eine Fokussierung auf zwei zentrale Aspekte des Klimawandels statt: Mit rund 60 Prozent Anteil am anthropogenen Treibhauseffekt gilt Kohlenstoffdioxid (CO₂) als Hauptverursacher der globalen Erwärmung (IPCC 2007). Zum einen werden somit die Vorstellungen zum Treibhauseffekt und zum anderen zur Rolle des CO₂ im Rahmen des Kohlenstoffkreislaufs analysiert.

Dazu wurden zunächst in einer Reanalyse 24 Studien über Alltagsvorstellungen zum Klimawandel ausgewertet (**Kapitel 3**). In einer Interviewstudie wurden anschließend die Vorstellungen von 18-jährigen Lernern zu zentralen Aspekten des Klimawandels und in einer Literaturstudie die Vorstellungen von Wissenschaftlern anhand von ökologischen und klimatologischen Fachtexten erhoben. Die Vorstellungen der Wissenschaftler (**Kapitel 6**) und der Lerner (**Kapitel 7**) wurden mithilfe der Qualitativen Inhaltsanalyse und einer Metaphernanalyse ausgewertet. Somit war es möglich, eine methodisch kontrollierte Interpretation der Vorstellungen auf Grundlage der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens (vgl. **Kapitel 2**) vorzunehmen. Diese Theorie des Verstehens hilft dabei, die Ursprünge von Vorstellungen anhand der genutzten Metaphern und Analogien zu analysieren. Damit ist es dieser Untersuchung möglich, über den Stand bisheriger Studien über Alltagsvorstellungen zum Klimawandel hinaus zu gehen. Die Ergebnisse der Metaphernanalyse fließen dabei in die Explikation der Vorstellungen im Rahmen der Qualitativen Inhaltsanalyse der Wissenschaftler- und Lernervorstellungen ein (**Kapitel 6 und 7**).

In einem wechselseitigen Vergleich der Vorstellungen von Wissenschaftlern und Lernern in der Didaktischen Strukturierung (**Kapitel 8**) werden Leitlinien zur Vermittlung des Klimawandels vorgeschlagen und diese in konkreten Lernangeboten in Umsetzung gebracht. Dabei werden auch zentrale von Wissenschaftlern genutzte Metaphern und Analogien auf ihre verständnisfördernden und -verhindernden Aspekte hin untersucht. Die Lernangebote werden theoriegeleitet auf Grundlage des theoretischen Rahmens dieser Arbeit gestaltet. Leitend sind hierbei u. a. die Erkenntnisse der Conceptual-Change-Forschung (vgl. **Kapitel 2**).

Neben der theoriegeleiteten Entwicklung effizienter Lernangebote findet im Anschluss eine empirische Evaluation ihrer Wirksamkeit statt, um fundierte Aussagen über die entwickelten Lernangebote zu ermöglichen. Dabei soll nicht nur geklärt werden, ob die Angebote lernwirksam sind, sondern auch, warum sie es sind – oder auch nicht sind. Um explanative Aussagen über die Wirkung der Lernangebote treffen zu können, wird der gesamte Lernprozess prozessbasiert ausgewertet: In den Vermittlungsexperimenten werden die Lerner mit den didaktisch strukturierten Lernangeboten konfrontiert und ihre Vorstellungsentwicklung analysiert. So können schließlich individuelle Denkpfade nachgezeichnet werden, aus denen die Vorstellungsentwicklung der Lerner hervorgeht (**Kapitel 9**).

Abschließend werden das Vorgehen und die Ergebnisse dieser Arbeit kritisch reflektiert. Dabei wird auch eine Einordnung der Arbeit in den Stand der internationalen Lehr-Lernforschung vorgenommen (**Kapitel 10**).

2 Theoretischer Rahmen

Ziel dieser Untersuchung ist die Optimierung der Vermittlung verschiedener Aspekte des Klimawandels. Für eine Analyse von Vorstellungen und ihrer Veränderung in Lernprozessen bedarf es theoretischer Grundlagen, die helfen, das Verstehen zu erklären.

Der in dieser Untersuchung zur Formulierung der Forschungsfragen und zur Interpretation der Lerner- und Wissenschaftlervorstellungen herangezogene theoretische Rahmen wird von drei Konstrukten aufgespannt: Den aus dem Konstruktivismus abgeleiteten Grundlagen des Lernens, dem Conceptual Change bzw. der Conceptual Reconstruction sowie der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens. Damit wird ein Rahmen gewählt, der sich in fachdidaktischen Forschungsarbeiten (z. B. Gropengießer 2001; Riemeier 2005; Weitzel 2006; Zabel 2009) zur Optimierung des naturwissenschaftlichen Unterrichts auf der Grundlage von Lernervorstellungen bewährt hat.

2.1 Konstruktivistische Grundlagen des Lernens

Beim Konstruktivismus handelt es sich um eine Erkenntnistheorie, die die Frage nach der Entstehung von Wissen zu beantworten sucht. Ausgangspunkt des Konstruktivismus ist die Erkenntnis, dass jedes Individuum sich seine Wirklichkeit selbst erschafft und eine direkte Erfassung einer außen liegenden Wirklichkeit unmöglich ist (Glaserfeld 1987). Dabei stellt der Konstruktivismus – auch in seinen radikalen Formen – keinen Solipsismus dar: Es wird nicht die Existenz einer außen liegenden Realität verneint, sondern dem Menschen lediglich die Fähigkeit abgesprochen, diese Realität direkt zu erfassen. Der Konstruktivismus beschreibt die Welt nicht wie sie ist, sondern nur wie sie erkannt werden kann (vgl. Glaserfeld 2004): Die außen liegende Welt ist dem erkennenden Individuum nur über seine Wahrnehmung zugänglich. Wahrnehmung führt zu Erkenntnis und damit zu Vorstellungen über das zuvor Wahrgenommene. Diese Vorstellungen können nie richtig oder falsch in einem objektiven Sinne sein, da niemand seine Wahrnehmung objektiv mit der außen liegenden Realität vergleichen kann. Vorstellungen müssen sind jedoch „viabel“ (Glaserfeld 1989) oder „operativ tauglich“ (Foerster 1981) sein, sie dürfen also der Erfahrung nicht widersprechen. Vorstellungen können somit nicht falsch, sondern höchstens nicht ausreichend an (fachlichen) Erfahrungen verifiziert worden sein. Statt den Alltagserfahrungen entspringende Vorstellungen also normativ-wertend als Fehlvorstellung zu bezeichnen, wie es in der fachdidaktischen Forschung jahrelang geschehen ist, ist eine deskriptive und wertneutrale Beschreibung als alternative, vorwissenschaftliche, alltagsorientierte Vorstellung oder ganz neutral als Lernervorstellung angemessen (Duit 1999).

Elemente konstruktivistischer Grundpositionen haben sich in den letzten 15 Jahren in (fach)didaktischen Fragestellungen der Lehr-Lernforschung durchgesetzt (Dubs 1995; Duit 1995; Gerstenmeier & Mandl 1995; Riemeier 2007; Terhart 1999; Widodo & Duit 2004).

Lernen ist Selbstbezug

Den Ausgangspunkt für den Konstruktivismus bildet die Autopoiesis des Gehirns: Das Gehirn des Menschen ist ein selbstreferentielles, sich somit selbst fortwährend erschaffendes, in sich informationell geschlossenes System (Roth 1997). Roth (1986, S. 157) beschreibt damit das Gehirn als System, in dem jeder seiner Zustände aus der Interaktion früherer Zustände hervorgeht. Damit wird nicht ausgeschlossen, dass selbstreferentielle Systeme durch äußere Einwirkungen beeinflussbar oder modulierbar sind. Sie können aber nicht von außen gesteuert oder vorbe-

stimmt werden. Im Gehirn werden Bedeutungen von Sinnesreizen aus der Umwelt aktiv erzeugt. Die das Individuum umgebende Umwelt kann diese Konstruktionen des kognitiven Systems zwar auslösen und in Grenzen beeinflussen, jedoch nicht determinieren.

Lernen ist somit der Aufbau und die kontinuierliche Modifikation von Vorstellungen (Steiner 2001, S. 164). Es muss somit als eine aktive Konstruktion auf Basis vorhandener Vorstellungen betrachtet werden (Duit 1995, S. 905), wobei neue Erfahrungen in Abhängigkeit von vorhandenen Vorstellungen und bestehenden Überzeugungen interpretiert werden. Das heißt, Individuen begegnen einem neuen Bereich in der Regel nicht inhaltsleer, sondern sie bringen bestimmte Vorstellungen mit. Sie konstruieren somit aktiv Bedeutungen auf der Grundlage ihrer verfügbaren Vorstellungen.

Glaserfeld (2008) beschreibt einen permanenten Prozess des Vergleichs von Vorstellungen und Erfahrungen, der darauf abzielt, beide in Einklang zu bringen. Diesen permanenten Versuch, viable, also mit den Erfahrungen stimmige, Vorstellungen zu konstruieren bezeichnet er dabei als Lernen.

Vorstellungen können über zwei Wege erlangt werden: Über die direkte Erfahrung eines Phänomens mit den Sinnesorganen oder über indirekte Erfahrungen in Form von z. B. schriftlicher oder sprachlicher Kommunikation. Beim Reden wie auch beim Lesen werden jedoch keine Vorstellungen weitergegeben. Wörter sind keine Container für Vorstellungen. Sich in einer Kommunikationssituation zu verstehen bedeutet nicht, dass alle Kommunikationspartner die gleichen Vorstellungen haben, sondern dass die Vorstellungen der Partner miteinander kompatibel sind, also dass die aus der Äußerung des Gegenübers resultierende Erfahrung viabel mit den eigenen Vorstellungen ist. Es wird einem Kommunikationspartner nie überprüfbar sein, ob seine Vorstellung mit der des Gegenübers übereinstimmt. Jedoch können über Kommunikation miteinander auf beiden Seiten Erfahrungen generiert werden, die zu einer Viabilitätsprüfung führen. Die Vorstellungen der Kommunikationspartner können somit mit der Zeit kompatibel zu einander werden. Etwas „verstanden zu haben“, bedeutet, dass eine Erfahrung mit bestehenden Vorstellungen erklärbar ist. Lernen ist dabei das Bilden von Vorstellungen aus Erfahrungen. Das setzt voraus, dass es in der Erfahrung Regelmäßigkeiten gibt, die verallgemeinert werden können (Glaserfeld 2008).

Befunde der Neurobiologie

Lehren führt nicht automatisch zum Lernen. Es einfach „richtig“ zu sagen, ist kein Garant für erfolgreiches Lernen, denn: Vorstellungen können nicht einfach weitergegeben und vom Gegenüber aufgenommen werden. Eine Vermittlungssituation führt in erster Linie zu einer Reizung von Sinneszellen, wie z. B. der Sehzellen oder der Hörzellen. Befunden der Neurobiologie folgend, werden die der Außenwelt entstammenden Sinneseindrücke nicht direkt in das Gehirn transportiert. Vielmehr sorgen – adäquate – Reize für eine Erregung entsprechender Sinneszellen. Die Reize werden transduziert und schließlich inhaltsneutral als Aktionspotential über afferente Neuronen an das Gehirn weitergeleitet. Diese elektrischen Erregungen an sich sind bedeutungs- und inhaltsfrei. Dieses Phänomen wird von Roth (1997) als „Neutralität des neuronalen Codes“ bezeichnet. Bedeutungen werden allein dadurch erzeugt, dass das Gehirn neuronale Erregungen vergleicht und kombiniert (Roth 1997).

Im Sinne des konstruktivistischen Ansatzes werden Vorstellungen situativ vom Lerner aus seinen Erfahrungen erzeugt (Reinmann-Rothmeier & Mandl 2001). Mit jedem Wahrnehmungs- und Verarbeitungsvorgang entstehen in den jeweils beteiligten neuronalen Strukturen Ladungsprozesse. Gleiche Wahrnehmungen und Verarbeitungsprozesse führen dazu, dass auch gleiche Zellverbände erregt werden. Auf diese Weise findet eine Spezialisierung neuronaler Strukturen statt. Häufig auftretende und wahrgenommene Muster führen dabei zu ähnlichen neuronalen Aktivitätsmustern. Häufigere und ähnliche Erfahrungen werden darüber hinaus auch auf einer größeren Fläche repräsentiert als seltenere Inputs (Spitzer 2003). Dabei legt das Gehirn Vorstellungen nicht einfach an einer bestimmten Stelle ab, sondern repräsentiert diese über neuronale

Aktivitätsmuster in bestimmten Regionen. Über die Vernetzung von Erregungsmustern entstehen neuronale Netzwerke, die von einfachen bis zu hochkomplexen Wahrnehmungsmustern alles verarbeiten, was zur Bewältigung der Lebenswirklichkeit benötigt wird.

Neurobiologisch spiegeln sich Vorstellungskonstrukte somit in für sie spezifischen neuronalen Aktivitätsmustern wider. Diese Aktivitätsmuster korrelieren dabei eng mit den neuronalen Mustern der entsprechenden Handlung (M. I. Posner & Raichle 1996), d. h. die Vorstellung von einem Fußballspiel und das Spielen mit einem Fußball führt zu ähnlichen neuronalen Aktivitätsmustern. Vorstellungen sind somit Konstrukte, die an den menschlichen Cortex gebunden sind.

Neue Erfahrungen führen zu Änderungen in der neuronalen Struktur und damit einer neuen Vorstellung (Roth 2003). Roth (2004, S. 220) beschreibt die Verknüpfung mentaler Prozesse mit den ihnen entsprechenden neuronalen Veränderungen als „zwei Seiten desselben Gesamtprozesses“. Vorstellungen sind somit dem Individuum verfügbar. Sie können erinnert werden, indem das Gehirn in Abhängigkeit von bereits konstruierten Vorstellungen bestimmte Aktivitätsmuster aktiviert, die ähnliche mentale Erlebnisse bedingen. Der Prozess der Aktivierung eben dieser kognitiven Muster wird in dieser Arbeit als »Denken« bezeichnet. »Lernen« ist entsprechend die Veränderung eines neuronalen Aktivitätsmusters und damit die Veränderung des mentalen Erlebens, also der Vorstellungen (vgl. Riemeier 2005). Die Veränderung zeigt sich auf neuronaler Ebene darin, dass die Qualität und die Anzahl von Verknüpfungen zwischen den Neuronen modifiziert wird (Kandel et al. 2000). Das Lernen nimmt also die in einem neuronalen System vorhandenen Strukturen als Ausgangspunkt, modifiziert diese über neurobiologische Prozesse und generiert so neue neuronale Strukturen. Wenn ein Lerner über Vorstellungen zu einem Themenkomplex verfügt, heißt das nicht, dass sein Gehirn diese Vorstellungen im Sinne eines Speichers abgelegt hat. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass die Vorstellungen aufgrund entsprechender vorangegangener Erfahrungen situativ konstruiert werden.

Roth (2009) unterscheidet zwischen verschiedenen Wissensformen, die auf der mentalen Ebene und auch auf der neuronalen Ebene unterschiedlich repräsentiert sind. Die für diese Arbeit bedeutsamen Wissensformen sind das Faktenwissen als deklaratives Wissen im semantischen, also bedeutungstragenden Gedächtnis und das auswendig gelernte Wissen, das im prozeduralen Gedächtnis repräsentiert wird. Werden Themenbereiche nicht durchdrungen, sondern nur auswendig gelernt, wird ihr Sinn nicht erfasst. Es gibt Indizien, dass die unterschiedlichen Wissensformen im Gehirn an unterschiedlichen Stellen repräsentiert sind (Bear et al. 2001; Buchner 2006; Roth 2009; Tulving 1999).

Theoretisches, sinnfreies Wissen entsteht Roth (2009, S. 96) zufolge, wenn neues Wissen nicht auf bestehenden Wissensstrukturen aufgebaut wird. Lernen, ohne an bereits Gelerntes anzuknüpfen führt somit zu sinnfreiem Wissen. Diese Arbeit zielt jedoch auf der Problemlösung dienendes und damit sinnvolles Wissen. Es lässt sich somit die Schlussfolgerung ziehen: Um zu verhindern, dass sinnfreies Wissen entsteht, muss eine Wissensentwicklung aufbauend auf vorhandenen Vorstellungen angeregt werden.

Folgerungen für die Gestaltung von Lernumgebungen

Die Erwartung, dass ein bestimmtes Lernangebot einen bestimmten Lernprozess nach sich zieht, der zu einer bestimmten, fachlich adäquaten Vorstellung führt, ist neurobiologisch und erkenntnistheoretisch nicht haltbar. Beide Perspektiven machen klar: Lernen darf nicht als abhängige Variable des Lehrens betrachtet werden.

Vermittlungsprozesse sind den konstruktivistischen und neurobiologischen Grundlagen des Lernens folgend der Versuch der Anregung von komplexen kognitiven Systemen, die nach ihrer eigenen Logik operieren. Diese Systeme sind selbstreferentiell, weil jede ihrer Handlungen auf ihre Struktur zurückwirkt und diese bestätigen oder verändern kann. Lehren ist nicht die Vermittlung und Lernen ist nicht die Aneignung eines extern vorgegebenen Zielzustandes. Lehren ist vielmehr die Anregung des Subjekts, seine Konstruktionen von Wirklichkeit zu hinterfragen und gegebenenfalls weiterzuentwickeln. Das bedeutet auch, dass Vorstellungen nicht einfach vom

Lehrer durch neue Vorstellungen ersetzt werden können. Lernen muss immer von dem jeweils verfügbaren kognitiven System ausgehen (Gropengießer 2003b).

Der Konstruktivismus als Grundlage lerntheoretischer Erwägungen stellt keine Lerntheorie dar. Er bildet eine notwendige, aber keine hinreichende Grundlage für die Entwicklung von Lernangeboten. Zwar beschreiben z. B. Reinmann und Mandl (2006) verschiedene Prozessmerkmale zur Gestaltung von Lernumgebungen aus konstruktivistischer Perspektive. Dem zufolge sei Lernen ein aktiver, selbstgesteuerter, konstruktiver, situierter, sozialer und emotionaler Prozess. Die Prozessmerkmale konstruktiv, situiert, aktiv und selbstgesteuert lassen sich dabei aus dem Konstruktivismus ableiten, da beim Lernen eine aktive Konstruktion stattfindet, die durch das Individuum bzw. dessen neuronale Strukturen gesteuert wird und immer in bestimmten Situationen stattfindet. Die Prozessmerkmale „sozial“ und „emotional“ lassen sich jedoch nicht aus dem erkenntnistheoretischen Konstruktivismus ableiten oder widersprechen ihm sogar zum Teil: Zwar findet Lernen in der Schule immer in sozialen Situationen durch den Austausch unter Lernern oder zwischen Lehrer und Lerner statt. Jedoch ist die Konstruktion neuen Wissens in letzter Konsequenz immer individuell. Dass Lernen und Emotionen miteinander in Beziehung stehen, soll ebenfalls nicht bezweifelt werden, kann aber aus dem Konstruktivismus heraus nicht hergeleitet werden.

Konkrete Hinweise für die Gestaltung von Lernumgebungen lassen sich somit weder aus den Befunden des Konstruktivismus noch der Neurobiologie ableiten (vgl. das Streitgespräch zwischen Stern und Spitzer In Kerstan & Thadden 2004). Die aus der Hirnforschung abgeleiteten Aussagen sind so allgemein, „dass sie bei der Umsetzung in die schulische Praxis der Willkür Tür und Tor öffnen“ (Stern 2003).

Was sich hingegen aus dem erkenntnistheoretischen Konstruktivismus (vgl. Glasersfeld 2008) und der Neurobiologie (vgl. Roth 2009) ableiten lässt ist Folgendes:

Auswendig gelerntes Wissen und der Problemlösung dienende Vorstellungen sind unterschiedliches Wissen. Wenn beim Lernen Wissen erworben werden soll, das der Problemlösung dient, muss anders gelernt werden als beim reinen Auswendiglernen. Statt einfach die fachlich angemessene Vorstellung vorzugeben, sollte der Lehrende den Lernern die Begrenztheit ihrer bisherigen Vorstellungen erfahrbar machen. Die Lerner sollen so in die Lage versetzt werden, eine Vorstellung zu entwickeln, die in bestimmten, fachlichen Kontexten viabel ist (vgl. Glasersfeld 1995). Die in Lernangeboten vermittelten Erfahrungen sollten an bisherige Vorstellungskonstrukte anknüpfen, damit die neuen, aus den neuen Erfahrungen resultierenden Vorstellungen an das verfügbare Vorstellungskonstrukt anknüpfen können. Dafür müssen die Vorstellungen bekannt sein, mit der ein Lerner eine Lernsituation betritt. Aufbauend auf den Vorstellungen können schließlich Theorien zum Lernen bestimmter Aspekte und Phänomene erarbeitet werden. Notwendig für die Gestaltung von Lernumgebungen ist somit eine bereichsspezifische Theorie des Lernens zu einem bestimmten Themenfeld, z. B. zum Klimawandel.

Vom Denken und Sprechen

Die Vorstellungen anderer Menschen, z. B. von Lernern und Wissenschaftlern sind durch ihre Äußerungen in Form von geschriebenen und gesprochenen Worten oder auch Zeichnungen zugänglich. Über sprachliche Äußerungen wird versucht, auf die Vorstellungen einer Person zu einem Phänomen zu schließen. Fern von bildgebenden Verfahren ist dieser Weg die einzige Möglichkeit, die Vorstellungen anderer zu erfassen. Das Problem: Wenn wir sprechen, verwenden wir Worte, um Gegenstände unserer Umgebung zu bezeichnen. Worte und Gegenstände sind nicht identisch. Worte sind nur Bezeichnungen für die jeweiligen Gegenstände. Analog zu Richards und Ogden (1923) sowie Gropengießer (2003a) lassen sich die drei Bereiche »Gedanken«, »Sprache« und »Referenten« voneinander unterscheiden:

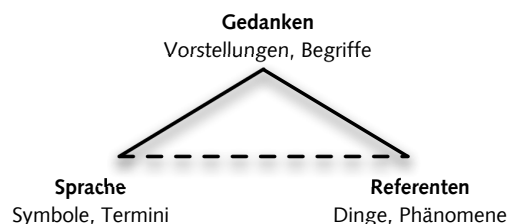


Abbildung 2.1: Semiotisches Dreieck, modifiziert nach Gropengießer (2003a)
Zwischen Sprache und Referenten besteht keine direkte Verbindung. Referenten können nur auf Grundlage von Gedanken erschlossen und mit entsprechenden Termini bezeichnet werden.

In dieser Arbeit werden Symbole und Termini in Form von gesprochener oder geschriebener Sprache analysiert. Zwischen der Sprache auf der einen und den Referenzobjekten auf der anderen Seite gibt es keine direkte Verbindung: Weder ergibt sich ein Referent direkt aus der Sprache, noch erwächst die Sprache unmittelbar aus einem Referenten. Die Basisseite des so genannten „semiotischen Dreiecks“ (Richards & Ogden 1923) ist daher gestrichelt. Elemente der gedanklichen Ebene, wie z. B. Vorstellungen, beziehen sich immer auf einen Referenten, also auf einen Gegenstand, ein Objekt, eine Sache oder ein Ereignis (Gropengießer 2003a). Der Versuch des Vermittelns von Vorstellungen findet statt, indem sie auf der sprachlichen Ebene über Zeichen wie Sprache oder Bilder ausgedrückt werden. Eine Verbindung zwischen Referenten und Sprache wird erst durch kognitive Tätigkeiten in Form von Gedanken hergestellt.

Den gemachten Ausführungen zum Konstruktivismus folgend, können wir Referenten nur über unsere Sinneskanäle erfassen und aufgrund unserer Vorstellungen in Worten beschreiben. Diese Worte sind sozial geteilte Konstrukte, die wir anderen über die Sprache zugänglich machen. Eben dort werden sie in einem rekonstruktiven Prozess über Sinneskanäle aufgenommen mit dem – letztlich unerreichbaren – Ziel, Rückschlüsse auf die Vorstellungen und möglichst auch den ursprünglichen Referenten ziehen zu können.

In dieser Untersuchung beispielsweise stellen der Kohlenstoffkreislauf und die Strahlungsflüsse in der Atmosphäre bedeutsame Referenten dar. Die Vorstellungen der Wissenschaftler wie auch die der Lerner liegen in der gedanklichen und ihre verbalen und bildlichen Ausführungen in der sprachlichen Ebene. Der sprachliche Bereich ist in dieser Arbeit der Zugang zu den Vorstellungen: Von den Zeichen wird interpretativ auf die individuellen Vorstellungen geschlossen. Gleichzeitig werden Lernangebote in Form von Sprache und Zeichen vorgegeben, die die Lerner individuell zur Konstruktion eigener Vorstellungen anregen sollen. Sprache wird somit als Instrument zur Erfassung und zur Veränderung von Vorstellungen genutzt.

Innerhalb des gedanklichen Bereichs werden Komplexitätsebenen von Vorstellungen unterschieden, die ausführlich bei Gropengießer (2001) beschrieben sind. Mit »Wort« oder »Terminus« sind bloße sprachliche Zeichen gemeint. »Begriffe« stellen die einfachsten Elemente von Vorstellungen dar. Den Begriffen folgen in steigender Komplexität Vorstellungen auf der Ebene von »Konzepten«, »Denkfiguren« und »Theorien« (Gropengießer 2001). Ein Konzept ist im Folgenden immer dadurch charakterisiert, dass darin mindestens zwei Begriffe zueinander in Beziehung gesetzt werden. Weitere Beispiele finden sich in Tabelle 2.1.

Ebene	Beispiel
Theorie	CO ₂ hat einen positiven Strahlungsantrieb, der bei einer Konzentrationsänderung zu einem intermediären Ungleichgewicht führt, das sich schließlich durch vermehrte Abstrahlung ausgleicht.
Denkfigur	ERWÄRMUNG DER ATMOSPHERE DURCH MEHR TREIBHAUSGASE.
Konzept	Die Atmosphäre enthält CO ₂ .
Begriff	Atmosphäre, CO ₂ , Wärme, ...

Tabelle 2.1: Komplexität von Vorstellungen

Beispielsweise werden in den Konzepten *Atmosphäre enthält CO₂* und *CO₂ absorbiert Wärme* unterschiedliche Begriffe zum Treibhauseffekt miteinander in Beziehung gesetzt. Die Komplexitätsebene der »Denkfigur« vereinigt mehrere Konzepte miteinander. Dies ist jedoch mehr als eine bloße Addition von Konzepten. Vielmehr leitet die Bedeutung einer Denkfigur das Verstehen im stärkeren Maße als die Bedeutung eines Konzepts. Die Denkfigur ERWÄRMUNG DER ATMOSPHERE DURCH MEHR TREIBHAUSGASE vereinigt verschiedene Konzepte zur Struktur der Atmosphäre, der Treibhausgase und der Absorption und Emission von Strahlung. Verschiedene Konzepte und Denkfiguren können wiederum zu einer »Theorie« zusammengeführt werden. Sprachlicher Ausdruck einer Theorie schließlich ist ein Aussagengefüge, d. h. eine Theorie ist durch strukturierte und reflektierte Relationen zwischen Begriffen, Konzepten und Denkfiguren gekennzeichnet. Die Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH MEHR TREIBHAUSGASE könnte beispielsweise ein Glied innerhalb einer Theorie zu den Strahlungsflüssen in der Atmosphäre sein. In der vorliegenden Arbeit werden die Bezeichnungen für Vorstellungen auf Konzeptebene durch *kursive* Schreibweise und auf Ebene der Denkfigur in KAPITÄLCHEN hervorgehoben.

2.2 Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens

Metaphern sind in unserer Sprache allgegenwärtig. Kein Zeitungsartikel, kein Gespräch, kein Fachbuch kommt ohne die Nutzung von sprachlichen Bildern aus. Liest man einen Fachtext, entsteht der Eindruck, dass je abstrakter ein zu erklärender Sachverhalt ist, desto mehr Metaphern werden genutzt um ihn zu erklären. So wird der Klimawandel von Wissenschaftlern nicht selten auf den „verstärkten Treibhauseffekt“, einen „gestörte Strahlungsbilanz, oder auch auf „sich schließende Strahlungsfenster“ zurückgeführt. All diese Bezeichnungen sind durch und durch metaphorisch: Die Ereignisse in Gewächshäusern werden auf die Atmosphäre übertragen und mit dem lebensweltlichen Gegensatz schwach-stark beschrieben, Termini werden der Buchhaltung entlehnt und über den Gegensatz gestört-ungestört personifiziert oder die Atmosphäre wird mit einer Wand verglichen, in der sich Fenster schließen.

Während man lange Zeit der Ansicht war, dass Metaphern rhetorische Figuren sind, die die Sprache schmücken und sie lebendiger machen, beschreibt die kognitive Metapherntheorie ein Konzept, nach dem die Sprache erst durch Metaphern zu leben beginnt: Wir können gar nicht ohne Metaphern sprechen oder schreiben. Dabei kann nicht nur bestätigt werden, dass Metaphern zur Erklärung abstrakter Phänomene genutzt werden, sondern auch erklärt werden, warum sie genutzt werden.

Der Terminus „Metapher“ wurde schon vor über 2000 Jahren von Aristoteles erwähnt und hat sich im Laufe der Jahrhunderte durch den Einfluss verschiedener Bereiche wie der Sprachwissenschaft, aber im letzten Jahrhundert auch der Neurowissenschaft, weiter entwickelt. 1980 veröffentlichten der Linguist George Lakoff und der Philosoph Mark Johnson unter dem Titel „Metaphors we live by“ einen Ansatz zur Erklärung der Bedeutung der Metaphern für unser Sprechen – und Denken (1980). Lakoff und Johnson verneinen in ihrer – von Gropengießer (2001) für die Fachdidaktik adaptierten – Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens die rein ornamentale Funktion der Metaphern und schreiben ihr eine wesentliche Bedeutung in der Konstruktion von Wirklichkeit zu. Metaphern, so argumentieren sie, entstehen durch die Übertragung von Erfahrungen aus einem Ursprungsbereich auf einen abstrakten Zielbereich und werden deshalb als erfahrungsbasiert bezeichnet (Gropengießer 2007, S. 267; Lakoff 1990).

Erfahrungen bilden die Verbindung zwischen einem Organismus und seiner Umwelt. Sie erwachsen aus dem Kontakt mit der Umwelt, sie sind beeinflusst durch die Körpergestalt eines Organismus, seine genetisch determinierten Voraussetzungen, Umwelteinflüsse und auch sozialen Kontexte (Lakoff 1990, S. 266). Erfahrungen sind direkt, d. h. sie beziehen sich nicht auf Erinnerungen, sondern kennzeichnen eine unmittelbare Begegnung mit dem erfahrenen (vgl.

Gropengießer 2007). Wiederholtes sensomotorisches Interagieren mit der Umwelt, im Sinne einer sich wiederholenden Handlung, formt die beteiligten funktionellen Neuronengruppen: Die Art und Weise, wie wir mit unserem Körper in unserer Mit- und Umwelt handeln, entwickelt unser mentales System und generiert bedeutungsvolle Begriffe. Erfahrungen prägen nicht nur unsere Vorstellungswelt, sondern manifestieren sich auch in neuronalen Strukturen (Gallese & Lakoff 2005; Rohrer 2005). Rohrer (2005) konnte einen neuronalen Zusammenhang zwischen Metaphern und physischen Erfahrungen finden: Beim Denken einer Metapher werden die gleichen neuronalen Strukturen angeregt wie durch die physische Erfahrung des Quellbereichs der Metapher. Stellt man sich die Atmosphäre als Behälter vor, werden beim Denken an die Atmosphäre somit ähnliche Neuronen aktiviert wie beim Denken an einen Behälter und beim Anfassen und Erkunden eines Behälters.

2.2.1 Direktes und imaginatives Verstehen

Die Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens beschreibt die Rolle der Metaphern beim Verstehen. Für Lakoff und Johnson (1980) funktioniert unser Begreifen mit unserem kognitiven System weitgehend metaphorisch oder allgemeiner: imaginativ.

Aber nicht alle Bereiche unseres Denkens und Sprechens sind imaginativ. Alle sensomotorischen Begriffe wie z. B. gehen, sitzen, greifen, halten, sehen, essen können unmittelbar verstanden werden: Sie bezeichnen eine konkrete, durch verkörperte Erfahrungen zugängliche Handlung. Vorstellungen z. B. von einem Elefanten können direkt sein, weil man ihn sehen, hören, anfassen und riechen kann. Erfahrungen mit der physischen und sozialen Umwelt führen somit zu Vorstellungen von direkt erfahrbaren Gegenstandsbereichen.

Zum Verstehen und zur Erklärung abstrakter, nicht unmittelbar erfahrbarer Bereiche, werden Erfahrungen mithilfe von Metaphern aus verkörperten Quellbereichen in abstrakte Zielbereiche übertragen (siehe Abbildung 2.2).

Metaphern sind dabei nicht nur ein Phänomen des Alltagsdenkens, sondern sind auch konstituierend für wissenschaftliche Theorien. In jedem Fachbuch sind Metaphern zu finden. So wie Metaphern unsere Lebenswelt strukturieren, strukturieren sie auch die Wissenschaft (Gropengießer 2003a; Paton 1992).

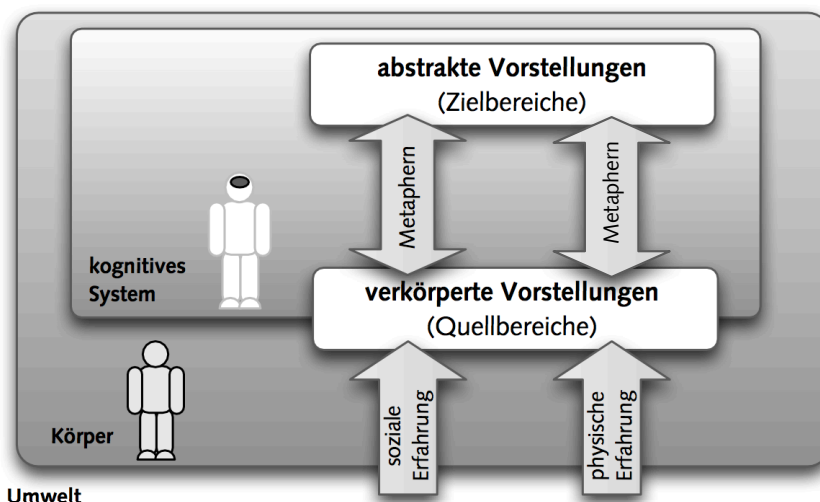


Abbildung 2.2: Erfahrung als Basis des Verstehens (nach Marsch 2009)

2.2.2 Metaphern, Schemata und metaphorische Konzepte

Die Zahl metaphorischer Ausdrücke, mit der ein abstrakter Zielbereich beschrieben werden kann, ist in der Regel groß: Die Verbrennung fossiler Energieträger kann als *Ausstoßen von CO₂*, als *Entstehen von CO₂*, als *Produzieren von CO₂*, als *Freisetzen von CO₂* etc. beschrieben werden. So vielfältig die Perspektiven sein können, die man einem Gegenstand gegenüber einnehmen kann, so vielfältig können auch die Metaphern sein, die genutzt werden, um ihn zu beschreiben. Hinter der Pluralität von Metaphern (Gropengießer 2007; Lakoff & Johnson 1999) stehen unterschiedliche individuelle Denkweisen, die bei der Analyse von Vorstellungen untersucht werden können. Die uns prägenden Erfahrungen beeinflussen auch unsere Metaphern (Lakoff & Wehling 2009, S. 25f.). Die von uns genutzten metaphorischen Ausdrücke lassen dabei Rückschlüsse auf unsere metaphorischen Konzepte zu (Lakoff & Johnson 1980). Zur Strukturierung von Metaphern werden metaphorische Ausdrücke, die den gleichen Zielbereich beschreiben und den gleichen Quellbereich nutzen, zu Metaphernkonzepten zusammengefasst (Lakoff & Johnson 2006). So beschreiben die Metaphern *Ausstoßen von CO₂*, *CO₂-Emission*, *Freisetzen von CO₂* in der Erklärung der Verbrennung fossiler Energieträger alle einen Zielbereich mit dem gleichen Quellbereich: Der Verbrennungsprozess wird als Freisetzung von CO₂ aus den fossilen Energieträgern in die Atmosphäre betrachtet. Die metaphorischen Ausdrücke lassen sich somit zum metaphorischen Konzept *Verbrennen Ist Freisetzen* zusammenfassen. Metaphorische Konzepte werden in dieser Untersuchung durch die Großschreibung aller Wörter gekennzeichnet.

In der Entstehung von Metaphern werden von Lakoff und Johnson drei konzeptbildende Erfahrungsbereiche unterschieden: Schemata, Basisbegriffe und Frames:

- **Schemata** (image schemes) sind direkt der Erfahrung entspringende Konzeptsysteme. Dabei können sowohl körperliche als auch soziale Erfahrungen konzeptbildend wirken. Schemata sind unmittelbar bedeutungstragend (Lakoff 1990, S. 367). Ein Beispiel ist das Behälterschema: Jeder hat Erfahrungen mit Behältern, wie Bechern, Gläsern und Dosen, gemacht und weiß, dass es ein Innen, ein Außen und eine Behälterwand gibt und somit etwas im Behälter oder außerhalb des Behälters sein kann.
- **Basisbegriffe** strukturieren unsere Erfahrungen, indem sie die Welt um uns herum kategorisieren (Lakoff 1990, S. 267). Sie werden auf einer mittleren Ebene zur Beschreibung unserer Umwelt herangezogen und in der Kindheit als erste gelernt. In der Kategorisierung Pflanzen – Bäume – Ebereschen bilden die Bäume den Basisbegriff.
- **Frames** sind Deutungsrahmen für Informationen. Ein Beispiel für einen frame ist die Atmosphäre: Wird das Wort Atmosphäre angesprochen, entsteht sofort ein durch den frame geprägtes Bild. Blauer Himmel, Wolken und Luft prägen das Bild der Atmosphäre. Jedes Wort ruft einen frame wach, der im Gehirn neuronal realisiert ist (Lakoff & Johnson 2006). Es lassen sich surface frames auf sprachlicher Ebene von tief verankerten deep seated frames unterscheiden. Deep seated frames strukturieren das Denken meist präkonzeptuell: Informationen, die nicht in diesen frame passen, werden meist unbewusst ignoriert (Lakoff & Wehling 2009, S. 74).

Die Abgrenzung der Begriffe Schemata, Basisbegriffe und Frames zur Beschreibung der Ursprungsbereiche von Metaphern nach Lakoff und Johnson ist nicht trennscharf und wird vielfach kritisiert (Baldauf 1997, S. 97; Jäkel 1997, S. 144). Die von Lakoff und Johnson vorgeschlagene Strukturierung des Metaphernbegriffs bringt für diese Arbeit keinen Gewinn bezüglich der Systematisierung von Metaphern. Im Folgenden werden deshalb nur noch „Metaphorische Äußerungen“ im Sinne von konkreten Redewendungen mit metaphorischem Charakter, „Metaphernkonzepte“ im Sinne von metaphorischen Konzepten und Schemata als prägende Quellbereiche differenziert.

2.2.3 Highlighting and hiding

Keine Metapher vermag einen Zielbereich allumfassend zu beschreiben. Für abstrakte Zielbereiche stehen meist mehrere Metaphern zur Verfügung. Die Angemessenheit einer Metapher entscheidet sich dabei aus fachlicher Sicht immer durch die Perspektive, aus der ein Zielbereich beschrieben werden soll. So können Verbrennungsprozesse als Freisetzung von CO₂ (*Verbrennen Ist Freisetzen*) oder als Entstehung von CO₂ (*Verbrennen Ist Entstehen*) beschrieben werden. Welches Metaphernkonzept angemessen ist, entscheidet sich kontextbedingt: Soll die Umwandlung eines Stoffes fokussiert werden, ist letzteres Konzept angemessener, da die Reaktion von fossilen Energieträgern zu CO₂ hervorgehoben wird. Soll hingegen die Bilanz der Kohlenstoffflüsse in den Mittelpunkt gestellt werden, wäre erstere Metapher fachlich angemessener. Um einen Zielbereich umfassend zu beschreiben, bedarf es somit verschiedener Metaphern. Jede Metapher hebt bestimmte Aspekte hervor, während andere von der Metapher versteckt werden. Dieses Phänomen wird als *highlighting* und *hiding* (Lakoff & Johnson 2006) bezeichnet.

2.2.4 Prominente Schemata zum Verstehen des Klimawandels

In der Analyse der von Wissenschaftlern und Lernern genutzten Metaphern zeigt sich, dass bestimmte Schemata sehr häufig und vielfältig zum Verstehen des Klimawandels herangezogen werden. Diese Schemata sind im Folgenden beschrieben. Innerhalb der Beschreibungen werden jeweils Beispiele und Erfahrungen aufgezeigt, die durch das jeweilige Schema strukturiert sind.

Das Start-Weg-Ziel-Schema

Das Start-Weg-Ziel-Schema wird von frühen Erfahrungen geprägt: Säuglinge werden von A nach B gebracht, Kleinkinder krabbeln und Kinder schließlich laufen von A nach B. Dabei gibt es immer einen Startpunkt, an dem wir unseren Weg beginnen, und ein Ziel, auf das wir uns zu bewegen.

Das Start-Weg-Ziel-Schema ist nach Lakoff und Johnson (1999) grundlegend durch folgende Elemente gekennzeichnet: Ein Startpunkt, einen Zielpunkt und einen sich vom Start zum Ziel bewegenden Trajektor. Darüber hinaus beschreiben sie folgende weitere Elemente: Ein Weg vom Start zum Ziel, die Geschwindigkeit der Bewegung und die Position des Trajektors zu einer bestimmten Zeit. Die Richtung der Bewegung ist durch die Beschreibung von Start- und Zielpunkt festgelegt.

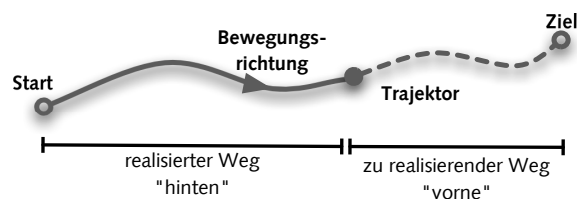


Abbildung 2.3: Das Start-Weg-Ziel-Schema (in Anlehnung an Lakoff & Nunez 1998)

Bezogen auf räumliche Beziehungen verstehen wir das Start-Weg-Ziel-Schema direkt. Darüber hinaus nutzen wir es imaginativ z. B. für ein Verständnis des Kontextes Zeit. So sprechen wir beispielsweise von der Geburt als dem Anfang des Lebens, vom Lebensweg auf dem verschiedene Stationen wie der Schulanfang oder das Abitur durchlaufen werden, und vom Tod als Ende des Lebens, um Verständnis über die zeitliche Abfolge eines Menschenlebens zu entwickeln (vgl. Riemeier 2005). Das Schema bildet die Grundlage für finalistische, also auf ein Ziel gerichtete Denkansätze.

Das Kreislaufschema

Das Kreislaufschema leitet sich aus dem Start-Weg-Ziel-Schema ab, bei dem Start und Ziel identisch sind: Ein Kreislauf beginnt mit einem Startpunkt, setzt sich durch eine Reihe von verbundenen Ereignissen fort und endet dort, wo er begann, um schließlich einen neuen Kreislauf zu durchlaufen. Der einfachste Kreislauf ist durch eine Kreisbewegung gekennzeichnet, in der man unmittelbar an die Ausgangsposition zurückkommt, wie z. B. beim 400 m-Lauf in einem Stadion: Hier bewegt sich ein Trajektor („der Läufer“) von einer Startlinie im Kreis in einer Vorwärtsbewegung bis hin zur einer Ziellinie. Dabei wird jeder Punkt im Kreis pro Runde genau einmal passiert. Da die Ziellinie auch gleichzeitig die Startlinie ist, beginnt der Kreislauf hier von Neuem.

Befinden sich mehrere Trajektoren („Läufer“) im Kreislauf, ist es ohne eine zeitliche Perspektive unmöglich zu entscheiden, welcher Trajektor vorne liegt, da aus einer räumlichen Perspektive vorne gleichzeitig hinten ist. Erst wenn die Zahl der zu durchlaufenden Zyklen festgelegt ist, kann entschieden werden, wer vorne liegt.

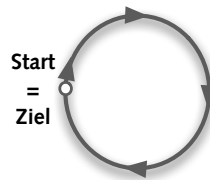


Abbildung 2.4: Das Kreislauf-Schema

Johnson (1987) beschreibt darüber hinaus Kreisläufe aus einer zeitlichen Perspektive: Tag und Nacht, Wochen und Jahreszeiten werden als zyklisch wiederkehrend empfunden, das Leben wird als Ergebnis eines Fortpflanzungszyklus wahrgenommen und die weibliche Regelblutung als Zyklus interpretiert. Zyklen sind laut Zerubavel (1985) meist vielfach zu durchlaufen, überlappend und sequentiell. Dies trifft besonders für zeitliche Zyklen wie Sekunden, Minuten, Stunden oder Tage zu. Die unterschiedlichen Perspektiven drücken verschiedene Kreislaufvorstellungen aus, denen zufolge ein Kreislauf räumlich oder zeitlich wahrgenommen wird:

Kreislauf	Perspektive	Erfahrung
Ein Trajektor nimmt immer wieder die gleiche Strecke und kommt wieder am Startpunkt an.	räumlich & zeitlich	<i>Laufen im Kreis, Fahrt in einem Kettenkarussell</i>
Ein Trajektor nimmt zu einem wiederkehrenden Zeitpunkt den gleichen Zustand ein.	zeitlich	<i>Jeder Tag beginnt mit einem Sonnenaufgang. Jeden Samstag bin ich mit dem Hausputz an der Reihe.</i>

Tabelle 2.2: Kreislaufvorstellungen

Die räumlich-zeitliche Erfahrung wird meist als Kreislauf bezeichnet, während die rein zeitliche Dimension meist als Zyklus beschrieben wird.

Das Behälterschema

Die Erfahrungen, auf denen das Behälterschema basiert, liegen in der Wahrnehmung unseres Körpers bzw. anderer Dinge als Behälter mit einer klaren Grenze zwischen einem Innen und einem Außen. Räume und Körper werden zu Behältern, in denen wir uns befinden bzw. in die etwas aufgenommen oder aus denen etwas abgegeben wird.

Indikatoren für die Nutzung des Behälterschemas sind die Verwendung von Termini wie „in“, „aufnehmen“, „freisetzen“, „drin sein“, „Speicher“ etc. Diese beschreiben das Behälterschema ebenso, wie sie erst mit dem Schema verstanden werden können. Ohne die Vorstellung eines

Behälters ist z. B. der Begriff „in“ sinnlos und ohne den Begriff „in“ ist ein Behälter sinnlos. Die Indikatoren und das Schema sind also untrennbar miteinander verknüpft.

Nach Lakoff (1990) und Johnson (1987) ist das Behälter-Schema durch die Elemente »Innen«, »Grenze« und »Außen« strukturiert. Dabei sind die Elemente voneinander abhängig, da sie nur als Ganzes einen Sinn ergeben. So ist ein Innenraum ohne Begrenzung und Außenseite schlichtweg nicht vorstellbar. Ein Gegenstand kann entweder in einem Behälter oder außerhalb eines Behälters sein.

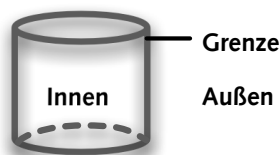


Abbildung 2.5: Das Behälterschema

Das Speicher-Fluss-Schema

Gießt man Wasser aus einer Flasche in ein Glas, nimmt dieses Glas und trinkt das Wasser, gelangt das Wasser von einem Behälter (Flasche) in einen anderen (Glas) und schließlich über den Verdauungstrakt in einen dritten (z. B. Körperzellen).

Im Speicher-Fluss-Schema werden die von Lakoff (1990) und Johnson (1987) beschriebenen Behälter- und Start-Weg-Ziel-Schemata zu einem komplexen Speicher-Fluss-Schema kombiniert. Die Logik dieses Schemas ist aus den ihm zugrunde liegenden Schemata abgeleitet: Ein Stoff (Trajektor) kann sich an drei Orten befinden: In Speicher A, in Speicher B oder außerhalb der beiden Speicher. Wenn der Stoff in Speicher A ist, ist er nicht in Speicher B. Ausgelöst durch bestimmte Ursachen kann der Stoff zwischen den Speichern ausgetauscht werden.

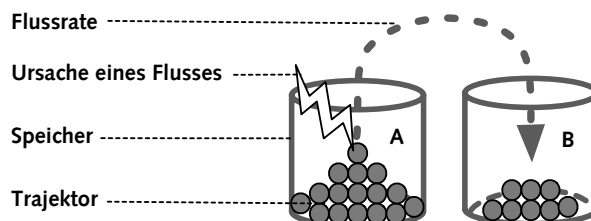


Abbildung 2.6: Das Speicher-Fluss-Schema I

In einer Variante kann auch die Umgebung eines Behälters als Behälter betrachtet werden: So wird ein Stoff aus einem Behälter in die Umgebung abgegeben, z. B. wird Kohlenstoff aus fossilen Energieträgern in die Atmosphäre freigesetzt oder wieder aus der Atmosphäre in Pflanzen gebunden. Ähnlich einer Matroschka steckt dann ein Behälter in einem anderen.

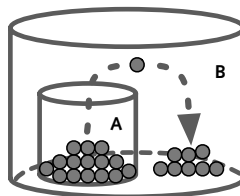


Abbildung 2.7: Das Speicher-Fluss-Schema II

Die Veränderungen des Inhalts eines Speichers werden durch die Beträge der Zu- und der Abflussraten reguliert. Sind Zu- und Abflussrate in einem bestimmten Zeitabschnitt gleich groß, bleibt die Füllung des Speichers konstant. Dabei muss zwischen einer kontinuierlichen Konstanz über einen festgelegten Zeitraum und einer ausgeglichenen Bilanz am Ende eines Zeitraums unterschieden werden: Bei ersterem sind Zu- und Abflüsse über den gesamten Betrachtungszeitraum exakt gleich groß. Bei letzterem können temporär Ungleichgewichte entstehen, die sich am Ende des Zeitraums jedoch wieder ausgeglichen haben müssen. Trotz der ausgeglichenen Bilanz bzw. der kontinuierlichen Konstanz kann der Inhalt in dem betrachteten Zeitraum komplett ausgetauscht werden. Eine Veränderung der Menge des Inhalts eines Speichers kann durch drei Mechanismen erfolgen: durch eine Vergrößerung des Zuflusses, eine Verkleinerung des Abflusses oder einer gleichzeitigen Vergrößerung des Zuflusses und Verkleinerung des Abflusses.

Das Speicher-Fluss-Schema ist ein von Lernern und Wissenschaftlern gleichermaßen genutztes Schema zur Beschreibung von Stoff- und Energieflüssen: So werden Kohlenstoffflüsse zwischen verschiedenen Speichern (Atmosphäre, fossile Energieträger, Lebewesen, Ozeane) oder auch Strahlungsflüsse zwischen Weltraum und Atmosphäre bzw. Erdoberfläche und Atmosphäre betrachtet, um den Klimawandel zu beschreiben.

Das Gleichgewichtsschema

Das Gleichgewichtsschema ist ein tief verankertes Schema, das schon früh erworben wird: Die ersten Gehversuche sind stark vom Erreichen und Halten des Gleichgewichts geprägt. Besonders bewusst wird uns das Gleichgewicht später hingegen in der Regel nicht durch seine An-, sondern durch seine Abwesenheit, nämlich dann, wenn wir zu stürzen drohen und durch eine Verlagerung von Körpermasse und Kräften das Gleichgewicht suchen. Das Gleichgewichtsschema ist deshalb so prominent, weil es unser tägliches Handeln durchdringt und Grundlage für unsere Bewegungen auf dieser Welt ist (Lakoff 1990).

Der Terminus »Gleichgewicht« transportiert das Bild einer Waage, deren beiden Schalen gleich schwer beladen sind. Damit entwirft die Metapher eine Logik, wonach jede quantitative Veränderung nach einer ausgleichenden Gegenveränderung ruft.

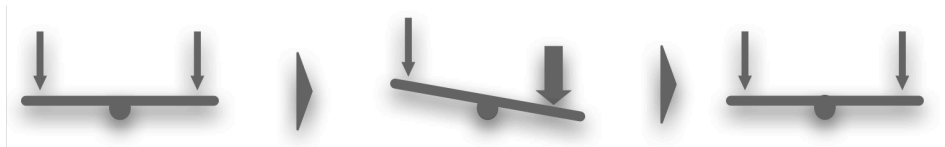


Abbildung 2.8: Das Gleichgewichtsschema

Als körperliches Schema ist es nicht mit einfachen Regeln und Abläufen zu beschreiben. Trotzdem wird das Gleichgewichtsschema in alltäglichen Zusammenhängen häufig konzeptualisiert: Galen (129 bis 216) hat in seiner Viersäftelehre ein Krankheitskonzept konzipiert, das auf die Vorstellung eines Gleichgewichts der vier Körpersäfte zurückgeht. Eine Krankheit entstünde der Theorie nach dadurch, dass ein Ungleichgewicht zwischen den Körpersäften entsteht. Obgleich die Viersäftelehre widerlegt ist, werden auch heute noch Gleichgewichtsprozesse im Körper in Zusammenhang mit Wohlbefinden beschrieben: „Zu viel Säure im Magen“, „Mir ist zu heiß“, oder „Das ist zu schwer“ sind Ausdrücke dafür, dass etwas aus dem Gleichgewicht geraten ist. Ein Unwohlsein resultiert meist aus einem »zu viel« oder »zu wenig« bestimmter Stoffe oder Prozesse.

Das Gleichgewichtsschema wird somit durch drei Erfahrungsquellen gestützt (Johnson 1987, S. 96): (1) Das aufrechte Stehen und Gehen ohne umzufallen, (2) das Halten und Tragen gleich schwerer Gegenstände in beiden Händen ähnlich einer Waage und (3) die Wahrnehmung einer inneren Homöostase, das „Sich-Ausgeglichen-Fühlen“.

Das Personenschema

Die eigene Person als Quellbereich zur Erklärung abstrakter, nichtmenschlicher Zielbereiche zu wählen, ist ein weit verbreitetes Denkschema. Dabei werden eigene Erfahrungen, Gefühle, Absichten oder Tätigkeiten auf abstrakte Prozesse oder Objekte übertragen und diese personifiziert. Die für Personifizierungen genutzten Termini werden in der Literatur unterschiedlich beschrieben (Gropengießer 2003a, S. 22). Für diese Studie sollen folgende Definitionen der verschiedenen Ausprägungen des Personenschemas zugrunde gelegt werden:

Bezeichnung	Bedeutung	Beispiel
Anthropomorphismus	Übertragung menschlicher Eigenschaften auf nichtmenschliche Objekte	„Durch den Klimawandel bekommt die Erde Fieber.“
Anthropozentrismus	Beschreibung der Welt, in der der Mensch die Realität mit sich selbst als Mittelpunkt definiert	„fossile Energieträger“, „lebenswerte Erde“
Intentionalisierung	Übertragung willentlicher Absichten auf nichtmenschliche Objekte	„Die Ozonschicht will nicht, dass die Strahlen wieder raus gehen“
Finalisierung	Übertragung zielgerichteter, aber nicht unbedingt willentlicher Absichten auf nichtmenschliche Objekte	„Die untere Atmosphäre erwärmt sich, um die Strahlungsbilanz auszugleichen.“

Tabelle 2.3: Personifizierungen

Nach Lakoff und Johnson deckt die Personifizierung ein sehr großes Spektrum von Metaphern ab, die ihrerseits unterschiedliche Merkmale einer Person oder Wahrnehmungsweisen einer Person herausgreifen (Lakoff & Johnson 1980). Ihren Alltagsnutzen zeigen diese Metaphern durch ihren enormen Erklärungswert, d. h. durch die Personifizierung werden wenig begreifbare Phänomene für uns begreifbar.

Das Natürlich-Künstlich-Schema

Das Natürlich-Künstlich-Schema wird lebensweltlich häufig angewendet, um menschliche von nicht-menschlichen Produkten und Prozessen zu unterscheiden. Was als künstlich oder natürlich wahrgenommen wird, ist dabei einer starken kulturellen Prägung unterworfen (Gardner & Stern 2002; van Koppen 2000). In der Vorstellungsforschung und Wissenschaftssoziologie lassen sich vier verschiedene Vorstellungen für die Beschreibung von Natürlichkeit erfassen:

1. *Natürlich ist, was Teil der Natur ist.* Alle der Natur entwachsenen Gegenstände und somit auch der Mensch sind natürlich. Alle Handlungen und Produkte natürlicher Produkte sind natürlich (Callicott 1996; Mill 1969).
2. *Natürlich ist der Gegensatz zu künstlich.* Der Gegensatz *künstlich – natürlich* definiert sich über die Existenz von Gegenständen und Prozessen, die vom Menschen intentional mit einem intendierten Zweck hergestellt bzw. initiiert werden. Diese werden als künstlich bezeichnet. Alle anderen Gegenstände sind natürlich (Hilpinen 1995; Lee 2003).
3. *Natürlichkeit ist geschichtliche Unabhängigkeit vom Menschen.* Alles, was auch ohne den Menschen existieren würde, ist natürlich (Soper 1995).
4. *Natürlich ist, was normal ist.* Alle die Dinge und Prozesse, die auf Grundlage bestehender Vorstellung antizipiert werden, sind natürlich. Unerwartete, ungewohnte Ereignisse sind unnatürlich (Radcliffe 1984; Wachbroit 1994).

Die verschiedenen Definitionen haben unterschiedliche Bezugspunkte im Alltag. Während die ersten beiden Beschreibungen sehr abstrakt sind und sich über einen Gegensatz bzw. eine Unab-

hängigkeit definieren, haben Definition 3 und 4 einen Ursprung in der Alltagswelt: Alles, was sich selbst reproduziert oder schon immer da war, ist natürlich.

Die Millsche Natürlichkeitsdefinition ist so richtig wie nichtssagend: Als Lebewesen ist der Mensch Teil der Natur und im weiteren Sinne damit auch seine Handlungen und die aus ihnen entstehenden Produkte. Jedoch kann es der Definition folgend keine künstlichen Gegenstände oder Handlungen geben, sodass die Begriffe unnatürlich bzw. künstlich obsolet werden.

Häufig kommt es mit der Zuordnung der Eigenschaften „künstlich“ und „natürlich“ auch zu einer Bewertung von Dingen und Phänomenen: So werden natürliche Ereignisse und Dinge meist als gut und künstliche als schlecht empfunden. Die Verknüpfung der Wahrnehmung von Dingen oder Ereignissen als natürlich oder künstlich und die gleichzeitige Bewertung ist in unserem Bewusstsein tief verankert. Sie wird z. B. in der Beschreibung der Natur oder auch in der Beschreibung von Charaktereigenschaften angewandt: „*Sie verhält sich ganz natürlich*“, „*sein künstliches Grinsen*“, „*natürlicher Geschmack*“, „*künstliche Farb- und Aromastoffe*“. In der Auswahl von Lebensmitteln ist sie sogar handlungsleitend, insofern dass natürliche gegenüber künstlichen Lebensmittel als gesünder eingeschätzt werden (Bredahl 1999; Schramme 2002).

Der Natürlichkeitsdefinition Wachbroits (1994) folgend, kann die Bewertung von natürlichen und künstlichen Gegenständen und Ereignissen auf die Wahrnehmung einer sich verändernden Normalität zurückgeführt werden. Da diese sich verändernde Normalität mit Unsicherheit verbunden ist, kommt es zu einer dem Ursprungszustand gegenüber negativ bewerteten Situation. Zudem werden (in der Wahrnehmung des Einzelnen) schon immer existierende Dinge oder Situationen als normal und natürlich und meist auch als gut bewertet.

Die sehr abweichenden Zuschreibungen und Definitionen, was künstlich und was natürlich ist, sind auf die Struktur des Schemas zurückzuführen: Das Schema unterliegt keiner direkten Erfahrung, sondern ist kulturell und individuell geprägt. Ob wir etwas als natürlich wahrnehmen, können wir somit nicht auf Grundlage unserer Erfahrungen entscheiden, sondern müssen auf erlernte Zuschreibungen zurückgreifen. Dies führt dazu, dass das Schema sehr unterschiedlich angewandt wird.

Die Bewertung „natürlich ist gut“ wurde hingegen von Moore (1996, S. 82) als naturalistischer Fehlschluss beschrieben, da nicht alles, was gut ist, auch natürlich ist und somit nicht alles, was natürlich ist, auch gut sein könne.

2.3 Lernen als Conceptual Reconstruction

Der Conceptual-Change-Ansatz hat seinen Ursprung im Kuhnschen Paradigmenwechsel (Kuhn 1976). Wenn in einer Wissenschaft Befunde auftreten, die nicht mehr durch geltende Paradigmen, innerhalb derer der bisherige wissenschaftliche Fortschritt stattfand, erklärt werden können, kommt es zu einem Paradigmenwechsel.

Ihren Anfang nahm die Conceptual-Change-Forschung in der Naturwissenschaftsdidaktik der 1980er Jahre. Damals setzte sich die Erkenntnis des Konstruktivismus durch, dass Lerner nicht als tabula rasa, als unbeschriebenes Blatt, in den Unterricht kommen, sondern im Laufe ihres Lebens eine ganze Reihe alltagsnaher, wissenschaftsorientierter oder sogar fachlicher Vorstellungen erworben haben, die sie mit in den Unterricht bringen. Meist sind diese Vorstellungen durch Alltagserfahrungen geprägt und reichen zur fachlich angemessenen Erklärung bestimmter Phänomene nicht aus. Darüber hinaus zeigt sich, dass sich eben diese dem Alltag entspringenden Vorstellungen im Unterricht als besonders resistent erweisen (Treagust & Duit 2008).

Posner et al. (1982) erörterten ausgehend von instruktionspsychologischen Überlegungen, welche Bedingungen einen Wechsel von Alltagsvorstellungen zu fachlich angemessenen Vorstellungen begünstigen. Die ursprünglichen Ansätze bauten dabei auf der Beschreibung der Konstruktion von Wissen auf und fokussierten auf die Vorstellungsentwicklung von Individuen.

Neben den konstruktivistischen Einflüssen spielten später auch sozialkonstruktivistische Aspekte in der Forschung eine Rolle und bezogen den Einfluss der Lerngruppe auf das Lernen des Individuums in das Beschreiben des Lernens mit ein (Treagust & Duit 2008). Bei den verschiedenen im Folgenden erläuterten Conceptual-Change-Ansätzen handelt es sich nicht um eine Lerntheorie, sondern eher um eine Vielzahl verschiedener Aspekte, die das Lernen naturwissenschaftlicher Inhalte beschreiben.

Abrupte und allmähliche Vorstellungsveränderungen

Antriebskraft dieses Vorstellungswechsels ist eine Unzufriedenheit mit der Erklärungskraft bisheriger Vorstellungen. Um ein Lernen zu ermöglichen, werden den Lernern Befunde und Theorien präsentiert, die eine zufriedenstellende Erklärung für das zu erklärende Phänomen haben. Die Nutzung des Wortes »change« im Rahmen der Conceptual-Change-Forschung bringt eine aus heutiger Sicht missverständliche Problematik mit sich, da es unterstellt, dass lebensweltliche Vorstellungen durch fachwissenschaftliche ersetzt oder ausgewechselt werden könnten. Eine Vielzahl an Studien hingegen zeigt, dass selbst nach Einführung fachlich angemessener Theorien und Konzepte diese nur selten von Lernern zur Erklärung herangezogen werden (Duit & Treagust 1998). In den meisten Fällen gelingt es allenfalls, einen peripheren Konzeptwechsel zu erreichen (Chinn & Brewer 1993), bei dem Teile der Alltagsvorstellung mit Teilen der neu vermittelten wissenschaftlichen Vorstellung hybridisiert werden (Jung 1993) oder in einer synthetischen, neuen Vorstellung aufgehen (Vosniadou & Brewer 1992).

Auch wenn die von Piaget beschriebene Akkomodation als ein radikaler Vorstellungswechsel definiert ist (Piaget & Inhelder 1972), bedeutet dies nicht, dass sie abrupt geschehen muss. Vosniadou und Brewer (1992) gehen davon aus, dass eher eine allmähliche Anpassung an eine neue Vorstellung erfolgt. Tyson et al. (1997) unterscheiden in der Conceptual-Change-Forschung Ansätze, die auf eine Entwicklung der Vorstellungen im Sinne einer Anreicherung von Wissen zielen (Conceptual Growth, Conceptual Development), und solche Ansätze, die eine grundlegende Revision der Vorstellungen (Conceptual Change) intendieren.

Erfolgsfaktoren für einen Konzeptwechsel

In der Conceptual-Change-Forschung wird von einem Lernen auf Basis der Alltagsvorstellungen der Lerner ausgegangen. Dabei werden folgende Kriterien für einen erfolgreichen Lernen aus epistemologischer Perspektive, also auf einen Erkenntnisgewinn ausgerichteten Konzeptwechsel, vorausgesetzt (G. J. Posner et al. 1982):

- *Unzufriedenheit*: Voraussetzung zur Vorstellungsveränderung ist eine Unzufriedenheit des Lerners mit der Erklärungsmächtigkeit bisheriger Vorstellungen.
- *Verständlichkeit*: Die neue Vorstellung muss rational und anhand der bisherigen Vorstellungen eines Lerners nachvollziehbar sein.
- *Plausibilität*: Die neue Vorstellung muss Probleme erklären können, die die alte Vorstellung nicht bewältigen konnte. Eine neue Vorstellung wird umso leichter integriert, je konsistenter sie mit der übrigen Vorstellungswelt des Lerners ist.
- *Fruchtbarkeit*: Die neue fachlich angemessene Vorstellung sollte ausbaufähig, auf andere Bereiche anwendbar sein. Ist die neue Vorstellung erklärungsstärker als die alte, wird sie dem Individuum fruchtbarer erscheinen, und es wird die neue Vorstellung nutzen.

Posner et al. (1982) gehen dabei davon aus, dass diese Kriterien hierarchisch sind und von der Unzufriedenheit über die Verständlichkeit und Plausibilität hin zur Fruchtbarkeit durchschritten werden müssen, um einen erfolgreichen Konzeptwechsel zu erreichen. Voraussetzung ist, dass nicht die Lehrperson meint, die vier beschriebenen Bedingungen in der Lehr-Lernsituation hergestellt zu haben, sondern insbesondere die Schüler die Lernsituation entsprechend wahrnehmen (Krüger 2007). Eine Untersuchung von Guzetti et al. (1992), in der verschiedene Vermittlungsstrategien zur Herbeiführung eines „Conceptual change“ einer Meta-Analyse unterzogen wurden,

belegt, dass sich eine Gegenüberstellung der aktuellen Vorstellungen mit naturwissenschaftlichen Vorstellungen als wirksam für das Initiieren eines Konzeptwechsels erweist.

Viele Autoren stellen über die von der Gruppe um Posner beschriebenen Bedingungen für eine konzeptuelle Entwicklung hinausgehend die Notwendigkeit von Metakognitionen heraus. Gunstone und Mitchell (1997) beschreiben einen erfolgreichen Conceptual Change in folgenden Schritten: Erkennen der vorhandenen Vorstellungen, Evaluieren der vorhandenen Vorstellungen, Entscheidung zur Rekonstruktion von Vorstellungen und Prüfung der neu entwickelten Vorstellungen. Hierbei ist eine nicht zu unterschätzende Fähigkeit zur Metakognition notwendig, um das Bewusstsein und die Kontrolle über das eigene Lernen zu erlangen (diSessa & Sherin 1998).

Ein Ansatz der Conceptual-Change-Forschung ist es, die Lerner in einen kognitiven Konflikt zu führen. Dabei können in Anlehnung an Duit und Treagust (1998) vier unterschiedliche Szenarien beschrieben werden, wie der Konflikt ausgelöst werden kann:

- Der Konflikt ergibt sich aus der Diskrepanz zwischen der Vorhersage eines Lerners zu einem Phänomen und seiner anschließenden Beobachtung.
- Es ergeben sich Unterschiede zwischen den Vorstellungen eines Lerners und der im Unterrichtsprozess vermittelten, fachlich angemessenen Vorstellung.
- Lerner entdecken in der Diskussion miteinander verschiedene Vorstellungen.
- Der Konflikt ergibt sich aus einer intraindividuellen Diskrepanz, d. h. es existieren Widersprüche innerhalb der Vorstellungen eines Lerners.

Für den kognitiven Konflikt gilt ähnliches wie für die oben angeführten Kriterien zum Konzeptwechsel: Es reicht nicht aus, wenn ein Lehrer seine Lerner in einen für ihn zwar offensichtlichen, für die Lerner hingegen nicht erkennbaren Konflikt führt. Nicht selten nehmen Lerner einen Widerspruch ihrer Vorstellungen zu dem zu erklärenden Phänomen, der für Lehrer offensichtlich ist, nicht wahr (Duit & Treagust 1998).

Grenzen und Erweiterungen der Conceptual-Change-Ansätze

Die Conceptual-Change-Forschung hat sich in großen Teilen bisher auf die kognitiven Dimensionen beschränkt und motivationalen, emotionalen sowie sozialen Aspekten nur in geringem Maße Rechnung getragen (vgl. Duit & Treagust 2003; Pintrich 1993; Zembylas 2005).

Um diesem Problem zu begegnen sind in den letzten Jahren vermehrt Studien durchgeführt worden, die beispielsweise auch soziale und affektive Aspekte berücksichtigten (Duit & Treagust 2003). Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass Ansätze, die die epistemologischen, ontologischen und affektiven Komponenten des Lernens in einem mehrdimensionalen Modell zusammenführen, erfolgreicher sind als eindimensionale Modelle (Duit 1998). In den letzten Jahren haben sich fünf Erklärungsansätze zur Erfassung von Lernprozessen im Rahmen der Conceptual-Change-Forschung herausgebildet:

- **Epistemologischer Conceptual Change** (G. J. Posner et al. 1982): Konzeptwechsel sind Änderungen der Vorstellungen von einer initialen, meist lebensweltlichen zu einer gewünschten, meist fachlich angemessenen Vorstellung. Die oben genannten Kriterien zum Konzeptwechsel können helfen Vorstellungen zu verändern.
- **Ontologischer Conceptual Change** (Chi et al. 1994b): Konzeptwechsel ist ein Prozess, in dem ein Lerner die ontologischen Kategorien ändert, in denen er denkt. Dabei werden grundlegende Vorstellungen über die Eigenschaften und Kategorien des Seins und der Natur verändert. Es werden somit häufig nicht nur Vorstellungen zu einem bestimmten Inhaltsbereich, sondern die ontologischen Vorstellungen, in denen gedacht wird, verändert.
- **Modell der rahmen- und inhaltsspezifischen Theorie** (Vosniadou 1994, 2002): Vorstellungen lassen sich in Rahmentheorien und inhaltsspezifische Theorien unterscheiden: Rahmentheorien bestehen aus meist unbewussten, frühkindlich geprägten ontologischen und epistemologischen Grundannahmen. Inhaltsspezifische Theorien beziehen sich auf einen

nen konkreten Erkenntnisgegenstand und werden durch die Rahmentheorie mitbestimmt. Eine Vorstellungsveränderung im Bereich einer inhaltsspezifischen Theorie misslingt oft, weil die betreffende Rahmentheorie dies verhindert. Sie zu verändern heißt, tief verwurzelte Erfahrungen zu erschüttern und damit beim Lerner eine erhebliche Verunsicherung zu erzeugen.

- **Sozialer und affektiver Conceptual Change** (Pintrich 1993): Konzeptwechsel sind in soziale und motivationale Kontexte eingebettet, die das Lernen beeinflussen. Neben rein kognitiven Strategien beim konzeptuellen Lernen müssen auch die Selbstwirksamkeit, Gruppensituationen, individuelle Bedürfnisse sowie Erwartungen und Wünsche der Lerner berücksichtigt werden. Zembylas (2005) beschreibt die Notwendigkeit einer Zusammenführung der kognitiven und affektiven Dimensionen des Lernens, in denen Emotionen nicht nur als Variablen beim Lernen gesehen werden, sondern ebenfalls Ziel von Lernanstrengungen und damit eines Konzeptwechsels werden müssen.
- **Conceptual Change als Kohärenzbildung** (diSessa 1993; diSessa & Sherin 1998): Alltagsvorstellungen bestehen aus erfahrungsbasierten, selbsterklärenden nicht zusammenhängenden Bruchstücken (p-prims), die beim Lernen zu komplexeren konzeptuellen Strukturen zusammengefügt werden. Eine Vorstellungsentwicklung im Sinne des von diSessa formulierten Conceptual Change besteht aus der Bildung von Kohärenz zwischen diesen Vorstellungen in komplexere Denkstrukturen.

Die unterschiedlichen Ansätze wählen jeweils verschiedene Perspektiven auf das Lernen und sind somit ergänzend statt einander ausschließend zu betrachten. Über die kognitionspsychologischen Conceptual-Change-Ansätze hinaus gab es in den letzten Jahren vermehrt Ansätze, kognitionslinguistische Verstehenstheorien mit dem Lernen von abstrakten naturwissenschaftlichen Inhalten zusammenzubringen. Amin (2009) hat in einer Untersuchung die Energiekonzepte von Lernern und Wissenschaftlern auf Grundlage der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens analysiert. Er kommt in seiner Analyse – theoriekonform – zu dem Schluss, dass Lerner wie auch Wissenschaftler ihre Konzepte in Erfahrungen gründen. Unterschiede lassen sich in der Komplexität der Vorstellungen finden: Während Lerner in der Regel ein Energiekonzept auf einer einzigen Erfahrung entwickeln, nutzen Wissenschaftler verschiedene Erfahrungen, um unterschiedliche Aspekte zu beschreiben. Amin sieht den Beitrag der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens zur Conceptual-Change-Forschung darin, dass Lerner mit multiplen Metaphern zu einem Problem konfrontiert werden sollten, um erfolgversprechende Lernprozesse zu initiieren (Amin 2009, S. 192). Vosniadou kritisiert das Vorgehen und zweifelt die Kompetenzen der Lerner an, Metaphern als solche zu erkennen und die jeweiligen zur fachlich angemessenen Erklärung eines Problems notwendigen Aspekte herauszuarbeiten (Vosniadou 2009, S. 203).

In dieser Untersuchung wird der Conceptual-Change-Ansatz für die Entwicklung von Lernangeboten und ihre Evaluation herangezogen. Dabei wird jedoch nicht ein Konzeptwechsel, sondern eine konzeptuelle Weiterentwicklung, eine Rekonstruktion der Lernervorstellungen angestrebt. Dies folgt der von Kattmann (2005) vorgeschlagenen Konkretisierung des Terminus Conceptual Change als Conceptual Reconstruction. Die Rekonstruktion greift die Situiertheit und Verknüpfung von Vorstellungen aus neurobiologischer Perspektive auf und rückt den Tätigkeitsaspekt des Lernenden als aktiver Konstrukteur seines eigenen Wissens in den Mittelpunkt. Die Vermittlungsexperimente (vgl. Kapitel 9) enthalten neben den konkreten Lernangeboten auch auf Metakognition ausgerichtete Phasen, in denen Lerner explizit angehalten sind, ihre Vorstellungen zu reflektieren oder auch retrospektiv ihre Vorstellungen und Erwartungen zu diskutieren.

2.4 Zusammenfassung

- Vorstellungen können als kognitive Konstrukte betrachtet werden. Jede Vorstellung ist individuell und kann nicht einfach weitergegeben, sondern muss immer wieder neu konstruiert werden.
- Vorstellungen sind ein mentales Erleben, das von spezifischen neuronalen Aktivitätsmustern begleitet wird. Denken wird dabei als die Aktivierung eines neuronalen Aktivitätsmusters verstanden. Lernen ist die Veränderung von neuronalen Strukturen und verändert dadurch auch Vorstellungen.
- Lernen als Veränderung von Vorstellungen ist ein komplexer, zeit- und energieaufwändiger Prozess. Dabei werden Vorstellungen auf ihre Kohärenz und Viabilität geprüft und ggf. an das zu Erklärende angepasst. Vorstellungen werden häufig nicht ersetzt, sondern erweitert und weiterentwickelt, also rekonstruiert.
- Vorstellungen können unabhängig von ihrer fachlichen Angemessenheit viabel sein. Sie erklären uns unsere Umwelt und können fachlich unangemessen, aber nicht falsch sein.
- Quellen jeglicher Vorstellung sind physische und soziale Erfahrungen. Abstrakte, der direkten Erfahrungen nicht zugängliche Bereiche sind verstehbar und erklärbar, indem verkörperte Vorstellungen aus erfahrbaren Quellbereichen auf diese abstrakten Zielbereiche übertragen werden.
- Vorstellungen zu einem bestimmten Zielbereich sind der Interpretation durch sprachliche Äußerungen zugänglich, da Sprache und Denken eng miteinander korrespondieren. Es wird unterschieden zwischen der Welt der Sprache (Wörter, Zeichen), des Denkens (Vorstellungen) und der Sachen (Referenten). Vorstellungen lassen sich in aufsteigender Komplexität nach Begriffen, Konzepten, Denkfiguren und Theorien bezeichnen.
- Konstruktivismus und Neurobiologie liefern Grundlagen zur Erklärung des Lernens, stellen aber keine Lerntheorien dar. Für die Gestaltung von Lernumgebungen bedarf es bereichsspezifischer Theorien.
- Die Conceptual-Change-Forschung liefert eine Vielzahl an Ansätzen zur Erklärung des Lernens naturwissenschaftlicher Inhalte. Eine Vorstellungsveränderung kann verstanden werden als eine Rekonstruktion vorhandener Vorstellungen.

3 Stand der Forschung

In den letzten Jahren ist weltweit eine Vielzahl an Studien über Vorstellungen zum Klimawandel entstanden. Diese Studien befassen sich mit den Vorstellungen verschiedener Populationen und reichen von Schülern verschiedener Schulstufen über Lehramtsstudierende bis hin zu erwachsenen Nicht-Fachleuten (Laien). Neben vielen quantitativen Untersuchungen mit geschlossenen Items sind auch Interviewstudien und einige Interventionsstudien durchgeführt worden. Der thematische Schwerpunkt der Erhebungen lag in der Regel auf Vorstellungen zum Treibhauseffekt.

3.1 Vorstellungen zum Klimawandel

Im Folgenden sind die Ergebnisse einer Reanalyse 24 empirischer Studien über Vorstellungen zum Klimawandel dargestellt. Dabei wurden Studien analysiert, die sich mit den Vorstellungen zum Klimawandel befassen und in referierten englisch- und deutschsprachigen Zeitschriften publiziert sind (siehe Tabelle 3.1).

Studie	Ziel der Erhebung	Stichprobe	Erhebungsverfahren
Boyes & Stanisstreet (1992)	Vorstellungen zum Treibhauseffekt und Ozonloch	Studenten der Biologie im 1. Jahr, n=218 (UK)	Fragebogen mit geschlossenen Items
Boyes & Stanisstreet (1993)	Vorstellungen zum Treibhauseffekt	Schüler, 11-16 Jahre, n=861 (UK)	Fragebogen mit geschlossenen Items
Read et al. (1994)	Vorstellungen zum Klimawandel	Erwachsene, n=177 (USA)	Fragebogen mit geschlossenen Items
Bostrom et al. (1994)	Vorstellungen zum Klimawandel	Schüler, n=22; Erwachsene n=31 (USA)	Fragebogen mit offenen Items
Dove (1996)	Vorstellungen zum Treibhauseffekt und Ozonloch	Lehramtsstudenten, n=60 (UK)	halboffener Fragebogen und Zeichnungen
Boyes & Stanisstreet (1997)	Vorstellungen zum Treibhauseffekt und Ozonloch	Schüler, 13-14 Jahre, n=501 (UK)	Fragebogen mit geschlossenen Items
Rye et al. (1997)	Alltagsvorstellungen zum Klimawandel	Schüler, Klasse 6-8, n=24 (USA)	leitfadengestützte Interviews
Bord et al. (1998)	Vorstellungen zum Klimawandel	Erwachsene, n=1225 (USA)	Fragebogen mit geschlossenen Items
Mason & Santi (1998)	Vorstellungen zum Treibhauseffekt	Schüler, 11-12 Jahre, n= 22 (It)	leitfadengestützte Interviews, Gruppendiskussion
Koulaidis & Christidou (1999)	Vorstellungen zum Treibhauseffekt	Schüler, 11-12 Jahre, n=40 (Gr)	leitfadengestützte Interviews
Parchmann et al. (1999)	Vorstellungen zum Treibhauseffekt und Ozonloch	Schüler, Chemielaboranten, Studenten, n=105 (D)	„Befragungen“, Methode bleibt unklar
Andersson & Wallin (2000)	Vorstellungen zum Treibhauseffekt, den CO ₂ -Emissionen und dem Ozonloch	Schüler, 15-16 Jahre, n=201; Schüler, 18-19 Jahre, n=222 (Se)	Fragebogen mit offenen Items, qualitative Auswertung

Studie	Ziel der Erhebung	Stichprobe	Erhebungsverfahren
Jeffries et al. (2001)	Vorstellungen zum Treibhauseffekt und Ozonloch	Studenten, Biologie im 1. Studienjahr; n=267 (UK)	gleiches Instrument wie Boyes & Stanisstreet (1992)
Pruneau et al. (2001)	Vorstellungen zum Klimawandel	Schüler, 8-9 Jahre, n=24; Schüler, 13-14 Jahre, n=28; Erwachsene, n=27 (CDN)	Interviews
Khalid (2003)	Vorstellungen zu Umweltproblemen	Studenten, Naturwissenschaften im 4. Jahr, n=27 (USA)	Fragebogen mit geschlossenen und offenen Items
Pruneau et al. (2003)	Vorstellungen zum Klimawandel	Schüler, 13-14 Jahre, n=39 (CDN)	halbstrukturierte Interviews
Papadimitriou (2004)	Vorstellungen zum Klimawandel und Ozonloch	Studenten, Lehramt im 1. Studienjahr, n=172 (Gr)	Fragebogen mit offenen Items
Österlind (2005)	Vorstellungsentwicklungen zum Treibhauseffekt und Ozonloch	Schüler, 14 Jahre, n=3 (Se)	halbstrukturierte Interviews, Gruppendiskussionen, Zeichnungen
Ekborg & Areskoug (2006)	Vorstellungen zum Klimawandel	Schüler, 7-13 Jahre, n=60 (Se)	Fragebogen mit geschlossenen Items
Sterman & Booth Swee-ney (2007)	Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf	Studenten, technische Studiengänge, n=212 (USA)	Test mit offenem Antwortformat
Taber & Taylor (2008)	Vorstellungen zum Klimawandel	Schüler, Klasse 6, n=29 (Au)	Fragebogen mit geschlossenen Items, leitfadengestützte Interviews
Reinfried et al. (2008) nach Schuler (2005)	Vorstellungen zum Klimawandel	Schüler, Klasse 12, n=25 (D)	leitfadengestützte Interviews
Shepardson et al. (2009)	Vorstellungen zum Klimawandel	Schüler, Klasse 7, n=91 (USA)	Test mit offenem Antwortformat
Hansen (2010)	Vorstellungen zum Treibhauseffekt	Schüler, 15 Jahre, 1989 (n=348), 1993 (n=354), 2005 (n=440), (N)	Fragebogen mit geschlossenen Items

Tabelle 3.1: In die Reanalyse einbezogene Studien über Vorstellungen zum Klimawandel

Anstelle einer nach Studien geordneten Aufbereitung, werden die in den Studien gefundenen und für diese Arbeit relevanten Vorstellungen in Kategorien geordnet dargestellt. Zu den Ursachen der Erwärmung konnten vier verschiedene Kategorien gefunden werden: ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT, ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH, ERWÄRMUNG DURCH VERSCHMUTZUNG und eine Sammelkategorie mit sonstigen Gründen der Erwärmung. Darüber hinaus wurden auch Vorstellungen zur Herkunft der Treibhausgase erfasst. Die jeweiligen Vorstellungskategorien zeigen unterschiedliche Ausprägungen, die in ihrer Vielfalt im Folgenden dargestellt sind.

3.1.1 Erwärmung durch Treibhauseffekt

Die Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT ist geprägt durch die Vorstellung, dass die von der Sonne kommende Strahlung in der Atmosphäre gefangen wird und dadurch die Erde erwärmt. Für das Einfangen der Strahlung in der Atmosphäre wird entweder die Atmosphäre an sich oder aber eine atmosphärische Schicht verantwortlich gemacht. Diese atmosphärische Schicht wird von den Lernern unterschiedlich konkret als eine Schicht aus CO₂ oder Abgasen

beschrieben. Einzig in einer Studie von Koulaïdis und Christidou (1999) konnte die Vorstellung eines in der Atmosphäre gleichmäßig verteilten CO₂ erhoben werden. Die meisten Lerner, die über die Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT verfügen, stellen sich eine Reflexion der Sonnenstrahlung an der Erde und das anschließende Einfangen dieser reflektierten Strahlen in der Atmosphäre vor. Sie unterscheiden damit nicht zwischen Sonnen- und Wärmestrahlung. Ein wesentlich geringerer Teil der Lerner stellt sich eine Umwandlung von Sonnenstrahlung in Wärmestrahlung an der Erdoberfläche und das anschließende Einfangen eben dieser Wärmestrahlen in der Erdatmosphäre vor. In beiden Varianten ist somit ein „Mehr“ an Strahlung in der Atmosphäre für die Erwärmung verantwortlich. In der ersten Variante wird mehr Sonnenstrahlung und in der zweiten Variante mehr Wärmestrahlung gesammelt.

Verschiedene Studien beschreiben darüber hinaus, dass manche Lerner den Treibhauseffekt mit der globalen Erwärmung gleichsetzen, also nicht zwischen einem natürlichen und einem verstärkten Treibhauseffekt unterscheiden.

Vorstellung	Studie
CO ₂ bildet eine atmosphärische Schicht.	Koulaïdis & Christidou (1999), Andersson & Wallin (2000), Reinfried et al. (2008)
Abgase bildet eine atmosphärische Schicht.	Koulaïdis & Christidou (1999), Andersson & Wallin (2000), Papadimitriou (2004)
CO ₂ ist in der Atmosphäre gleich verteilt.	Koulaïdis & Christidou (1999), Shepardson et al. (2009)
Sonnenstrahlen gelangen zur Erde, werden reflektiert und unter einer atmosphärischen Schicht gefangen.	Boyes & Stanisstreet (1992, 1993), Dove (1996), Bord et al. (1998), Andersson & Wallin (2000), Pruneau et al. (2001), Jeffries et al. (2001), Khalid (2003), Papadimitriou (2004), Reinfried et al. (2008), Shepardson et al. (2009)
Sonnenstrahlen gelangen in die Atmosphäre und werden am Erdboden in Wärme umgewandelt. Die Wärme wird in der Atmosphäre gefangen.	Bostrom et al. (1994), Dove (1996), Koulaïdis & Christidou (1999), Andersson & Wallin (2000)

Tabelle 3.2: Lernervorstellung: Erwärmung durch Treibhauseffekt

3.1.2 Erwärmung durch Ozonloch

Die Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH ist eine bei Lernern sehr häufig anzutreffende Vorstellung, die in verschiedenen Ausdifferenzierungen genutzt und von allen Autoren beschrieben wird. Die Vorstellung beruht auf einer Erwärmung der Erde durch eine vermehrte Einstrahlung von Sonnenstrahlen. Wie es zu dieser vermehrten Einstrahlung kommt, wird unterschiedlich konkret beschrieben: Zum Teil wird nur der Zusammenhang zwischen „weniger Ozon“ und einer „Erwärmung“ genannt, ohne dabei weitere Mechanismen zu beschreiben. Andere Lerner führen die Erwärmung konkretisiert auf Löcher in der Ozonschicht zurück. Diese Löcher werden von einigen Lernern darüber hinaus auf das CO₂ zurückgeführt, dem aggressive Eigenschaften zugeschrieben werden.

In einer weiteren Variante dieser Denkfigur werden die durch die Ozonlöcher dringenden Sonnenstrahlen unterhalb der Ozonschicht gefangen. Diese Vorstellung bildet damit ein synthetisches Modell aus den Denkfiguren ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT und ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH.

Einige Autoren konnten explizit eine Vorstellung finden, der zufolge von Lernern die verschiedenen Strahlungsspektren nicht unterschieden werden. Boyes und Stanisstreet (1997) beschreiben eine Vorstellung, nach der die globale Erwärmung auf UV-Strahlung zurückgeführt wird, da diese heißer ist als normal Wärmestrahlung.

Vorstellung	Studie
Es wird wärmer durch weniger Ozon.	Boyes & Stanisstreet (1993), Bostrom et al. (1994), Read et al. (1994), Bord et al. (1998), Rye et al. (1997), Boyes & Stanisstreet (1997), Mason & Santi (1998), Andersson & Wallin (2000), Khalid (2003), Schuler (2005), Ekborg & Areskoug (2006), Reinfried et al. (2008), Hansen (2009), Shepardson et al. (2009)
Treibhausgase fressen Löcher in die Ozon-schicht.	Rye et al. (1997), Schuler (2005), Ekborg & Areskoug (2006), Reinfried et al. (2008)
Sonnenstrahlen kommen durch Ozonlöcher zur Erde hindurch und erwärmen sie.	Boyes & Stanisstreet (1992, 1993), Dove (1996), Boyes & Stanisstreet (1997), Rye et al. (1997), Koulaidis & Christidou (1999), Pruneau et al. (2001), Jeffries et al. (2001), Papadimitriou (2004), Schuler (2005), Österlind (2005), Taber & Taylor (2009)
Sonnenstrahlen kommen durch Löcher in der Ozonschicht zur Erde hindurch, können die Atmosphäre aber nicht verlassen.	Dove (1996), Boyes & Stanisstreet (1997), Koulaidis & Christidou (1999), Papadimitriou (2004), Schuler (2005), Reinfried et al. (2008)
Mehr UV-Strahlen gelangen durch die Ozon-löcher. UV-Strahlen sind heißer als Wärme-strahlen.	Boyes & Stanisstreet (1997)
UV-, Licht- und Wärmestrahlung sind gleich.	Koulaidis & Christidou (1999), Österlind (2005)

Tabelle 3.3: Lernervorstellung: Erwärmung durch Ozonloch

3.1.3 Erwärmung durch Verschmutzung

Die über die Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH VERSCHMUTZUNG verfügenden Lerner äußern keine Veränderungen der Ein- oder Abstrahlung von Sonnenenergie, sondern den Zusammenhang „mehr Erwärmung“ durch „mehr Verschmutzung“. Die Verschmutzung wird dabei von den Lernern unterschiedlich beschrieben und reicht von einer allgemeinen Luftverschmutzung über eine Umweltverschmutzung durch mehr Müll, verschmutztes Wasser oder Abgase bis hin zu sehr detaillierten Vorstellungen, wie Saurer Regen, Radioaktivität oder bleihaltiges Benzin. Gemein ist den Vorstellungen, dass sie alle verschiedene Umweltprobleme beschreiben und diese auf den Klimawandel beziehen.

Vorstellung	Studie
Erwärmung durch Luftverschmutzung	Bostrom et al. (1994), Read et al. (1994), Boyes & Stanisstreet (1997), Mason & Santi (1998), Koulaidis & Christidou (1999), Andersson & Wallin (2000), Papadimitriou (2004), Schuler (2005), Reinfried et al. (2008), Shepardson et al. (2009)
Umweltverschmutzung führt zur Erwärmung	Boyes & Stanisstreet (1993), Papadimitriou (2004), Taber & Taylor (2009)
Erwärmung durch Saurer Regen	Boyes & Stanisstreet (1992, 1993), Jeffries et al. (2001), Pruneau et al. (2001), Papadimitriou (2004)
Radioaktivität und Atommüll führen zur Erwärmung	Boyes & Stanisstreet (1992, 1993), Bostrom et al. (1994), Read et al. (1994), Bord et al. (1998), Jeffries et al. (2001), Papadimitriou (2004), Taber & Taylor (2009)
Erwärmung durch bleihaltiges Benzin	Boyes & Stanisstreet (1992, 1993), Jeffries et al. (2001), Ekborg & Areskoug (2006), Taber & Taylor (2009)

Tabelle 3.4: Lernervorstellung: Erwärmung durch Verschmutzung

3.1.4 Erwärmung durch sonstige Ursachen

Neben den oben beschriebenen Vorstellungen zur globalen Erwärmung finden sich einige Vorstellungen, die sich nicht in übergeordneten Kategorien zusammenfassen lassen.

Die Vorstellungen *Wärme aus Vulkanausbrüchen*, *Wärme aus Fabriken und Städten erwärmt die Erde* und *Erwärmung durch wärmere Sonne* lassen sich alle auf das gleiche Prinzip zurückführen: *Es wird wärmer, weil mehr Wärme in die Atmosphäre gelangt*. Dabei kommt die zusätzliche Wärme entweder von oben, weil die Sonne stärker scheint oder aber sie kommt von unten aus Vulkanen oder Städten bzw. der Industrie. Auf einem ähnlichen Prinzip beruht auch die Vorstellung des Entweichens von kalter Luft durch Ozonlöcher. Diese Vorstellung stellt den Gegensatz zur Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH dar: Hier kommt nicht mehr Wärme durch die Sonnenstrahlung in die Atmosphäre, sondern die kalte Luft entweicht in die oberen Atmosphärenschichten und lässt so die warme Luft in der Atmosphäre zurück.

Auffallend ist, dass besonders in Studien, die auf ein offenes Antwortformat zurückgreifen, Lerner relativ häufig äußern, keine Vorstellung von den Ursachen der globalen Erwärmung zu haben. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der Klimawandel ein sehr abstraktes, nicht alltagsweltlich zu erfassendes Phänomen ist. Im Gegensatz zu Studien mit einem geschlossenen Antwortformat, werden die Lerner hier nicht zu einer Erklärung gedrängt.

Vorstellung	Studie
Wärme aus Vulkanausbrüchen	Mason & Santi (1998)
Wärme aus Fabriken und Städten erwärmt die Erde.	Andersson & Wallin (2000), Pruneau et al. (2001), Papadimitriou (2004)
Erwärmung durch wärmere Sonne	Mason & Santi (1998), Pruneau et al. (2001), Shepardson et al. (2009)
Löcher in der Ozonschicht lassen kalte Luft aus der Atmosphäre entweichen.	Boyes & Stanisstreet (1997)
Keine Vorstellung	Andersson & Wallin (2000), Pruneau et al. (2001), Pruneau et al. (2003), Papadimitriou (2004), Ho (2009)

Tabelle 3.5: Sonstige Vorstellungen zur Erwärmung

3.1.5 Herkunft des Kohlenstoffdioxids

In einigen Studien wurden über die Vorstellungen zu den zur globalen Erwärmung führenden Vorgängen hinaus auch Vorstellungen zur Herkunft des Treibhausgases CO₂ erhoben. Dabei zeigte sich, dass ein Großteil der Untersuchten die Verbrennung fossiler Energieträger als Quelle des atmosphärischen CO₂ beschrieben, aber nur wenige auch die Atmung als eine CO₂-Quelle anführten. Dies ist eventuell auf die Fragestellungen der Untersuchungen zurückzuführen, die auf die Zusammenhänge zwischen CO₂ und Klimawandel zielten, sodass natürliche Ursachen von Kohlenstoffflüssen wie Atmung nicht erfasst wurden. Koulaidis und Christidou (1999) konnten darüber hinaus auch feststellen, dass sich viele der Befragten CO₂ als unnatürliches Gas vorstellen. Damit wird deutlich, dass einige Lerner sich CO₂ als ein ausschließlich vom Menschen freigesetztes Gas vorstellen.

In einer Interventionsstudie wurde die Modellkompetenz von Studierenden anhand von Kohlenstoffflüssen erfasst. Dabei wurde festgestellt, dass sich eine Vielzahl an Studierenden vorstellt, dass die atmosphärische CO₂-Konzentration auch bei einem Ungleichgewicht in den Kohlenstoffflüssen konstant bleiben kann.

Vorstellung	Studie
CO ₂ kommt von der Atmung und der Verbrennung fossiler Energieträger	Koulaidis & Christidou (1999), Shepardson et al. (2009)
CO ₂ ist ein unnatürliches Gas	Koulaidis & Christidou (1999)
CO ₂ kommt von der Verbrennung fossiler Energieträger	Boyes & Stanisstreet (1992), Read et al. (1994), Bord et al. (1998), Jeffries et al. (2001), Papadimitriou (2004), Schuler (2005)
Konstante CO ₂ -Konzentration trotz verstärkter CO ₂ -Emission und verringerter Bindung.	Booth Sweeney & Sterman (2007)

Tabelle 3.6: Vorstellungen zur CO₂-Freisetzung

3.1.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigen sich in der Reanalyse empirischer Studien drei prominente Denkfiguren (ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT, ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH und ERWÄRMUNG DURCH VERSCHMUTZUNG) sowie einige weitere Vorstellungen zum Klimawandel. Die Vorstellungen lassen sich dabei alters- und nationenübergreifend finden.

Einige Vorstellungen innerhalb der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH VERSCHMUTZUNG, wie Erwärmung durch Radioaktivität, Saurer Regen und bleihaltiges Benzin lassen sich ausschließlich in quantitativen Erhebungen mit geschlossenem Antwortformat finden. In Studien, die verschiedene Altersgruppen untersuchten, lässt sich ein Trend hin zu fachlich angemessenen Vorstellungen erkennen. So tritt dort die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT häufiger bei älteren als bei jüngeren Lernern auf (vgl. Tabelle 3.7):

Pruneau (2001), die auch die Vorstellungen von Erwachsenen untersuchte konnte darüber hinaus feststellen, dass die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT bei Erwachsenen weniger häufig auftritt, erklärt dies jedoch nicht weiter. In der Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT wird nur sehr selten zwischen Sonnen- und Wärmestrahlung unterschieden, wie u. a. Andersson und Wallin (2000) zeigen konnten. Verschiedene Autoren führen dies darauf zurück, dass eine Absorption von Sonnenstrahlung und Emission von Wärmestrahlung schwieriger zu verstehen ist als eine Reflexion von Strahlung. Die Häufigkeit der Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH nimmt bei Lernern mit zunehmendem Alter ab, bleibt aber weiterhin auf einem relativ hohen Niveau. Boyes und Stanisstreet (1992, 1997) und auch Koulaidis und Christidou (1999) konnten zeigen, dass Lerner häufig auch über parallele Vorstellungen verfügen.

keine Vorstellung	Erwärmung durch Verschmutzung	Erwärmung durch Ozonloch	Erwärmung durch Treibhauseffekt		
			Reflexion	Umwandlung	
18-19 J.: 14 %	15-16 J.: 13 % 18-19 J.: 12 %	15-16 J.: 12 % 18-19 J.: 10 %	15-16 J.: 13 % 18-19 J.: 24 %	15-16 J.: 1 % 18-19 J.: 5 %	Andersson & Wallin (2000)
-	11-12 J.: 59 %	11-12 J.: 86 %	11-12 J.: 36 %	-	Boyes & Stanisstreet (1993)
-	15-16 J.: 48 %	15-16 J.: 70 %	15-16 J.: 70 %	-	
8-9 J.: 91 %	8-9 J.: 0 %	8-9 J.: 0 %	8-9 J.: 0 %	-	Pruneau et al. (2001)
13-14 J.: 57 %	13-14 J.: 4 %	13-14 J.: 14 %	13-14 J.: 21,4 %	-	
18+ J.: 11 %	18+ J.: 0 %	18+ J.: 22 %	18+ J.: 18,5 %	-	

Tabelle 3.7: Vorstellungshäufigkeiten in verschiedenen Altersklassen

3.2 Vorstellungsentwicklungen zum Klimawandel

Einige Studien gehen über die Erhebung des Wissensstands zu einem bestimmten Zeitpunkt hinaus und untersuchen eine Vorstellungsveränderung durch Lernangebote. Eine Vielzahl auch dieser Studien belegt eine Persistenz der Verwechslung zwischen Ozonloch und Treibhauseffekt:

Rye et al. (1997) untersuchten die Vorstellungsentwicklung in den Klassen 6 bis 8 in den USA anhand von Interviews nach einer sechs Unterrichtsstunden umfassenden Einheit über die globale Erwärmung und ihre gesellschaftlichen Auswirkungen. Die Interviews zeigten dabei, dass drei Viertel der Lerner (n=24) auch nach der Unterrichtseinheit Ozonlöcher anstelle des Treibhauseffekts für die Ursache der globalen Erwärmung hielten.

Mason und Santi (1998) untersuchten in Italien die Vorstellungsentwicklung von Fünftklässlern (10 bis 11 Jahre, n=22) zum Treibhauseffekt anhand einer über mehrere Monate stattfindenden Unterrichtseinheit zur Umweltbildung mit Unterrichtsanteilen zum Klimawandel. Die Vorstellungen wurden in Interviews vor und nach der Unterrichtseinheit erhoben. Kern des Unterrichts zum Klimawandel waren Kleingruppen- und Klassendiskussionen, die auf eine Reflexion der initial geäußerten Alltagsvorstellungen zielte. Die Diskussionen wurden ebenfalls ausgewertet. Im Vortest zeigten sich häufig fachlich nicht angemessene Vorstellungen von den Ursachen der globalen Erwärmung, wie ERWÄRMUNG DURCH VERSCHMUTZUNG, Erwärmung durch Vulkane, eine heißer werdende Sonne oder ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH. In den Diskussionen konnten die Lerner in heterogenen Gruppen ihre eigenen Vorstellungen reflektieren. Im Nachtest wurde deutlich, dass 12 der 22 Lerner in der Lage waren den Treibhauseffekt als Ursache der Erwärmung zu nennen. Doch auch ein Großteil dieser Lerner konnte ihn nicht weiter ausführen, da sie über keine Vorstellung von einem Treibhaus verfügten (Mason & Santi 1998, S. 78).

Pruneau et al. (2003) haben in einer Studie die Vorstellungsentwicklungen von 13- bis 14-jährigen Lernern (n=39) untersucht. Die Lerner haben dabei über ein ganzes Schuljahr einmal pro Woche 60 Minuten lang an einem handlungsorientierten Unterricht zum Klimawandel teilgenommen. Dabei haben sie sich fachlich mit Fragen des Treibhauseffekts auseinandergesetzt, aber auch Klimaveränderungen in ihrer Umgebung dokumentiert, verschiedene Aspekte des Klimawandels in Rollenspielen diskutiert und eigene Medien erstellt. Während vor der Unterrichtseinheit 37 Lerner äußerten, dass sie keine Vorstellungen von den Ursachen der globalen Erwärmung hätten, konnten nach dem Schuljahr elf Lerner den Treibhauseffekt als Ursache benennen. 27 Lerner führten die Ursache auf eine Luftverschmutzung und sechs Lerner auf eine allgemeine Verschmutzung zurück, wobei parallele Nennungen auftraten. Die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH wurde nach dem Unterricht von einem Lerner konzeptualisiert. Bei einem knappen Drittel der Lerner konnten somit die wissenschaftsorientierte Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT erzielt werden, während die übrigen auf Verschmutzungskonzepte zur Erklärung der globalen Erwärmung rekurrierten. Ob in der Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT von den Lernern zwischen Wärme- und Sonnenstrahlung unterschieden wird, wurde nicht erhoben.

Österlind (2005) hat in einer Fallstudie drei 14-jährige Lerner weiterführender Schulen beim Lernen zum Treibhauseffekt und zur Ausdünnung des atmosphärischen Ozons begleitet. Sie fand dabei heraus, dass es den Lernern auch nach einem mehrwöchigen Unterricht schwer fiel, die beiden ökologischen Phänomene auf konzeptueller Ebene zu unterscheiden. Es konnten u. a. mehrdeutige Termini, die verschiedene Konzepte bezeichneten, nicht eindeutig zugeordnet werden und wurden von den Lernern fortwährend vermischt. So konnte z. B. Strahlung nicht in Wärme-, Licht und UV-Strahlung differenziert werden. Auch mehrfache Erklärungen durch die begleitenden Lehrkräfte und Verweise auf entsprechende Abschnitte in Schulbuchtexten führten nicht zu eindeutigeren Zuordnungen. Österlind folgert daraus, dass die Lerner keine phänomenunabhängigen Vorstellungen zu den abstrakten atmosphärischen Vorgängen haben, sondern ihre Vorstellungen immer im Kontext konzeptualisieren.

Ekborg und Areskoug (2006) haben eine über zweieinhalb Jahre reichende Langzeitstudie mit Lehramtsstudierenden (n=47) für die Grundschule durchgeführt, um die langfristigen Vorstellungsentwicklungen in der Umweltbildung zu erheben. Der Klimawandel war dabei eines der zu vermittelnden Themen. Die Vorstellungen der Studierenden wurden nach einem zehnwöchigen Kurs sowie nach einem weiteren, 20-wöchigen Kurs erhoben. Die Kurse vermittelten Wissen zu ökologischen, meteorologischen, astronomischen und umweltrelevanten Themen. Die Kurse zielten explizit auf die Differenzierung von Treibhauseffekt und Ozonloch sowie die fachlich angemessene Beschreibung der beiden Phänomene. Die Tests orientierten sich dabei an den von Boyes und Stanisstreet (1992) erarbeiteten Items. Im Laufe der Kurse konnte die Konfusion zwischen Ozonloch und Treibhauseffekt von 75 % (Pretest) auf 34 % (nach 20 Wochen Kurs) gesenkt werden. 55 % der Studierenden waren nach den Einheiten in der Lage, den Treibhauseffekt wissenschaftsorientiert zu beschreiben. Keiner der Studierenden hingegen erreichte die fachliche Vorstellung eines durch den verstärkten Treibhauseffekt verschobenen Strahlungsgleichgewichts, was ebenfalls Ziel der Vermittlung war.

Während die meisten Studien die Vorstellungen und Konzeptentwicklungen zum Treibhauseffekt verfolgten, haben Serman und Booth-Sweeney (2007) am Massachusetts Institute of Technology (MIT) Studierende (n=212) aus überwiegend technischen Studiengängen ihre Vorstellungen anhand von Materialien zur atmosphärischen CO₂-Konzentration explizieren lassen. Dabei konnten sie feststellen, dass die Studierenden die Zu- und Abflüsse von CO₂ in die Atmosphäre nicht adäquat beschreiben konnten. Ihnen wurden Materialien zum Bearbeiten gegeben, aus denen hervorging, dass die CO₂-Emissionen künftig steigen werden und die Fixierung von CO₂ eher abnehmen wird. Trotzdem prognostizierten 62 % der Studierenden, dass sich die CO₂-Emissionen stabilisieren würden. Darüber hinaus beschrieben 84 % der Studierenden die Kohlenstoffkonzentration in der Atmosphäre als konstant, obwohl Zu- und Abflüsse als ungleich beschrieben wurden. 75 % der Studierenden waren nicht in der Lage die Äquivalenz von Zu- und Abflüssen als Voraussetzung für eine konstante atmosphärische CO₂-Konzentration zu beschreiben. Serman und Booth-Sweeney führen diese fachlich und logisch nicht angemessenen Vorstellungen auf ein mangelndes Verstehen der Logik hinter Speicher-Fluss-Modellen zurück.

3.3 Zusammenfassung

- Laien äußern verschiedene Vorstellungen von den zur globalen Erwärmung führenden Vorgängen, die sich in einer Vielzahl an Studien über verschiedene Nationalitäten und Altersgruppen hinweg bestätigen lassen: ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH, ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT und ERWÄRMUNG DURCH VERSCHMUTZUNG.
- Die Vorstellungen beschreiben verschiedene Mechanismen, die zu einem *Mehr* an Wärme in der Atmosphäre und damit einer Erwärmung führen. Einige Laien äußern darüber hinaus weitere Vorstellungen (*Erwärmung durch Vulkanausbrüche, Erwärmung durch Wärme aus Fabriken und Städten, Erwärmung durch wärmere Sonne*), die ebenfalls eine Zunahme der Wärme in der Atmosphäre beschreiben.
- Die verschiedenen Vorstellungen zur globalen Erwärmung unterscheiden sich in der Beschreibung der beteiligten Strukturen der Atmosphäre (*Treibhausgasschicht, Ozonschicht etc.*), der elektromagnetischen Strahlung (*Licht-, Wärme-, UV-Strahlung*) und der unterschiedlichen konkreten Beschreibung der Ursachen (*CO₂, Abgase, Treibhausgase etc.*).
- Nur sehr wenig Lerner verfügen über die fachlich angemessene Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT mit einer Unterscheidung zwischen Licht- und Wärmestrahlung.
- Studien, in denen unterschiedliche Altersgruppen untersucht wurden zeigen bei Lernern eine Zunahme fachlich angemessener Vorstellungen mit zunehmendem Alter. Dieser

Trend lässt sich bei erwachsenen Laien nicht bestätigen.

- Verschiedene ökologische Probleme werden häufig in einem allumfassenden Umweltverschmutzungskonzept zusammengeführt: Dieser Vorstellung zufolge kann ein umweltfreundliches Verhalten in einem Bereich (z. B. Energiesparen, Mülltrennen, Bleifreies Benzin) verschiedenen Umweltproblemen (z. B. Klimawandel, Ozonloch, Luftverschmutzung) entgegenwirken.
- Es lassen sich verschiedene Vorstellungen zur Herkunft des atmosphärischen CO₂ finden: Ein Großteil der Untersuchten beschreibt die Verbrennung fossiler Energieträger als CO₂-Quelle. Nur wenige führen auch die Atmung als CO₂-Quelle an. Z. T. wird CO₂ auch als unnatürlicher Bestandteil der Atmosphäre konzeptualisiert.
- Bei Studierenden konnte ein fachlich nicht angemessenes Modellverständnis in der Anwendung des Speicher-Fluss-Schemas auf die CO₂-Emissionen gefunden werden, aus dem deutlich wird, dass sie nicht zwischen Bestandsgrößen und Flussraten unterscheiden können.
- Die Interventionsstudien machen deutlich, dass ein fachlich angemessenes Verstehen der Grundlagen der globalen Erwärmung im schulischen Kontext möglich ist. So konnte in nahezu allen Studien ein wissenschaftsorientiertes Verstehen des Treibhauseffekts gefördert werden. Dennoch äußert in allen Studien noch eine Vielzahl der Lerner auch nach den Interventionen noch fachlich nicht adäquate Vorstellungen von der globalen Erwärmung.

4 Fragestellung der Untersuchung

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es herauszufinden, wie sich zentrale Aspekte des Klimawandels erfolgreich vermitteln lassen. Dafür werden Lernangebote entwickelt und auf ihre Wirksamkeit hin evaluiert. Dabei soll nicht nur bestimmt werden, ob die Lernangebote lernwirksam sind, sondern auch warum sie es sind – oder auch nicht sind. Die Leitfrage dieser Untersuchung lässt sich somit wie folgt formulieren:

Wie lassen sich zentrale Aspekte des Klimawandels erfolgreich vermitteln?

Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion hat sich in den letzten Jahren als adäquater Forschungsrahmen zur theoriegeleiteten und evidenzbasierten Gestaltung von Lernarrangements auf Grundlage der Vorstellungen von Lernern und Wissenschaftlern bewährt (Kattmann 2007). Aus dem in Kapitel 5 näher erläuterten Untersuchungsdesign lässt sich die Leitfrage dieser Untersuchung in Teilfragen untergliedern, die in verschiedenen Untersuchungsschritten beantwortet werden:

- Über welche Vorstellungen verfügen Lerner zu zentralen Aspekten des Klimawandels? Welche erfahrungsbasierten Grundlagen haben die Vorstellungen?
- Über welche Vorstellungen verfügen Wissenschaftler zu zentralen Aspekten des Klimawandels? Welche erfahrungsbasierten Grundlagen haben die Vorstellungen?
- Wo zeigen sich Gemeinsamkeiten, Verschiedenheiten und Eigenheiten zwischen den Vorstellungen der Wissenschaftler und der Lerner? Welche fachdidaktischen Entscheidungen lassen sich daraus für die Strukturierung von Vermittlungssituationen und die Entwicklung von Lernangeboten ableiten?

Die Beantwortung dieser Teilfragen dient der evidenzbasierten Entwicklung von didaktisch rekonstruierten Lernangeboten. Diese Lernangebote sollen unter folgenden Fragestellungen evaluiert werden:

- Welche Vorstellungsentwicklungen zeigen Lerner, wenn sie mit didaktisch rekonstruierten Lernangeboten zu zentralen Aspekten des Klimawandels konfrontiert werden?
- Welche didaktisch rekonstruierten Lernangebote fördern oder behindern ein Lernen zu zentralen Aspekten des Klimawandels?

Die jeweiligen Fragestellungen der einzelnen Untersuchungsschritte werden zu Beginn der entsprechenden Kapitel weiter differenziert.

5 Didaktische Rekonstruktion

Die vorliegende Studie zielt auf die Gestaltung von wirksamen Lernangeboten zur Vermittlung des Klimawandels ab. Die Analyse des Stands der Forschung (Kapitel 3) zeigt, dass es bereits einige Studien zur Wirksamkeit von Vermittlungsangeboten zum Klimawandel gibt. Darüber hinaus wird jedoch auch deutlich, dass die dort untersuchten Lernangebote unterschiedlich erfolgreich in Bezug auf die Veränderung der Lernervorstellungen sind. Der theoretische Rahmen dieser Untersuchung (Kapitel 2) legt nahe, dass für eine erfolgreiche Veränderung von Vorstellungen zum Klimawandel insbesondere die persönliche Konstruktion von Vorstellungen eine bedeutende Rolle spielt. Ziel der Gestaltung von effektiven Lernangeboten sollte es deshalb sein, die Lernervorstellungen als Ausgangspunkt für ein erfolgreiches Lernen zum Klimawandel zu nehmen. Dementsprechend ist der Untersuchungsplan so zu gestalten, dass er eine evidenzbasierte und theoriegeleitete Entwicklung von Lernangeboten ermöglicht.

Zur Evaluation der Lernwirksamkeit der entwickelten Lernangebote muss das Untersuchungsdesign darüber hinaus ihre prozessorientierte, empirische Überprüfung zulassen. Hierfür bietet das Modell der Didaktischen Rekonstruktion einen erprobten Forschungsrahmen (Duit et al. 2005; Kattmann 2007; Kattmann et al. 1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion ist in der internationalen Lehr-Lernforschung in den Bereich des »design based research« einzuordnen. Es verfolgt das Ziel, Mikrotheorien zum Lernen bestimmter Unterrichtsinhalte durch die Entwicklung und Evaluation von Vermittlungsprozessen zu erarbeiten (Cobb et al. 2003; Kelly 2004; Lamberg & Middleton 2009). In diesem Abschnitt soll das Untersuchungsdesign dieser Untersuchung sowie das darauf aufbauende methodische Vorgehen beschrieben werden.

Grundlagen der Didaktischen Rekonstruktion

Diese Untersuchung fokussiert auf die Entwicklung von domänenspezifischen Mikrotheorien zum Lernen in einem bestimmten Feld, nämlich den naturwissenschaftlichen Grundlagen zum Kohlenstoffkreislauf und den Strahlungsflüssen im Rahmen des Klimawandels. Diese Mikrotheorien sollen in den Vorstellungen und Vorstellungsentwicklungen von Lernern begründet und in Vermittlungsexperimenten auf ihre Praxiswirksamkeit hin getestet werden.

Forschungsmethodologisch nimmt die dieser Untersuchung zugrunde liegende Didaktische Rekonstruktion eine Mittelstellung zwischen einem naturwissenschaftlichen und einem ingenieurmäßigen Vorgehen (vgl. H. A. Simon 1969) ein: Es sollen nicht nur deskriptive und explanative Aussagen getroffen, also Entdeckungswissen und Erklärungswissen über die Vorstellungen und das Lernen zum Klimawandel erarbeitet werden. Vielmehr sollen auch präskriptive Erkenntnisse über das Lernen zum Klimawandel und damit Veränderungswissen erarbeitet werden. Kurz: Es geht nicht um eine einfache Weiterentwicklung und Verallgemeinerung von Beispielen guter Praxis („best practice“), also funktionierenden Unterrichtskonzepten. Im Kern dieser Untersuchung stehen nicht nur die Fragen „Was wirkt?“ oder „Wie wirkt es besser?“, sondern „Warum wirkt es?“. Zur Beantwortung dieser Fragen ist das Modell der Didaktischen Rekonstruktion ein angemessener und erprobter Forschungsrahmen.

Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion wurde als theoretischer und methodischer Rahmen für die Planung, Durchführung und Evaluation fachdidaktischer Forschungsarbeiten entwickelt und zielt auf eine Optimierung der Vermittlung bestimmter fachlicher Inhalte ab (Kattmann 2007, S. 93). Um dies zu erreichen, werden Vorstellungen von Wissenschaftlern und Lernern miteinander in Beziehung gesetzt, um Unterschiede, Gemeinsamkeiten und Berührungspunkte zwischen den Perspektiven identifizieren zu können. Grundlegend ist hierbei ein Verständnis, wonach Vorstellungen von Wissenschaftlern und Lernern als gleichwertig betrachtet werden.

Dies bedeutet, dass die in wissenschaftlichen Texten enthaltenen Sichtweisen sowie die Lernervorstellungen als „persönliche Konstrukte der jeweiligen Personen oder Personengruppen“ (Kattmann & Gropengießer 1998, S. 3) betrachtet werden. Die Vorstellungen der Lerner werden somit nicht als Fehlvorstellungen abgetan, sondern als Ausgangspunkt für die Gestaltung von Lernprozessen betrachtet (Duit & Treagust 2003). Damit verbunden ist die Annahme, dass die individuellen Vorstellungen für die Lerner die gleiche Bedeutung und Berechtigung besitzen wie die fachlichen Vorstellungen für Fachwissenschaftler. Die Vorstellungen der Wissenschaftler unterliegen zwar meist einer breiteren, in einem methodisch kontrollierten Prozess erworbenen Erfahrungsbasis. Letztlich sind sie jedoch persönliche Konstrukte, die in einer Wissenschaftlergemeinschaft als gültig aufgefasst und geteilt werden. Sie sind in lebensweltliche, individuelle, gesellschaftliche, wissenschaftshistorische, wissenschaftstheoretische, erkenntnistheoretische und ethische Zusammenhänge eingebettet (Kattmann 2007, S. 96), die unterschiedlichen, zu analysierenden Prägungen unterliegen.

Das Modell beinhaltet drei Untersuchungsaufgaben: Die Analyse der Wissenschaftlervorstellungen, die Analyse der Lernervorstellungen und die Gegenüberstellung der Ergebnisse der vorangegangenen Vorstellungsanalysen in der Didaktischen Strukturierung. Die Didaktische Strukturierung in dieser Untersuchung strebt dabei die Formulierung von Leitlinien zur Vermittlung des Klimawandels und die Entwicklung von Lernumgebungen an. Die Analyse der Wissenschaftler- und Lernervorstellungen finden nicht als voneinander unabhängige Untersuchungsaufgaben statt. Die Erarbeitung unterschiedlicher Blickrichtungen auf ein Thema hilft, die Perspektiven aneinander auszuschärfen. Die Analyse der Vorstellungen erfolgt somit in einem rekursiven Verfahren. Die Didaktische Strukturierung erfolgt schließlich auf der Grundlage und in Wechselbeziehungen zur Erhebung der Lerner- und Wissenschaftlerperspektiven. Die Didaktische Strukturierung dient dem Ziel, Unterrichtsgegenstände zu entwickeln, die ein effektives Lehren und Lernen fachlicher Inhalte ermöglichen.

Die Untersuchungsfragen des Modells der Didaktischen Rekonstruktion und deren Erarbeitung in dieser Untersuchung werden im Folgenden kurz beschrieben. Ausführliche Darstellungen der jeweiligen Forschungsfragen und der methodischen Vorgehensweisen finden sich in den jeweiligen Kapiteln. Die Operationalisierung des Forschungsmodells für diese Studie ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

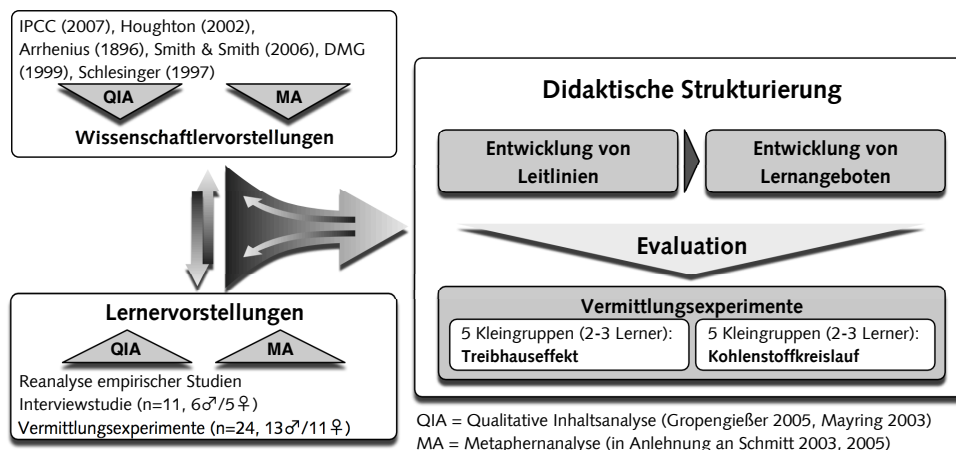


Abbildung 5.1: Didaktische Rekonstruktion des Klimawandels

Die Analyse der Wissenschaftlervorstellungen

Die Analyse der Wissenschaftlervorstellungen zielt ab auf eine kritische und methodisch kontrollierte, systematische Untersuchung fachwissenschaftlicher Aussagen und Theorien sowie der

von Wissenschaftlern zur Kommunikation genutzten Termini aus fachdidaktischer Sicht. Die wissenschaftlichen Aussagen zum Klimawandel werden somit nicht unreflektiert als Maßstab und Ziel in den Vermittlungsprozess übernommen, sondern mit Blick auf die Vermittlungsabsicht kritisch analysiert. Als Quellen werden Originalveröffentlichungen und Lehrbuchtexte genutzt. Das methodische Vorgehen orientiert sich an der qualitativen Inhaltsanalyse (Mayring 2003), die für fachdidaktische Zwecke adaptiert wurde (Gropengießer 2005). Ergänzt wird die Untersuchung durch eine Metaphernanalyse in Anlehnung an Schmitt (2003).

Für die Analyse werden den Fragestellungen dieser Studie folgend verschiedene fachliche Quellen zum Kohlenstoffkreislauf und den Strahlungsflüssen im Rahmen des Klimawandels herangezogen. Die Auswahl der Quellen ist mit Experten des jeweiligen Fachgebiets abgestimmt und in Kapitel 6 weiter ausgeführt. Es wurden folgende fachliche Quellen zum Klimawandel analysiert:

Der Kohlenstoffkreislauf im Rahmen des Klimawandels

- Houghton, J. (2002). *Physics of the Atmospheres*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Genf: Cambridge University Press.
- Schlesinger, W. H. (1997). *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*: Academic Press.
- Smith, T. & Smith, R. (2006). *Elements of Ecology*. San Francisco: Pearson.

Die Strahlungsflüsse im Rahmen des Klimawandels

- Arrhenius, S. (1896). On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(5), 237-276.
- Fischer, H., Graßl, H., Quenzel, H. & Köpke, P. (1999). Die Basis des anthropogenen Treibhauseffektes: Veränderte Strahlungsflüsse in der Atmosphäre: Deutsche Meteorologische Gesellschaft (DMG).
- Houghton, J. (2002). *Physics of the Atmospheres*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Genf: Cambridge University Press.

Die Analyse der Lernervorstellungen

Mit der Analyse der Lernervorstellungen werden die Lernvoraussetzungen für eine Vermittlungssituation ermittelt. Dabei können abhängig von der konkreten Fragestellung Vorstellungen, Motivationen oder auch Interessen von Lernern analysiert werden. In der vorliegenden Studie wurden mit den Vorstellungen kognitive Komponenten der mentalen Strukturen analysiert. Dabei steht nicht die Quantifizierung im Fokus dieser Arbeit, sondern eine Analyse der individuellen Denkstrukturen.

Für die Erfassung der Vorstellungen werden insgesamt drei verschiedene methodische Zugänge gewählt. Dies ermöglicht eine möglichst große Breite an Vorstellungen, wie auch eine interne Validierung der Daten im Rahmen einer Triangulation:

- **Reanalyse empirischer Befunde:** Befunde von empirischen Primärerhebungen zu den Lernervorstellungen vom Klimawandel werden zusammenfassend analysiert und bilden so eine Grundlage für weitere Erhebungen. Die Ergebnisse der Reanalyse (Kapitel 3) werden für eine externe Validierung der in dieser Studie erhobenen Vorstellungen herangezogen.
- **Interviewstudie:** Im Rahmen einer Interviewstudie wurden die Vorstellungen von elf 18-jährigen Lernern (sechs männlich, fünf weiblich) aus gymnasialen Oberstufen (Klasse 12) der Region Hannover zum Klimawandel erhoben. Die Auswahl der Lerner, wie auch das Vorgehen und die Analyse der Interviewstudie sind in Kapitel 7.2 ausführlich dargestellt.
- **Interviewphasen in Vermittlungsexperimenten:** Die in dieser Studie durchgeführten Vermittlungsexperimente werden genutzt, um Lernervorstellungen zum Klimawandel zu erfassen und gleichzeitig die didaktisch rekonstruierten Lernangebote zu evaluieren. Wie in Kapitel 7 „Lernervorstellungen zum Klimawandel“ dargestellt, werden die Anfangsphasen

der Vermittlungsexperimente für die Validierung und Ausschärfung der in der Interviewstudie erhobenen Alltagsvorstellungen herangezogen. In den Vermittlungsexperimenten wurden die Vorstellungen bzw. Vorstellungsentwicklungen von 24 18-jährigen Lernern (13 männlich, 11 weiblich) analysiert. Die Kriterien zur Auswahl der Lerner waren mit denen der Interviewstudie identisch.

Die Didaktische Strukturierung

Als Didaktische Strukturierung wird der „Planungsprozess bezeichnet, der zu grundsätzlichen und verallgemeinerbaren Ziel-, Inhalts- und Methodenentscheidungen für den Unterricht führt“ (Kattmann 2007, S. 96). Ziel der Didaktischen Strukturierung in dieser Studie ist die Bestimmung des Lernbedarfs zum Klimawandel ausgehend von den erfassten Lerner- und Wissenschaftlervorstellungen. In einem wechselseitigen Vergleich werden die Vorstellungen von Lernern und Wissenschaftlern miteinander in Beziehung gesetzt. Ziel dieses Vergleichs ist die Entwicklung von Lernangeboten zum Klimawandel. In der vorliegenden Studie erfolgt die Didaktische Strukturierung in drei Schritten:

1. Die **Formulierung von Leitlinien** zur Vermittlung des Klimawandels: Mit Hilfe des wechselseitigen Vergleichs werden Leitlinien für die Vermittlung formuliert.
2. Die **Entwicklung von Lernangeboten** zum Klimawandel: Auf der Grundlage der formulierten Leitlinien werden Lernangebote zur Vermittlung des Kohlenstoffkreislaufs und der Strahlungsflüsse im Rahmen des Klimawandels entwickelt.

Die Entwicklung von Lernangeboten verfolgt dabei nicht nur das Ziel, vorhandene Evidenzen über Lernervorstellungen zum Klimawandel als Grundlage zu nehmen, sondern sie auch anhand dieser Evidenz zu evaluieren. Leach (2007) sowie Millar et al. (2006) unterscheiden dabei zwischen evidenzorientierten (evidence informed) und evidenzbasierten (evidence based) Lernumgebungen: Als evidenzorientiert werden solche Lernangebote bezeichnet, die auf Grundlage von Lernervorstellungen entworfen werden, während solche als evidenzbasiert bezeichnet werden, die auch anhand von Evidenzen auf ihre Lernwirksamkeit hin geprüft werden. In dieser Studie werden die Lernangebote auf Grundlage erhobener Evidenzen entwickelt und hinsichtlich ihrer Lernwirksamkeit evaluiert. Nach ihrer Evaluation können schließlich evidenzbasierte Aussagen über die Lernwirksamkeit der Lernangebote getroffen werden. Der den empirischen Teil dieser Untersuchung abschließende Schritt ist somit die

3. **Evaluation der Lernangebote**: Die didaktisch rekonstruierten Lernangebote werden schließlich in Vermittlungsexperimenten auf ihre Lernwirksamkeit formativ evaluiert mit dem Ziel, Intervention zu modifizieren und zu verbessern (vgl. Hellstern & Wollmann 1984; Shaw 1999). Die sich während der Vermittlungsexperimente ergebenden Modifikationen der Lernangebote werden dokumentiert. Anhand von Denkpfeilen wird prozessorientiert die konzeptuelle Entwicklung der Vorstellungen im Laufe der Vermittlungsexperimente nachverfolgt. Die der Analyse zugrunde liegenden Methoden und Qualitätskriterien sind in Kapitel 7.2 beschrieben.

In den nationalen Bildungsstandards für das Fach Biologie wird der Klimawandel nicht explizit als Unterrichtsgegenstand benannt, lässt sich aber mit Teilaspekten unter dem Basiskonzept „System“ im Kompetenzbereich „Fachwissen“ oder im Kompetenzbereich „Bewerten“ einordnen (KMK 2004a). Darüber hinaus sind einzelne Aspekte des Klimawandels auch als Unterrichtsinhalt in den Bildungsstandards Physik (KMK 2004c), Chemie (KMK 2004b) und Geographie (DGfG 2007) zu finden. Die in dieser Untersuchung zu entwickelnden Lernangebote zielen damit nicht auf eine in sich geschlossene Unterrichtseinheit zum „Klimawandel“ ab, sondern auf einen modularisierten Einsatz der Lernangebote zu verschiedenen Teilaspekten des Klimawandels in unterschiedlichen naturwissenschaftlichen Fächern.

6 Wissenschaftlervorstellungen zum Klimawandel

Um ein angemessenes fachwissenschaftliches Verständnis des Klimawandels vermitteln zu können, ist eine reflektierte Aufarbeitung von Fachwissen aus der Vermittlungsperspektive notwendig. Der folgende Abschnitt dient der Analyse und Strukturierung wissenschaftlicher Dokumente mit reflektierten fachlichen Vorstellungen zu zwei grundlegenden Aspekten des Klimawandels: dem Treibhauseffekt und dem Kohlenstoffkreislauf. Die kritische Analyse fachwissenschaftlicher Vorstellungen ist notwendig, weil auch fachliche Darstellungen „oft persönliche Sichtweisen enthalten, weil innerfachliche Bezüge zu kurz kommen oder weil historische Verständnisse meist unreflektiert oder sogar unerkannt hineinspielen“ (Kattmann et al. 1997, S. 10). Die wissenschaftlichen Aussagen und Positionen werden somit als persönliche Konstrukte der jeweiligen Wissenschaftler aufgefasst. Die Analyse der Wissenschaftlervorstellungen besteht in der „kritischen und methodisch kontrollierten systematischen Untersuchung fachwissenschaftlicher Aussagen, Theorien, Methoden und Termini aus fachdidaktischer Sicht“ (Kattmann 2007, S. 90). Dabei werden neben den aktuellen Vorstellungen auch historische Sichtweisen zum Gegenstand der Analyse, da diese zur Abgrenzung der gegenwärtigen Vorstellungen oder für ein besseres Verständnis der Lernervorstellungen bedeutend sein können (Gropengießer 2001, S. 30).

6.1 Fragestellung des Kapitels

Die dieses Kapitel leitende Fragestellung ist:

- Über welche Vorstellungen verfügen Wissenschaftler, um zentrale Aspekte des Kohlenstoffkreislaufs bzw. des Treibhauseffekts im Rahmen des Klimawandels zu verstehen?

In der Analyse der Wissenschaftlervorstellungen werden somit folgende Teilfragen untersucht:

- Welche Vorstellungen konzeptualisieren Wissenschaftler zum Kohlenstoffkreislauf bzw. Treibhauseffekt?
- Welche Genese, Bedeutung und Funktion haben die verwendeten Begriffe und in welchem Kontext stehen sie?

6.2 Methodisches Vorgehen

Die Wissenschaftlervorstellungen werden mithilfe der Qualitativen Inhaltsanalyse und der Metaphernanalyse ausgewertet. Die Ergebnisse der Metaphernanalyse fließen in die Explikation der Vorstellungen der Wissenschaftler ein. Die Analyse der Wissenschaftlervorstellungen unterliegt den in Kapitel 7.2.2 für die Analyse der Lernervorstellungen beschriebenen Maßnahmen der Qualitätssicherung.

6.2.1 Qualitative Inhaltsanalyse der Wissenschaftlervorstellungen

Die Qualitative Inhaltsanalyse der Wissenschaftlervorstellungen orientiert sich an der von Gropengießer (2005) für die fachdidaktische Lehr-Lernforschung adaptierten Vorgehensweise. Dabei wurden die vorliegenden wissenschaftlichen Texte in folgenden Schritten anhand des hermeneutischen Zirkels analysiert:

1. **Zusammenfassung:** Von den Fragestellungen geleitet werden die z. T. sehr umfangreichen Originaltexte gesichtet und Inhalt tragende Passagen ausgewählt. Diese Textstellen werden zusammenfassend paraphrasiert und in zentralen Aussagen zitiert. Dabei findet eine Reduktion auf die für die Erklärung des Kohlenstoffkreislaufs bzw. Treibhauseffekts wesentlichen Inhalte statt. Mit der Zusammenfassung erfolgt somit eine erste Interpretation der Originaltexte. Die Verweise auf den Originaltext sind durch Seiten- und Absatzangaben belegt (144, 3 = Seite 144, Absatz 3).
2. **Explikation:** Die untersuchten Wissenschaftlervorstellungen werden mit anderen Quellen verglichen. Hierbei kann es sich zeigen, dass unterschiedliche Perspektiven auf einen Gegenstand deutlich werden. Die Analyse der sprachlichen Aspekte und die Untersuchung der verwendeten Metaphern und Analogien findet ebenfalls im Rahmen der Explikation statt.
3. **Strukturierung:** Innerhalb der Strukturierung werden ausgehend von der Zusammenfassung und der Explikation Konzepte und Denkfiguren der jeweiligen Wissenschaftler identifiziert. Dabei werden widersprüchliche oder parallele Vorstellungen herausgearbeitet. In Anlehnung an Lakoff und Johnson (1999, 58) werden metaphorische Konzepte (z. B. *Treibhausgase Bilden Decke*) durch ein »Ist«, »Sind«, »Bildet« etc. gekennzeichnet. Das Subjekt bezeichnet hierbei den Zielbereich und das Objekt den Ursprungsbereich.

6.2.2 Metaphernanalyse der Wissenschaftlervorstellungen

Mit der Metaphernanalyse wird eine methodisch kontrollierte Grundlage für die Analyse von Vorstellungen mit der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens geschaffen. Die für die Analyse der Vorstellungen von Lernern und Wissenschaftlern untersuchten Quellen werden dazu mithilfe eines an die systematische Metaphernanalyse (Schmitt 2003, 2005) angelehnten Verfahrens ausgewertet. Das im Folgenden beschriebene Vorgehen unterscheidet sich insofern von der systematischen Metaphernanalyse, dass nicht alle, sondern nur die mit dem Klimawandel in Zusammenhang stehenden Metaphern ausgewertet werden. Schmitt (2003) folgend liegt eine Metapher dann vor, wenn

- I. ein Wort oder eine Redewendung mehr als nur wörtliche Bedeutung haben kann,
- II. die wörtliche Bedeutung auf einen prägnanten Quellbereich verweist und dieser
- III. auf einen abstrakteren Zielbereich übertragen wird.

Für diese Untersuchung wurde die Metaphernanalyse wie folgt adaptiert:

1. **Festlegung des Untersuchungsbereichs:** Im untersuchten Material lässt sich eine Vielzahl an Metaphern finden. Es werden jedoch nur solche in die Auswertung aufgenommen, die einen expliziten Bezug zum Klimawandel haben. Andere Metaphernkonzepte, wie z. B. *Wissen Ist Sehen*, die sich auch in den Quelltexten finden lassen, spielen in Bezug auf die Fragestellung dieser Untersuchung keine Rolle und bleiben deshalb unberücksichtigt.
2. **Sammlung von Metaphern im Quellmaterial:** Dieser Schritt umfasst die Analyse der sprachlichen Äußerungen in den Fachtexten. Dabei werden alle im Sinne der Fragestel-

lung relevanten metaphorischen Ausdrücke gesammelt und mithilfe des Programms MAXQDA kodiert.

- 3. Rekonstruktion der Metaphernkonzepte:** Metaphern sind nicht zufällig, sondern lassen sich auf spezifische Konzepte zurückführen. Alle Metaphern mit dem gleichen Quell- und Zielbereichen werden zu Metaphernkonzepten (vgl. Kapitel 2.2.2) zusammengefasst.

6.2.3 Darstellung der Wissenschaftlervorstellungen

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Analyse der Wissenschaftlervorstellungen zusammenfassend dargestellt. Die Quellen wurden einzeln und induktiv ausgewertet. Der besseren Übersichtlichkeit halber erfolgt in der Darstellung keine Einzelstrukturierung nach Quellen, wie Gropengießer (2005) es vorschlägt, sondern nach Denkfiguren. Durch die Gliederung nach Denkfiguren können Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den unterschiedlichen Quellen übersichtlich und prägnant herausgearbeitet werden. Für die hier dargestellte Analyse sind Ankerzitate (vgl. Bortz & Döring 2006, S. 330) aus den Quellen angeführt. Jedoch lassen sich nicht in allen Quellen zu jeder Vorstellung prägnante Zitate finden. Zum Teil ergibt sich ein Konzept oder eine Denkfigur aus dem Gesamtzusammenhang eines Abschnittes und nicht aus kurzen, zitierbaren Sätzen. An diesen Stellen wird entsprechend auf den Originaltext verwiesen. In einer tabellarischen Übersicht zu den strukturierten Vorstellungen sind die Quellen jeweils angegeben.

Für die Analyse der Wissenschaftlervorstellungen wird folgende Darstellungsform gewählt:

- Zitate werden in Anführungszeichen („“) eingeschlossen und mit Quelltext, Seite und Absatz zitiert (z. B. IPCC: S. 515, 3)
- Konzepte werden im Fließtext *kursiv* und Denkfiguren in KAPITÄLCHEN angeführt.

Den einzelnen Denkfiguren sind ergänzende Konzepte zugeordnet. Die Konzepte werden wie folgt gekennzeichnet:

- (+) vom Autor des Quelltextes zustimmend vertreten
- (-) vom Autor des Quelltextes antithetisch vertreten
- (?) vom Autor des Quelltextes fragend diskutiert

Im Folgenden werden zuerst die Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf und anschließend zum Treibhauseffekt analysiert und diskutiert.

6.3 Wissenschaftlervorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf

Mit rund 60 Prozent Anteil am anthropogenen Klimawandel gilt das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO₂) als Hauptverursacher der globalen Erwärmung (IPCC 2007). Im folgenden Abschnitt werden deshalb Wissenschaftlervorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf mit einem Fokus auf das CO₂ analysiert. Dabei sollen aus klimatologischer, biogeochemischer und ökologischer Perspektive verschiedene Aspekte des Kohlenstoffkreislaufs herausgearbeitet werden. Es wurden vier Quellen aus der Ökologie und der Klimatologie ausgewählt, die in ihrer jeweiligen Disziplin als Standardwerk gelten. Die Auswahl der Literatur wurde mit Experten der Klimatologie (Prof. Dr. Stefan Rahmstorf, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung) und der Ökologie (Prof. Dr. Hansjörg Küster, Leibniz Universität Hannover) abgestimmt.

Folgende Quellen wurden analysiert: Aus William H. Schlesingers *Biogeochemistry, an Analysis of Global Change* wurde der Abschnitt „The Global Carbon Cycle“ (S. 358-382) ausgewählt. Das Werk wird in Rezensionen aufgrund seiner detaillierten Zusammenführung verschiedener Wissenschaftsdisziplinen zu biogeochemischen Kreisläufen gewürdigt (vgl. Warneck

1998). Als zweites Werk wurde *Physics of the Atmospheres* von John Houghton mit dem Kapitel „Climate and Climate Change“ (S. 250-260) analysiert. Das Lehrbuch gilt als Standardwerk der Klimatologie. Smith and Smith haben mit dem Werk *Elements of Ecology* ein Überblickswerk über die verschiedenen Arbeitsfelder der Ökologie verfasst. Das Hochschullehrbuch hat als eines der ersten Ökologielehrbücher den anthropogenen Klimawandel ausführlich in eigenen Kapiteln („Biogeochemical Cycles“ S. 478-482 und „Climate Change“ S. 632-638) behandelt. Als viertes Dokument werden Teile des Vierten Sachstandsberichts des Weltklimarates (IPCC) analysiert, der als Kompendium den im Jahr 2007 aktuellen Forschungsstand zum Klimawandel zusammenfasst und analysiert. Dabei handelt es sich um das Kapitel „7.3 The Carbon Cycle and the Climate System“ (S. 511-538).

6.3.1 Kohlenstoffkreislauf im Speicher-Fluss-Schema

Im Folgenden sind zunächst Abbildungen aus den untersuchten Quellen dargestellt und schließlich anhand weiterer Belege tiefer gehend analysiert. Die globalen Bewegungen des Kohlenstoffs werden dabei von allen untersuchten Quellen mithilfe des Speicher-Fluss- und des Kreislaufschemas (vgl. Kapitel 2.2.4) ausgedrückt:

Der Kohlenstoffkreislauf bei Schlesinger (1997)

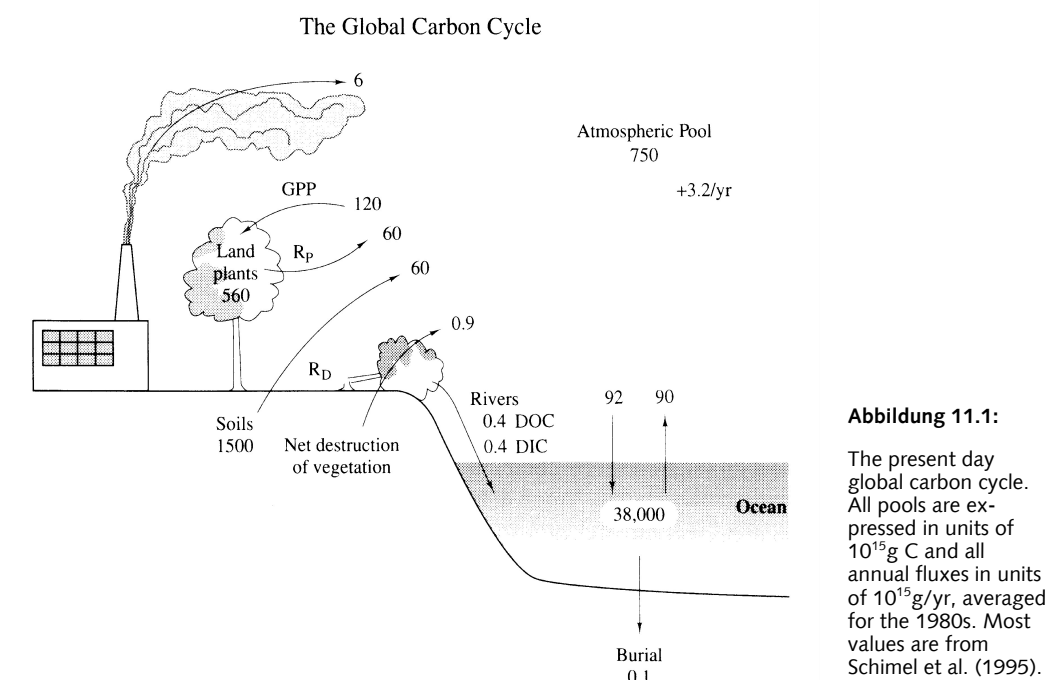


Abbildung 11.1:

The present day global carbon cycle. All pools are expressed in units of 10^{15} g C and all annual fluxes in units of 10^{15} g/yr, averaged for the 1980s. Most values are from Schimel et al. (1995).

Abbildung 6.1: Kohlenstoffkreislauf bei Schlesinger (1997, S. 359)

Der Kohlenstoffkreislauf bei Houghton (2002)

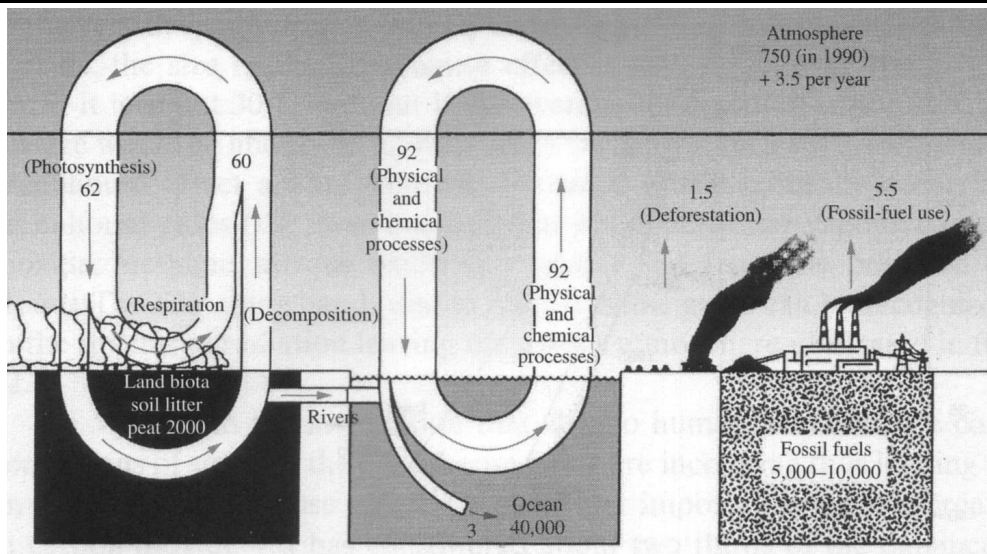


Figure 14.8: The reservoirs of carbon in the earth, the biosphere, the ocean and the atmosphere and the annual exchanges of carbon dioxide (expressed in terms of the mass of carbon it contains) between the reservoirs (from Houghton, 1997). The units are gigatonnes (Gt). Emissions of carbon dioxide into the atmosphere from the burning of fossil fuel currently amount to about 5.5 gigatonnes of carbon per annum.

Abbildung 6.2: Kohlenstoffkreislauf bei Houghton (2002, S. 253)

Der Kohlenstoffkreislauf bei Smith und Smith (2006)

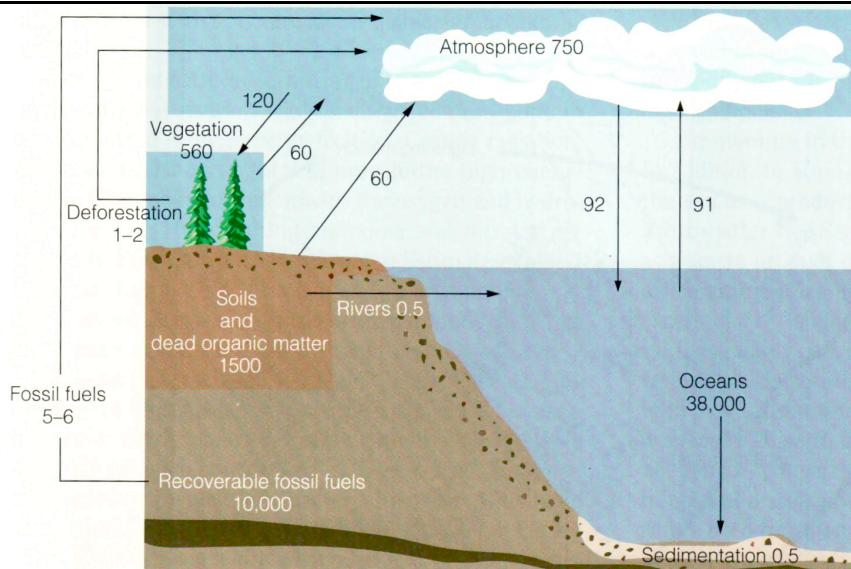


Figure 22.5: The global carbon cycle. Boxes show the sizes of the majors pools of carbon, and arrows indicate the major exchanges (fluxes) among them. All values are in gigatons (Gt) of carbon and exchanges are on an annual timescale. The largest pool of carbon, geologic, is not included because of the slow rates (geologic timescale) of transfer with other active pools.

Abbildung 6.3: Kohlenstoffkreislauf bei Smith & Smith (2006, S. 481)

Der Kohlenstoffkreislauf im IPCC-Bericht (2007)

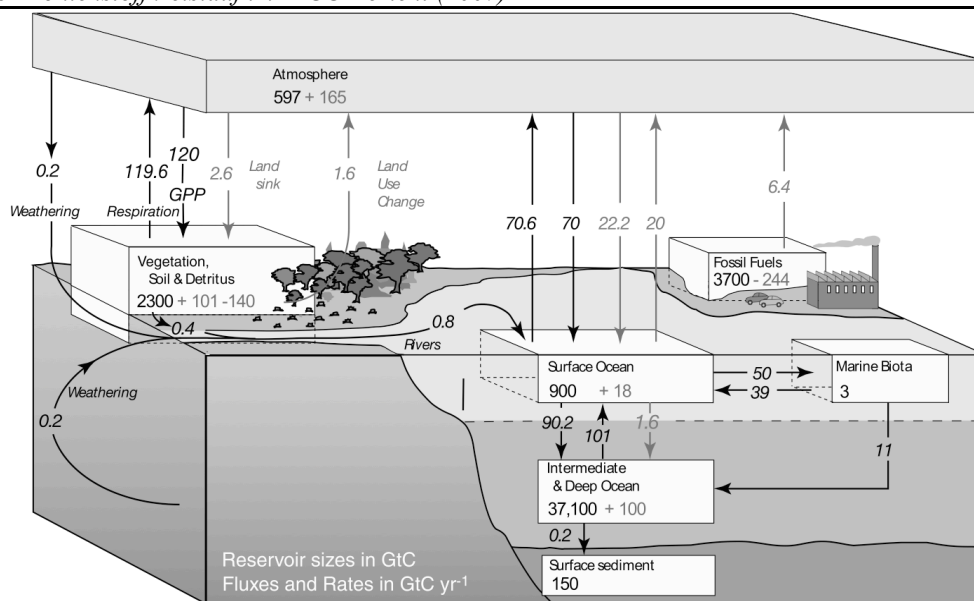


Figure 7.3: The global carbon cycle for the 1990s, showing the main annual fluxes in GtC yr⁻¹: pre-industrial 'natural' fluxes in black and 'anthropogenic' fluxes in red. [...] Gross fluxes generally have uncertainties of more than ±20% but fractional amounts have been retained to achieve overall balance when including estimates in fractions of GtC yr⁻¹ for riverine transport, weathering, deep ocean burial, etc.

Abbildung 6.4: Kohlenstoffkreislauf beim IPCC (2007, S. 515)

Ein Vergleich der Abbildungen zeigt, dass alle Wissenschaftler eine hybride Darstellung bestehend aus einem Speicher-Fluss-Schema und einer räumlich-realistischen Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs wählen: Speicher sind durch Quader (IPCC), Rechtecke (Houghton, Smith & Smith z. T.) oder gar nicht (Schlesinger) gekennzeichnet. Die Flüsse sind durch Pfeile dargestellt. Speicher und Flüsse werden dabei in eine Darstellung des Profils der Erde und Atmosphäre eingefügt. Die Flüsse werden meist anhand ihrer Ursachen (z. B. *Verbrennung*) bezeichnet. Die hybride Darstellung führt dazu, dass die Kohlenstoffflüsse zwischen den Behältern, die nicht nahtlos aneinander schließen, durch ein nicht beschriebenes Kontinuum gezeichnet sind. Die Beträge der Speichermassen und Flussraten sind in den Abbildungen dimensionslos als absolute Größen dargestellt, werden aber in den Abbildungsunterschriften z. T. ergänzt. Der fehlende Speicher des *Fossilen Kohlenstoffs*, wie auch die fehlenden Startpunkte der Flüsse der *Zerstörung der Vegetation* und auch des Kohlenstofftransports in Flüssen lassen die Abbildung von Schlesinger stark interpretationsbedürftig werden. Der IPCC unterscheidet in seiner Abbildung als einziger natürliche und anthropogene Kohlenstoffflussraten.

Die Merkmale des Kreislaufs sind dabei über das auf langen Zeitskalen wiederholte Passieren der gleichen Speicher gekennzeichnet. Zum Teil wird auch auf die jeweilige Kohlenstoffverbindung eingegangen, die als Speicher- oder Transportform dient. Zentrale Vorstellung bei allen Wissenschaftlern sind die metaphorischen Konzepte *Kohlenstoff fließt zwischen Speichern* und *Kohlenstoffflüsse bilden Kreislauf*. Unterschiede in den Vorstellungen der Wissenschaftler zeigen sich in der Beschreibung der verschiedenen Kohlenstoffspeicher, -flüsse und den Ursachen der Kohlenstoffflüsse. Die folgende, detailliertere Analyse der Vorstellungen orientiert sich an den Elementen des Speicher-Fluss-Schemas zur Beschreibung des Kohlenstoffkreislaufs (vgl. Abbildung 6.5).

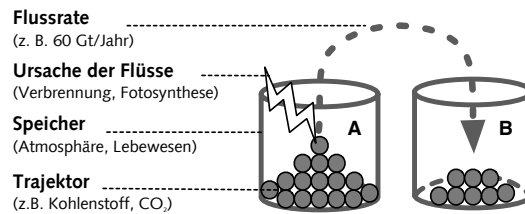


Abbildung 6.5: Elemente des Speicher-Fluss-Schemas

6.3.2 Vorstellungen zu den Kohlenstoffspeichern

Neben den schematischen Abbildungen geht auch aus den zugehörigen Texten eine Nutzung des Speicher-Fluss-Schemas zur Beschreibung des Kohlenstoffkreislaufs hervor:

„pool of carbon is <u>contained in</u> soils...“	(Schlesinger: S. 360, 1)
„carbon <u>emitted into</u> the atmosphere“	(Houghton: S. 252, 3)
„[...] <u>release</u> carbon <u>back to</u> the atmosphere“	(Smith & Smith: S. 478, 3)
„CO ₂ is <u>removed from</u> the atmosphere“	(IPCC: S. 511, 3)

Mit der Nutzung des Speicher-Fluss-Schemas zur Beschreibung des Kohlenstoffkreislaufs werden die Kohlenstoffvorkommen der Erde metaphorisch verschiedenen Behältern zugeordnet (*Atmosphäre ist Kohlenstoffspeicher* etc.) und damit vergegenständlicht. Diese Vergegenständlichung von Systemen durch Wissenschaftler – und Lerner – konnte von Jelemenska (2006) schon für Ökosysteme beschrieben werden. Will man Stoffflüsse zwischen verschiedenen Strukturen erfassen, wird der Übergangsbereich zwischen ihnen interessant: So ist die Grenzziehung zwischen den verschiedenen Kohlenstoffspeichern aus fachlicher Perspektive schwierig. Es gibt z. B. nahezu keine Bereiche der Atmosphäre, der Ozeane und der Sedimente, die nicht belebt sind und somit formal zu den Lebewesen gehören. Auch dringt die Atmosphäre tief in die Böden ein. Die Behältermetaphorik ist somit reduktionistisch und hebt den funktionellen Ort der Kohlenstoffvorkommen hervor, während die jeweiligen stofflichen Vorkommen (Kohlenwasserstoffe, CO₂, Carbonate etc.) verdeckt werden.

Die Speicher werden von allen Wissenschaftlern ähnlich als *Ozeane, Atmosphäre, Fossile Energieträger, Vegetation und Böden* bezeichnet (vgl. Tabelle 2.1). Die Speicher *Vegetation* und *Böden* werden von Houghton und dem IPCC zu einem Speicher zusammengefasst, von Smith und Smith sowie Schlesinger als zwei getrennte Speicher betrachtet. Der IPCC teilt den Ozean in verschiedene Speicher auf: *Oberflächenwasser, Tiefenwasser* und *Marine Lebewesen*, kommt aber in der Summe der Massen im Ozean auf ähnliche Beträge, wie sie die übrigen Quellen für den gesamten Ozean beschreiben. Aus den Abbildungen gehen die in Tabelle 7.1 zusammengefassten Vorstellungen zu Kohlenstoffspeichern und ihren Größen hervor.

Die Angabe der Massen gespeicherten Kohlenstoffs erfolgt bei allen Wissenschaftlern in Gatonnen oder 10¹⁵g Kohlenstoff, wobei letzteres dem SI-System entspricht. Die Größenordnungen der angegebenen Massen gespeicherten Kohlenstoffs sind bei allen untersuchten Quellen ähnlich und gleichen sich bei Schlesinger sowie Smith und Smith – außer bei dem in fossilen Sedimenten gespeicherten Kohlenstoff – exakt. Der IPCC löst die Beträge der einzelnen Speicher stärker auf und unterscheidet zwischen vom Menschen unbeeinflussten und vom Menschen beeinflussten Speichermassen.

Bei den *Fossilen Energieträgern* gibt es Beträge, die sich um den Faktor 2,5 unterscheiden. Die große Differenz ist vermutlich zum einen darauf zurückzuführen, dass es sich bei allen Be-

trägen um Hochrechnungen und Schätzungen handelt. Zum anderen ist sie wahrscheinlich auf die Unterscheidung zwischen in Sedimenten vorhandenen und wirtschaftlich förderbaren fossilen Energieträgern (Cramer & Andruleit 2009; Kehrer 1977) zurückzuführen. Schlesinger benennt den Speicher fossile Energieträger auch explizit als *förderbare fossile Energieträger* (Schlesinger: S. 359, 2). Den in Kohle und Öl gespeicherten Kohlenstoff bezeichnen alle Quellen anthropozentrisch über seine Verwendung als *Fossile Energieträger*.

Konzept (... Ist Kohlenstoffspeicher)	Masse in 10 ¹⁵ g Kohlenstoff			
	Schlesinger	Houghton	Smith & Smith	IPCC
Atmosphäre ...	750	750	750	597+165
Ozeane ...	38.000	40.000	38.000	
Oberflächenwasser ...				900+18
Tiefenwasser ...				37.100+100
Marine Lebewesen ...				3
Fossile Energieträger ...	4.000*	5.000/10.000	10.000	3.700 -244
Vegetation und Böden ...				2.300 +101-140
Landlebewesen und Böden ...		2000		
Vegetation ...	560		560	
Böden ...	1.500		1.500	
Sedimente ...	10 ⁸ *		10 ⁸ *	
Oberflächensedimente ...				150

Tabelle 6.1: Konzepte zu Kohlenstoffspeichern und den zugeordneten Massen

(* Daten nach Schlesinger S. 359, 2; Smith und Smith S. 480, 7; restliche Daten aus den o.a. Abbildungen)

Der Kohlenstoff in der Vegetation und den Böden wird beim IPCC um rund 15 % höher angegeben als bei den übrigen drei Quellen. Smith und Smith, Schlesinger und der IPCC beschreiben die Vegetation als terrestrischen Kohlenstoffspeicher und lassen heterotrophe Organismen als Kohlenstoffreservoir unberücksichtigt.

Die Sedimente werden nur von Smith und Smith sowie Schlesinger als Kohlenstoffspeicher im Rahmen des Klimawandels berücksichtigt. Sie unterscheiden dabei anhand der Flussrate zwischen aktiven und passiven Kohlenstoffspeichern:

„the sum of active pools near the earth’s surface“ (Schlesinger: S. 359, 3)

„all but a small fraction is buried in sedimentary rocks and is not actively involved in the global carbon cycle“ (Smith & Smith: S. 480, 7)

Bei beiden lässt sich somit das Konzept *Sedimente Sind Passiver Kohlenstoffspeicher* finden. Die Termini aktiv und passiv stehen stellvertretend für die Flussrate mit der ein Speicher am Kohlenstoffkreislauf beteiligt ist: *Passiver Speicher Hat Kleine Flussraten, Aktiver Speicher Hat Große Flussraten*.

6.3.3 Vorstellungen zu den Kohlenstoffflüssen und ihren Ursachen

Die für den Klimawandel relevanten Kohlenstoffflüsse werden von allen Wissenschaftlern ähnlich beschrieben. Dies betrifft sowohl die Ursachen der Flüsse (siehe Tabelle 6.2) als auch die Beträge der Flussraten (siehe Tabelle 6.3).

Quelle	Ziel	Bezeichnung	Quelle
Vegetation	Atmosphäre	<i>respiration</i>	(Smith & Smith: S. 478, 3; Schlesinger: S. 359, IPCC: S. 515; Houghton: S. 253*)
		<i>decomposition</i>	(Smith & Smith: S. 480; Houghton: S. 253)
		<i>land use change</i>	(IPCC: S. 515, 1)
		<i>deforestation</i>	(Houghton: S. 253; Smith & Smith: S. 478)
		<i>net destruction of vegetation</i>	(Schlesinger: S. 359)
		<i>land sink</i>	(IPCC: S. 515)
Atmosphäre	Vegetation	<i>photosynthesis</i>	(IPCC: 508, 13; Smith & Smith: S. 478; Houghton: S. 253, Schlesinger: S. 380, 2)
		<i>(gross) primary production</i>	(IPCC: S. 515; Smith & Smith: S. 478, 3; Schlesinger: S. 359)
Ozeane	Atmosphäre	<i>diffusion</i>	(Smith & Smith: S. 479, 1)
Atmosphäre	Ozeane	<i>physical & chemical exchange</i>	(Houghton: S. 253)
		<i>gas exchange</i>	(IPCC: S. 519, 1)
Vegetation	Ozeane	<i>riverine transport, rivers</i>	(IPCC: S. 51; Houghton: S. 253)
Sedimente	Atmosphäre	<i>weathering</i>	(IPCC: S. 515, 1)
Atmosphäre	Sedimente		
Ozeane	Sedimente	<i>sedimentation</i>	(Smith & Smith: S. 480, 3)
		<i>deep ocean burial</i>	(IPCC: S. 515, 1)
		<i>burial</i>	(Schlesinger: S. 359)
Fossile Energieträger	Atmosphäre	<i>combustion</i>	(Smith und Smith: S. 478)
		<i>burning of fossil fuel</i>	(IPCC: S. 501, 4)
		<i>fossil fuel use</i>	(Houghton: S. 253)

Tabelle 6.2: Bezeichnungen der Ursachen der Kohlenstoffflüsse

*Quellenangaben ohne Zeilenangabe beziehen sich auf Abbildungen auf den jew. Seiten.

Der Vergleich der Bezeichnungen zeigt, dass die Wissenschaftler die Ursachen der Flüsse ähnlich beschreiben, jedoch zum Teil unterschiedliche Termini nutzen, um die gleichen Kohlenstoffflüsse zu bezeichnen. Aus physiologischer Sicht kann der Terminus *Zersetzung* (*decomposition*) dem Terminus *Atmung* (*respiration*) zugeordnet werden, da auch bei der Zersetzung Biomasse veratmet wird. Dies gilt auch für die Termini *diffusion*, *gas exchange* und *physical and chemical exchange*, die den Gasaustausch zwischen Ozeanen und Atmosphäre beschreiben.

Für die Beschreibung der Kohlenstoffflüsse von der Atmosphäre in die Vegetation werden die Termini *Fotosynthese* und (*Brutto-*)*Primärproduktion* verwendet. Während es sich bei der *Fotosynthese* um einen physiologischen Begriff handelt, der die biochemischen Grundlagen der Kohlenstofffixierung in der Vegetation beschreibt, fokussiert die (*Brutto-*)*Primärproduktion* auf die Bilanz der Kohlenstoffflüsse und beschreibt die durch Fotosynthese erzeugte Menge Biomasse. Bis auf von Houghton werden die Begriffe *Fotosynthese* und *Primärproduktion* synonym verwendet. Auf den ersten Blick erscheint die Verwendung des Begriff *Primärproduktion* in einem ökologischen Kontext angemessener. Jedoch ist auch die Verwendung des Begriffs *Fotosynthese* konsistent, da er – wie die *Atmung*, *Verbrennung*, *Abholzung* etc. – die Ursache des jeweiligen Kohlenstoffflusses bezeichnet.

Die Termini *riverine transport* und *rivers* (= *Flusstransport*), *sedimentation*, *deep ocean burial* und *burial* (= *Sedimentierung*) sowie *combustion*, *burning of fossil fuel* und *fossil fuel use* (= *Verbrennung*) werden ebenfalls synonym verwendet.

Die Termini *land use change* auf der einen und *deforestation* sowie *net destruction of vegetation* auf der anderen Seite deuten auf unterschiedliche Begriffe hin: *Land use change* ist der wei-

testgehende Begriff, der zwar hauptsächlich die Abforstung und damit Zerstörung der Vegetation bezeichnet, jedoch auch die Methan- und Lachgasfreisetzung durch veränderte Anbaumethoden (IPCC 512, 1) mit einbezieht. Da in dieser Studie auf das Treibhausgas CO₂ fokussiert wird, werden die unterschiedlichen Vorstellungen auf dem Begriff der *Abholzung* verallgemeinert. Die Änderungen in der Landnutzung, die zur Freisetzung von N₂O bzw. CH₄ führen, sind dem Autoren bewusst, werden aber aufgrund der Fragestellung dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt.

In der folgenden Tabelle sind die Massen der beschriebenen Kohlenstoffflussraten anhand der in den Abbildungen angegebenen Daten gegenübergestellt:

Quelle	Ziel	Konzept (... Ist Ursache des Kohlenstoffflusses)	Flussrate (in 10 ¹⁵ g/Jahr)			
			Schlesinger	Houghton	Smith&Smith	IPCC
Vegetation	Atmosphäre	Atmung	120	60	120	120
Atmosphäre	Vegetation	Fotosynthese	120	62	120	119,6 + 2,6
Ozeane	Atmosphäre	Gasaustausch	90	92	91	70,6 + 20
Atmosphäre	Ozeane	Gasaustausch	92	92	92	70 + 22,2
Vegetation	Ozeane	Flusstransport	0,8	-	0,5	0,8
Sedimente	Atmosphäre	Verwitterung	./.	./.	./.	0,2
Atmosphäre	Sedimente	Verwitterung	./.	./.	./.	0,2
Ozeane	Sedimente	Sedimentierung	0,1	./.	0,5	0,2
Fossile Energieträger	Atmosphäre	Verbrennung	6	5,5	5-6	6,4
Vegetation	Atmosphäre	Abholzung	0,9	1,5	1-2	1,5

Tabelle 6.3: Beschreibung und Beträge der Flussraten in den untersuchten Quellen
(./ = kein Fluss angegeben; - = Fluss ohne Betrag)

Die Angabe der Flussraten erfolgt in Gigatonnen (= 10¹⁵g) Kohlenstoff pro Jahr. Die Beträge der Flussraten sind bei allen Wissenschaftlern nahezu identisch angegeben. Houghton gibt die durch Atmung und die Fotosynthese verursachten Kohlenstoffflüsse halb so groß wie die übrigen Wissenschaftler an. Der IPCC stellt die Bestandsgrößen und Flussraten am differenziertesten dar, indem er zwischen unbeeinflussten und vom Menschen beeinflussten Beträgen unterscheidet. Darüber hinaus zeichnet das IPCC in seiner Abbildung den Kohlenstoffkreislauf als in seiner Bilanz ausgeglichenes System auf. In allen anderen Quellen sind die dargestellten Bilanzen nicht ausgeglichen, ohne dass dies weiter ausgeführt wird. Houghton stellt den globalen Kohlenstoffkreislauf bestehend aus verschiedenen, nahezu geschlossenen Teilkreisläufen dar. So sind die Kohlenstoffflüsse zwischen Atmosphäre und Lebewesen bzw. Atmosphäre und Ozeanen jeweils als in sich geschlossene Systeme dargestellt, aus denen nahezu kein Kohlenstoff entweicht. Auch unterscheidet Houghton in seiner Abbildung zwischen gespeichertem Kohlenstoff und zirkulierendem Kohlenstoff: Die durch *Atmosphäre* und *Fotosynthese* bzw. *Gasaustausch* verursachten Kohlenstoffflüsse durchqueren die Speicher *Atmosphäre* und *Landlebewesen* bzw. *Ozeane* als nahezu geschlossenes System. Während bei den anderen Wissenschaftlern in Bezug auf die Kohlenstoffflüsse innerhalb des globalen Kohlenstoffkreislaufs das Start-Weg-Ziel-Schema vorherrschend ist, also Kohlenstoff immer von einem Speicher in einen anderen überführt wird, um von dort einen neuen, aber vorher unbestimmten Weg zu nehmen, nutzt Houghton für die vom Menschen unbeeinflussten Flüsse das Kreislaufschema, dem zufolge Kohlenstoff ausschließlich zwischen zwei Speichern zirkuliert. Einzig für die anthropogenen Kohlenstoffemissionen in die Atmosphäre nutzt er ein Start-Weg-Ziel-Schema. Diese Vorstellung kann verallgemeinert werden zu den Konzepten: *Es gibt einen Kohlenstoffkreislauf* (IPCC; Schlesinger; Smith und Smith) und *Es gibt mehrere Kohlenstoffkreisläufe* (Houghton).

Die Metaphernanalyse zeigt, dass die *Verbrennung* von allen Wissenschaftlern metaphorisch als Freisetzung konzeptualisiert wird:

„burning fossil fuels <u>returns</u> carbon <u>captured</u> by plants“	(IPCC: S. 511, 3)
„Carbon that has been <u>emitted</u> over a specified period of time“	(Smith & Smith: 633, 4)
„anthropogenic carbon <u>emitted into</u> the atmosphere“	(Houghton, 252: 3)
„CO ₂ <u>release</u> from fossil fuels <u>enters</u> the atmosphere“	(Schlesinger: 361, 3)

Im Konzept *Verbrennen Ist Freisetzen* wird der Fluss des Kohlenstoff(dioxid)s von einem Behälter in einen anderen in den Vordergrund gestellt. Typische Termini bei der Nutzung dieses Konzeptes sind *freisetzen, emittieren, einfangen, aufnehmen, abgeben* und *binden*. Das Konzept rekurriert auf das Behälter-Schema: Die Atmosphäre wird als der die übrigen Behälter umgebene Behälter gesehen (vgl. Abbildung 2.7). In der Atmosphäre ist Kohlenstoff *frei*, in den anderen Behältern *gebunden* oder *gefangen*. Charakteristisch hierbei ist die ausschließliche Verwendung des Konzeptes: Kohlenstoff wird immer nur in die Atmosphäre freigesetzt. Die Atmosphäre wird somit als den die übrigen Speicher umgebenden Behälter imaginiert (vgl. Abbildung 2.7). Eine Freisetzung z. B. in den Ozean oder die Vegetation wird nicht genannt. Das Konzept *Verbrennen Ist Freisetzen* ist in seiner Struktur eng mit der Vorstellung einer Kohlenstoffbilanz verknüpft, da in dem Konzept der Ort des Vorkommens, nicht aber die Verbindung des Kohlenstoffs (C, CO₂, CO₃²⁻ etc.) oder seine Umwandlung (Oxidation bzw. Reduktion) eine Rolle spielt.

Konzept	Schlesinger	Houghton	Smith&Smith	IPCC
Verbrennen Ist Freisetzen. Durch die Verbrennung fossiler Energieträger wird Kohlenstoff freigesetzt	+	+	+	+
Es gibt einen Kohlenstoffkreislauf. Der Austausch von Kohlenstoff zwischen allen Kohlenstoffspeichern bildet einen globalen Kohlenstoffkreislauf.	+		+	+
Es gibt mehrere Kohlenstoffkreisläufe. Die Kohlenstoffflüsse zwischen Landlebewesen bzw. Ozeanen und Atmosphäre sind nahezu geschlossene Kreisläufe.		+		

Tabelle 6.4: Konzepte zu Kohlenstoffflüssen

6.3.4 Denkfigur: Vorindustrielles Gleichgewicht

Die vom Menschen unbeeinflussten, durch *Atmung, Fotosynthese* und *Gasaustausch* verursachten Kohlenstoffflüsse sind in allen Quellen als nahezu ausgeglichen dargestellt. Ein Vergleich mit entsprechenden Textabschnitten ergibt ein ähnliches Bild:

„While these fluxes vary from year to year, they are approximately in balance when averaged over longer time periods“	(IPCC: S. 514, 6)
„before human activities became a [...] disturbance, the atmospheric concentration of carbon dioxide maintained a substantially steady value“	(Houghton: S. 253, 2)
„exchanges of CO ₂ between the landmass and the atmosphere [...] is believed to be near in equilibrium“	(Smith & Smith: S. 481, 3)
„return to steady state conditions to the carbon cycle“	(Schlesinger: S. 360, 4)

In den Zitaten wird die Vorstellung des aus der Systemtheorie entstammenden Konzeptes des dynamischen (Fließ-)Gleichgewichts deutlich (Bertalanffy 1968), wie Termini *to be near in equilibrium, substantially steady value* oder *balance averaged over longer time periods* belegen.

In der Thermodynamik wird unterschieden zwischen offenen, geschlossenen und abgeschlossenen Systemen: offene Systeme tauschen Energie und Stoffe mit ihrer Umgebung aus, geschlos-

sene Systeme tauschen Energie, aber keine Stoffe mit ihrer Umgebung aus und abgeschlossene Systeme tauschen weder Energie noch Stoffe mit ihrer Umgebung aus (Atkins 1996). Beim Kohlenstoffkreislauf ist jeder Speicher für sich (z. B. Atmosphäre) ein offenes System, da ihm ständig Kohlenstoff zugeführt wird und aus ihm abfließt. Der Kohlenstoffkreislauf als Gesamtsystem ist ein geschlossenes System, aber kein abgeschlossenes System, da es zwar Energie, aber keinen Kohlenstoff mit seiner Umgebung, dem Weltraum, austauscht.

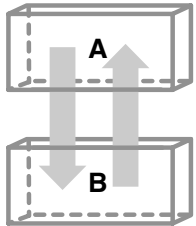
Dynamisches Gleichgewicht	
	Prinzip Ein System befindet sich in einem dynamischen Gleichgewicht, wenn die Zu- und Abflüsse in einen Speicher im Mittel ausgeglichen sind. Im dynamischen Gleichgewicht ist die Stoffbilanz eines Systems somit Null.
Beispiel	<i>Durch die Kohlenstoffflüsse zwischen Atmosphäre und Landlebewesen werden jährlich 16 % des atmosphärischen Kohlenstoffs ausgetauscht. Dennoch bleibt die atmosphärische CO₂-Konzentration aufgrund der ausgeglichenen Flussraten konstant.</i>

Tabelle 6.5 Prinzip des dynamischen Gleichgewichts

Das dem Kohlenstoffkreislauf unterstellte ökologische Gleichgewicht vermittelt dabei ein statisches Naturbild, in dem Veränderungen oberhalb oder unterhalb bestimmter Schwankungsbreiten nicht möglich sind: Es kann nur soviel Veränderung geschehen, wie auf der anderen Seite der Waage wieder ausgeglichen werden kann. Ausgeblendet wird in der Gleichgewichtsmetaphorik die Erdgeschichtlichkeit des Kohlenstoffkreislaufs. Kattmann hält die Gleichgewichtsmetaphorik in der Ökologie für unangemessen und bezeichnet das ökologische Gleichgewicht als eine *Serie von Ungleichgewichten* (Kattmann 2005). Problematisch ist die Nutzung der Gleichgewichtsmetapher in Zusammenhang mit dem Kohlenstoffkreislauf und dem Klima, da das Klima und Kohlenstoffkreislauf seit Entstehung der Erde immer im Wandel waren (Behringer 2007).

Die Nutzung der Gleichgewichtsmetaphorik durch die Wissenschaftler lässt sich durch die tiefe lebensweltliche Verankerung des Gleichgewichtsschemas (vgl. Kapitel 2.2.4) erklären. Cuddington (2007, S. 464) verweist darüber hinaus aus Perspektive der Wissenschaftstheorie der Biologie darauf, dass die Gleichgewichtsmetapher in der Ökologie als theoriebildende Metapher genutzt wird: Die Ökologie sei ohne die Idee eines Gleichgewichts nicht denkbar und habe damit eine metaphorische Basis. Egerton (1973) beschreibt die Idee des Gleichgewicht sogar als erste Theorie der Ökologie.

Die Denkfigur eines vorindustriellen Gleichgewichts im Kohlenstoffkreislauf lässt sich verallgemeinert wie folgt beschreiben:

Denkfigur: Vorindustrielles Gleichgewicht				
Der vom Menschen unbeeinflusste Kohlenstoffkreislauf ist in einem dynamischen Gleichgewicht, da sich die Raten der Kohlenstoffflüsse mittelfristig ausgleichen.				
Der Denkfigur sind folgende Konzepte zugeordnet:	Schlesinger	Houghton	Smith & Smith	IPCC
Atmung und Fotosynthese gleichen sich aus. Die Kohlenstoffflüsse zwischen Atmosphäre und Landlebewesen sind im Mittel ausgeglichen.	+	+	+	+
Gasaustausch ist ausgeglichen. Die Kohlenstoffflüsse zwischen Atmosphäre und Ozeanen sind im Mittel ausgeglichen.	+	+	+	+

Tabelle 6.6: Denkfigur VORINDUSTRIELLES GLEICHGEWICHT

6.3.5 Denkfigur: Anthropogenes Ungleichgewicht

Wie aus den Darstellungen in den Schemazeichnungen in Kapitel 6.3.1 und auch den Beschreibungen im Text hervorgeht, wird der Kohlenstoffkreislauf als aus dem Gleichgewicht geraten betrachtet:

„the net land-atmosphere and ocean-atmosphere fluxes have become significantly different from zero“	(IPCC: S. 514, 7)
„the increase in atmospheric CO ₂ results from our ability to change the flux of CO ₂ to the atmosphere by an amount that is significant“	(Schlesinger: S. 371, 1)
„carbon dioxide growth in concentration in the atmosphere since the preindustrial era of about 30%“	(Houghton: S. 250, 2)
„human activities have increased the atmospheric concentration of [...] CO ₂ [...] by more than 25 percent over the past 100 years“	(Smith & Smith: S. 632, 5)

Analog zur Denkfigur VORINDUSTRIELLES GLEICHGEWICHT wird unter Einbezug menschlicher Aktivitäten somit die Denkfigur ANTHROGENES UNGLEICHGEWICHT beschrieben. Die Abbildungen zum Kohlenstoffkreislauf (vgl. Kapitel 6.3.1) zeigen eine Beeinflussung des Kohlenstoffkreislaufs durch die vom Menschen durch *Verbrennung* und *Abholzung* induzierten Kohlenstoffflüsse. Diese Beeinflussung wird z. T. als Störung bezeichnet und zwischen natürlichen und vom Menschen verursachten (künstlichen) Kohlenstoffflüssen unterschieden.

„human perturbation of the atmosphere“	(Schlesinger: S. 360, 4)
„human activities are changing the chemistry of the atmosphere“	(Smith & Smith: S. 632, 2)
„before human activities became a [...] disturbance [...]“	(Houghton: S. 253, 2)
„natural or unperturbed exchanges [...] are shown by black arrows“	(IPCC: S. 514, 6)

Aus den Zitaten wird die Vorstellung deutlich, dass der Mensch den Kohlenstoffkreislauf *verändert* (Smith & Smith) oder *stört* (IPCC, Houghton, Schlesinger). Die Termini weisen dabei – mit unterschiedlichem Personifizierungsgrad – auf eine ähnliche Vorstellung hin, der zufolge der unbeeinflusste Kohlenstoffkreislauf vom Menschen aus dem Gleichgewicht gebracht wird. Eine Störung ist als „Beeinträchtigung eines andauernden Ablaufes, Belästigung und Ärgernis“ beschrieben (Duden 2002). Das Konzept *Mensch Stört Kohlenstoffkreislauf* basiert somit auf der Vorstellung eines natürlichen Kohlenstoffkreislaufs, der sich in einem ausgeglichenen Zustand befindet. Durch die Verbrennung fossiler Sedimente und die Abholzung von Wäldern greift der Mensch in diese als natürlich und ausgeglichen wahrgenommenen Abläufe ein und verändert sie: Es kommt zu einer Störung. Diese Vorstellung basiert auf einer Idee von Natürlichkeit, nach der der Mensch außerhalb der Natur steht und als Störer natürliche Prozesse beeinflusst (vgl. Kapitel 2.2.4). Hervorgehoben werden in diesem metaphorischen Konzept das über lange Zeiträume stabile dynamische Gleichgewicht eines biogeochemischen Kreislaufs und seine Beeinflussung durch den Menschen. Verdeckt werden hingegen die stetige Veränderung innerhalb eines dynamischen Gleichgewichts und die Existenz des Menschen als Teil der Natur.

In der häufig auftretenden Kombination mit dem Natürlich-Künstlich-Schema bekommt die Gleichgewichtsmetapher zusätzlich wertende Eigenschaften. Vom Menschen unberührte Systeme werden meist als im Gleichgewicht befindlich dargestellt. Erst der Mensch führt ein Ungleichgewicht herbei. Dadurch wird ein Gleichgewicht als gut und ein Ungleichgewicht als schlecht bezeichnet. Dies deckt sich mit den dem Gleichgewichtsschema zugrunde liegenden Erfahrungen und auch dem naturhistorischen Ökologieverständnis (Egerton 1973; Spencer 1882). Die Ökosystemforschung kann jedoch nicht begründen, warum ein bestimmter Zustand der Zusammensetzung

zung eines Systems mit bestimmten Systemzuständen aufrechterhalten werden sollte und damit erstrebenswert ist (vgl. Janich & Weingarten 1999, S. 172).

Über den Einfluss des Menschen hinaus werden vom IPCC auch natürliche Störungen des Kohlenstoffkreislaufs benannt:

„[...] perturbation arising from the Mt. Pinatubo volcanic eruption“ (IPCC: S. 533, 8)

Das IPCC bezieht somit Störungen nicht ausschließlich auf den Menschen. Neben künstlichen Störungen, werden auch Abweichungen von einem ausgeglichenen Idealzustand berücksichtigt. Somit ist das Konzept *Störung ist Abweichung vom Normalzustand* das den IPCC leitende Konzept. Ähnliches argumentiert auch Houghton, der einen *Gleichgewichtszustand als Normalzustand* betrachtet:

„Time taken for a perturbation in the atmospheric carbon dioxide concentration to relax to an equilibrium cannot be described by a single time constant“ (Houghton: S. 253, 3)

Schlesinger beschreibt neben verstärkten Kohlenstoffflüssen in die Atmosphäre auch eine Verringerung der Nettoprimärproduktion als Folge menschlicher Aktivitäten:

„as a result of inadvertent activities [...] humans may have reduced total net primary production by up to 25 to 40%“ (Schlesinger: S. 147, 1)

Auf Ebene des Speicher-Fluss-Systems lassen sich somit drei Ursachen eines Ungleichgewichts beschreiben, die in Tabelle 6.7 dargestellt sind.

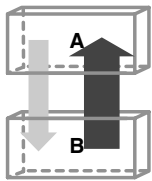
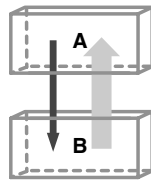
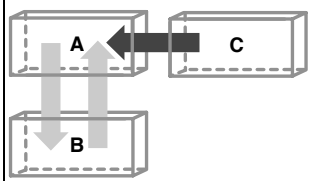
	Ungleichgewicht durch... stärkere Flussrate	verringerte Flussrate	zusätzlichen Kohlenstofffluss
Beispiel	Die Abholzung setzt zusätzlichen Kohlenstoff aus der Vegetation in die Atmosphäre frei.	Durch die Abholzung sinkt die Nettoprimärproduktion.	Durch die Verbrennung wird Kohlenstoff aus dem zusätzlichen Kohlenstoffspeicher fossiler Kohlenstoff freigesetzt.
Schema	Die Flussrate wird einseitig erhöht. 	Die Flussrate wird einseitig verringert. 	Stoffe aus weiteren Speichern werden ins System gebracht. 

Tabelle 6.7 Ungleichgewichte im Speicher-Fluss-Schema

Stoffflüsse im Ausgangszustand sind hell, das Ungleichgewicht verursachende Flüsse dunkel gekennzeichnet.

Ein Ungleichgewicht in einem Speicher-Fluss-System führt immer zu einer Verlagerung von Stoffen (z. B. Kohlenstoff) von einem Speicher (z. B. fossiler Kohlenstoff, Vegetation) in einen anderen (z. B. Atmosphäre). In der Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT führen die Aktivitäten des Menschen (Abholzung, Verbrennung) zu einer Kombination der drei Ursachen für Ungleichgewichte: *Verbrennung setzt zusätzlichen Kohlenstoff aus fossilen Energieträgern frei, Abholzung setzt mehr Kohlenstoff aus der Vegetation frei und Abholzung verringert Koh-*

lenstoffbindung in der Vegetation. Der Kohlenstoffspeicher *Vegetation* verkleinert sich somit, da Kulturland weniger Kohlenstoff enthält als Urwälder (Schlesinger: S. 147, 2). Die Denkfigur kann wie folgt verallgemeinert werden:

Denkfigur: Anthropogenes Ungleichgewicht				
Durch die vom Menschen induzierten Kohlenstoffflüsse Verbrennung und Abholzung wird das dynamische Gleichgewicht im Kohlenstoffkreislauf durch zusätzliche Kohlenstoffflüsse, verstärkte Flussraten und verringerte Rückflussraten gestört. Die Kohlenstoffspeicher <i>Vegetation</i> und fossile Energieträger werden teilweise entleert.				
Der Denkfigur sind folgende Konzepte zugeordnet:	Schlesinger	Houghton	Smith & Smith	IPCC
Zusätzlicher Kohlenstofffluss Durch Verbrennung. Die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs ist ein vom Menschen verursachter, zusätzlicher Kohlenstofffluss.	+	+	+	+
Verstärkter Kohlenstofffluss Durch Abholzung. Die Abholzung von Wäldern ist ein vom Menschen verstärkter Kohlenstofffluss in die Atmosphäre.	+	+	+	+
Abholzung verringert Kohlenstofffluss in die Vegetation. Durch die Zerstörung von <i>Vegetation</i> wird weniger Kohlenstoff in der <i>Vegetation</i> gebunden.	+			
Mensch Stört Kohlenstoffkreislauf. Die vom Menschen verursachten Kohlenstoffflüsse stören den natürlichen Kohlenstoffkreislauf.	+	+		+
Gleichgewicht Ist Normalzustand. Ohne Störungen ist der Kohlenstoffkreislauf im Gleichgewicht.		+		+

Tabelle 6.8: Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT

6.3.6 Denkfigur: Erdgeschichtliches Ungleichgewicht

Alle Wissenschaftler beschreiben die derzeitige CO_2 -Konzentration als auf einem geschichtlichen Höchststand befindlich. Die verglichenen Zeitskalen reichen dabei von einigen hundert Jahren (Smith & Smith, Houghton) bis hin zu 650.000 Jahren (IPCC):

„ CO_2 is not unprecedented in the geologic record, our concern is the speed at which a basic characteristic of the planet has changed to levels not previously experienced during human history“ (Schlesinger: S. 370, 3)

„The [...] carbon dioxide concentration [grew] since the preindustrial era for about 30%.“ (Houghton: S. 250, 2)

„ CO_2 concentrations over the past 300 years [...] fluctuate between 280 and 290 ppm. After the onset of the Industrial Revolution the value increased [...] exponentially by the mid-19th century onward.“ (Smith & Smith: S. 632, 6)

Earth system has not experienced current atmospheric concentrations of CO_2 [...] for at least 650.000 years.“ (IPCC: S. 511, 5)

Unabhängig von der betrachteten Zeitdimension wird von allen Wissenschaftlern das Konzept *CO₂-Konzentration auf geschichtlichem Höchststand* beschrieben. Schlesinger nimmt zusätzlich eine evolutionsbiologische Einordnung der derzeitigen CO_2 -Konzentration als geologisch nicht einmalig, aber für den Menschen einmalig im Konzept *Unerlebte CO₂-Konzentration* vor.

Der IPCC und auch Schlesinger bringen zusätzlich die heutige Freisetzung von Kohlenstoff mit einer Bindung von Kohlenstoff in geologischen Zeiträumen in Verbindung:

„During Earth's history, at times when the production of organic carbon by photosynthesis has exceeded its decomposition, organic carbon has accumulated in geologic sediments.“ (Schlesinger: S. 369, 1)

„Burning fossil fuels returns carbon captured by plants in earth's geological history to the atmosphere.“ (IPCC: S. 511, 5)

Dem IPCC und Schlesinger zufolge wurde in der Erdgeschichte CO₂ aus der Atmosphäre entfernt und in Sedimenten gespeichert. Der derzeitige Klimawandel wird dadurch ausgelöst, dass der Mensch den in geologischen Zeiträumen gespeicherten Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre verlagert. Das Ungleichgewicht im Kohlenstoffkreislauf ist somit auf eine Ungleichzeitigkeit von Speicherung und Freisetzung zurückzuführen.

Von Schlesinger wird nicht nur die zeitlich versetzte Speicherung und Freisetzung von Kohlenstoff, sondern auch die Beschleunigung von Kohlenstoffflüssen als ursächlich für den Klimawandel betrachtet:

„the global carbon cycle [accelerated] from processes that occur on a time scale of 10⁹ years to those that occur annually“ (Schlesinger: S. 371, 2)

Aus Perspektive des Speicher-Fluss-Systems handelt es sich bei der erdgeschichtlichen Kohlenstofffixierung und der derzeitigen Freisetzung durch Verbrennung um Ungleichgewichte in einem dynamischen System:

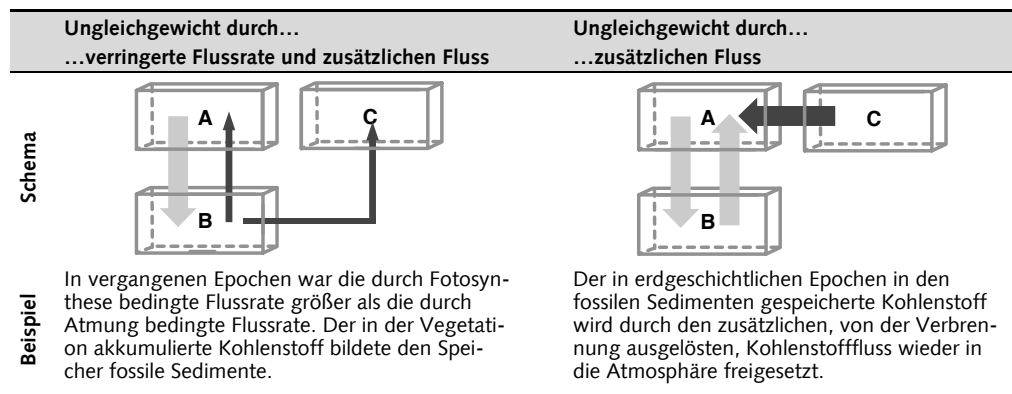


Tabelle 6.9 Prinzip des erdgeschichtlichen Ungleichgewichts

Eine Analyse der den Ungleichgewichten zugrunde liegenden Prozesse macht deutlich, dass die erdgeschichtliche Kohlenstofffixierung und die derzeitige Freisetzung auf Ebene des Speicher-Fluss-Schemas die gleichen Ursachen haben: Einen zusätzlichen Kohlenstofffluss. Unterschiede zeigen sich in der Richtung des Flusses (*in die Atmosphäre vs. aus der Atmosphäre*), der Geschwindigkeit des Flusses (*Millionen Jahre vs. Hunderte Jahre*) und der Ursache des Flusses (*Mehr Fotosynthese als Atmung vs. Verbrennung*). Mit der Verbrennung wird damit der in erdgeschichtlichen Zeiträumen der Atmosphäre entzogene und in fossilen Sedimenten gespeicherte Kohlenstoff wieder der Atmosphäre zugeführt.

Die Denkfigur kann wie folgt verallgemeinert werden:

Denkfigur: Erdgeschichtliches Ungleichgewicht				
In geologischen Zeiträumen wurde der Atmosphäre Kohlenstoff entzogen und in den Sedimenten gespeichert. Dieser Kohlenstoff wird nun in kurzer Zeit wieder freigesetzt.				
Der Denkfigur sind folgende Konzepte zugeordnet:	Schlesinger	Houghton	Smith&Smith	IPCC
CO₂-Konzentration auf geschichtlichem Höchststand. Die CO ₂ -Konzentration ist so hoch wie seit mehreren hunderttausend Jahren nicht.	+	+	+	+
Unerlebte CO₂-Konzentration. Die derzeitige CO ₂ -Konzentration wurde vom Menschen bisher nicht erlebt.	+			
Erdgeschichtliche Speicherung von Kohlenstoff in Sedimenten. Über Millionen von Jahren wurde Kohlenstoff der Atmosphäre entzogen und in Sedimenten gespeichert.	+			+
Freisetzung erdgeschichtlich gebundenen Kohlenstoffs. Das Verbrennen fossiler Brennstoffe setzt den erdgeschichtlich gebundenen Kohlenstoff in die Atmosphäre frei.	+			+
Der Mensch beschleunigt Kohlenstoffflüsse. Der Mensch hat durch die Verbrennung fossiler Energieträger den in geologischen Zeiträumen gebundenen Kohlenstoff in wenigen Jahren wieder freigesetzt.	+			

Tabelle 6.10: Denkfigur ERDGESCHICHTLICHES UNGLEICHGEWICHT

6.3.7 Denkfigur: Reagierender Kohlenstoffkreislauf

Alle Wissenschaftler beschreiben eine Reaktion des Kohlenstoffkreislaufs auf die erhöhte atmosphärische CO₂-Konzentration:

- „A decrease in the amount of carbon stored as carbonates could lead to a greater retention of CO₂ in the oceans. [...] The biosphere is more likely to buffer the rise of CO₂ as a result of human activities.“ (Schlesinger: S. 370, 2; 371, 2)
- „of the carbon dioxide emissions from fossil fuel burning approximately 40% remained in the atmosphere, the remainder being roughly equally divided between land biosphere and ocean“ (Houghton: S. 252, 3)
- „The estimate of annual uptake of carbon dioxide by the oceans for the period of the 1990s is 2.4 gigatons [...] net uptake of carbon by terrestrial ecosystems may result from reforestation in the temperate regions of the Northern Hemisphere“ (Smith & Smith: S. 633, 4, 6)
- „Oceans are estimated to have taken up approximately 30 % of the increased concentration of CO₂ [...]. Terrestrial ecosystems have taken up the rest through growth of replacement vegetation on cleared land, land management practices and the fertilizing effects.“ (IPCC: S. 515, 3)

Ein Teil des zusätzlich freigesetzten atmosphärischen Kohlenstoffs wird im Ozean und in der Vegetation gebunden, wobei die Schätzungen über die Anteile der jeweiligen Aufnahme in den Quellen unterschiedlich sind. Diese zusätzliche Kohlenstoffaufnahme wird von Schlesinger (S. 370, 1) und dem IPCC (S. 531, 1) als Puffer bezeichnet, während Houghton sowie Smith und Smith zwar den Terminus nicht nutzen, aber die gleiche Vorstellung beschreiben. Deutlich wird darüber hinaus die Vorstellung, dass ein Teil des zusätzlichen CO₂ vom Ozean aufgenommen wird (*Ozeane nehmen Teil des zusätzlichen CO₂ auf*). Die Kohlenstoffspeicherung im Ozean wird laut Schlesinger (S. 361, 4) Smith und Smith (S. 634, 2) und dem IPCC (S. 514, 4) durch die Austauschprozesse zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser limitiert. Die Aufnahme von zusätzlichem Kohlenstoff in die Vegetation (*Vegetation nimmt Teil des zusätzlichen CO₂ auf*) wird von allen Quellen beschrieben. Das IPCC und Schlesinger sind hingegen widersprüchlich in

ihren Aussagen: Einerseits wird eine verstärkte Bindung von Kohlenstoff durch die so genannte Kohlenstoffdüngung fragend beschrieben (*Kohlenstoffbindung durch CO₂-Düngung?*):

„Since saturation of CO₂ stimulation due to nutrient or other limitations is common, it is not clear how strong the CO₂ fertilization effect actually is.“ (IPCC: S. 527, 1)

„The availability of water or nutrients in many ecosystems may limit potential increases in plant productivity under elevated CO₂ concentration: [...] biomass production [...] ranged from an increase of 85 percent to a decline of almost 20 percent.“ (Smith & Smith: S. 635, 5)

Andererseits wird die Bilanz der Kohlenstoffspeicherung in der Vegetation durch den Verbrauch fossiler Energieträger zur Produktion von Stickstoffdüngern und die Entwaldung verschlechtert (S. IPCC 515, 1; Schlesinger: S. 147, 2; 148, 3; Smith & Smith: S. 635). Deshalb müsse es noch eine unbekannte Senke für CO₂ geben (Schlesinger: S. 362, 1; Smith und Smith: S. 633, 6; IPCC: S. 520, 2).

Schlesinger begreift den Kohlenstoffkreislauf explizit auf der Modellebene als Speicher-Fluss-Schema und argumentiert nicht nur kontextbezogen. Er beschreibt auf der Modellebene Veränderungen des Kohlenstoffkreislaufs, wenn er feststellt, dass die vorhandenen Kohlenstoffflüsse nicht ausreichen, um die zusätzlichen Kohlenstoffflüsse auszugleichen oder Zuflüsse zu kleinen Speichern große Auswirkungen haben.

„The carbon flux in rivers or sinking pteropods cannot serve as a net sink for anthropogenic CO₂ in the ocean, unless the flux in these pathways is greater as a result of human activities. [...] small changes in large pools of carbon can have a dramatic impact on the carbon dioxide content of the atmosphere“ (Schlesinger: S. 266, 1-2)

Dabei beschreibt er als Möglichkeit zum Ausgleich der gestiegenen CO₂-Konzentration nicht primär eine Reduktion der anthropogenen CO₂-Emissionen, sondern sucht nach möglichen zusätzlichen Kohlenstoffflüssen, wie z. B. eine verstärkte Nettoprimärproduktion oder auf langen Zeitskalen eine verstärkte Sedimentierung.

Aus Perspektive des Speicher-Fluss-Schemas handelt es sich bei der Reaktion des Kohlenstoffkreislaufs auf den zusätzlichen Kohlenstoff in der Atmosphäre um eine Verschiebung des Gleichgewichts. Dies ist auf das von Le Chatelier (1884) für die Thermodynamik formulierte und durch Von Bertalanffy (1950) für belebte Systeme adaptierte *Prinzip des kleinsten Zwangs* zurückzuführen:

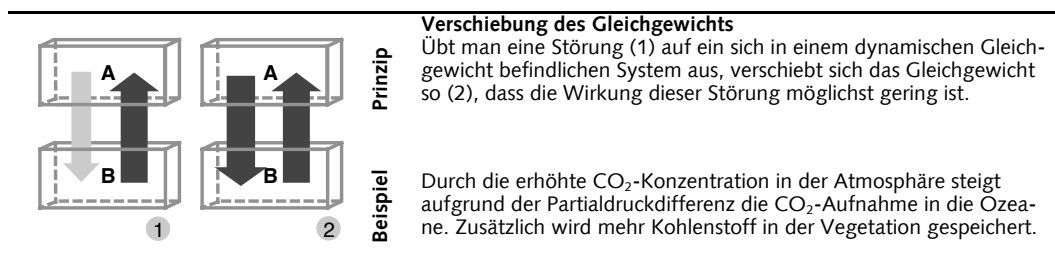


Tabelle 6.11 Verschiebung des Gleichgewichts

Das dynamische Gleichgewicht im Kohlenstoffkreislauf reagiert somit auf die Störung durch den Menschen indem es den zusätzlichen Kohlenstoff in der Atmosphäre in den Speichern Landbewesen und Ozeane – langsam – umverteilt. Die fragend diskutierte Effektivität der CO₂-Düngung bei gleichzeitiger Feststellung einer zusätzlichen Kohlenstoffaufnahme in der Vegetati-

on zeigt, dass die Verschiebung des Gleichgewichts nicht allein auf physiologischen und physikalischen Mechanismen beruht, sondern durch einen Einfluss des Menschen befördert (z. B. Aufforstung) oder gestört (z. B. Abholzung) werden kann.

Der IPCC und Houghton beschreiben auch eine zeitliche Dimension der Kohlenstoffflüsse:

„About 50 % of a CO₂ increase will be removed from the atmosphere within 30 years, and a further 30 % will be removed within a few centuries. The remaining 20 % may stay in the atmosphere for many thousands of years.“ (IPCC: S. 501, 6)

„On century time scales nearly all the anthropogenic carbon emitted into the atmosphere is not lost to these reservoirs but distributed amongst them.“ (Houghton: S. 252, 2)

Daraus geht das der Regelungstechnik entlehnte Konzept der *Totzeit* hervor. Damit wird die Zeitspanne zwischen einer Änderung am Systemeingang und der Antwort am Systemausgang bezeichnet. Aufgrund der Totzeit bleibt der in die Atmosphäre freigesetzte Kohlenstoff eine zeitlang in der Atmosphäre, bevor er unter den anderen Speichern verteilt werden kann. Systemdynamisch ist die Totzeit an die Änderung der Flussraten gekoppelt.

Die Denkfigur kann wie folgt verallgemeinert beschrieben werden:

Denkfigur: Reagierender Kohlenstoffkreislauf				
Durch die gestiegene atmosphärische CO ₂ -Konzentration verändern sich die Raten der Kohlenstoffflüsse. Ein Teil des zusätzlichen Kohlenstoffs wird von den Ozeanen und der Vegetation aufgenommen.				
Der Denkfigur sind folgende Konzepte zugeordnet:	Schlesinger	Houghton	Smith&Smith	IPCC
Der Ozean nimmt zusätzlichen Kohlenstoff teilweise auf. Eine höhere CO ₂ -Konzentration führt zu einer verstärkten Kohlenstoffspeicherung im Ozean.	+	+	+	+
Langsamer Tiefenwasseraustausch begrenzt Pufferung. Da Oberflächen- und Tiefenwasser nur langsam ausgetauscht werden, kann nur ein Teil des zusätzlichen CO ₂ aufgenommen werden.	+		+	+
Die Vegetation nimmt zusätzlichen Kohlenstoff teilweise auf. In der Vegetation wird ein Teil des zusätzlich in die Atmosphäre freigesetzten Kohlenstoffs gespeichert.	+	+	+	+
Kohlenstoffspeicherung durch CO₂-Düngung. Durch die erhöhte CO ₂ -Konzentration wird mehr Kohlenstoff in die Vegetation aufgenommen.			?	?
Unbekannte Kohlenstoffsénke. In der globalen Kohlenstoffbilanz gibt es eine Lücke, da mehr Kohlenstoff gebunden wurde als errechnet wurde.	+		+	+

Tabelle 6.12: Denkfigur REAGIERENDER KOHLENSTOFFKREISLAUF

6.3.8 Vorstellungen zum Inhalt der Speicher

Der Übergang von Kohlenstoff von den Landlebewesen und den Ozeanen in die Atmosphäre und umgekehrt wird in der Regel mithilfe von *Einfangen-Freisetzen*-Konzepten analog dem Konzept *Verbrennen ist Freisetzen* beschrieben. Der Betrachtung des Kohlenstoffkreislaufs liegt dabei ein Speicher-Fluss-Schema zugrunde, in dem Kohlenstoff von den Speichern Ozeane und Vegetation in den Speicher Atmosphäre fließt – und zurück (vgl. Kapitel 2.2.4):

„CO ₂ is <u>exchanged</u> between the atmosphere and the ocean“	(IPCC: S. 514, 4)
„burning fossil fuels <u>returns</u> carbon <u>captured</u> by plants“	(IPCC: S. 511, 3)
„ <u>release</u> of CO ₂ <u>from</u> terrestrial vegetation“	(Schlesinger: S. 362, 2)
„oceans can <u>take up</u> carbon“	(Schlesinger: S. 361, 4)
„ <u>exchanges</u> of CO ₂ <u>between</u> the landmass and the atmosphere“	(Smith & Smith: S. 481,3)
„ <u>exchange</u> of carbon <u>between</u> atmosphere and ocean“	(Smith & Smith: S. 480,3)
„the carbon dioxide <u>emissions from</u> fossil fuel burning“	(Houghton: S. 252, 3)
„carbon <u>emitted into</u> the atmosphere“	(Houghton: S.252, 3)

Unterschiede zeigen sich dabei in der Betrachtung des fließenden Stoffes, also des Trajektors im Rahmen des Speicher-Fluss-Schemas. Zwar werden die Flussraten und Massen der Kohlenstoffspeicher grundsätzlich in Gigatonnen bzw. 10¹⁵ g Kohlenstoff angegeben. Jedoch werden gleichzeitig die Flüsse qualitativ von allen Wissenschaftlern synonym als Kohlenstoffflüsse und CO₂-Flüsse beschrieben. Die Konzepte *CO₂ fließt im Kohlenstoffkreislauf* und *Kohlenstoff fließt im Kohlenstoffkreislauf* werden häufig parallel genutzt. Die expliziteste Verknüpfung zwischen Kohlenstoff und CO₂ beschreiben Houghton und der IPCC mit dem Konzept *CO₂ Enthält Kohlenstoff* bzw. Smith und Smith mit dem Konzept *CO₂ Ist Kohlenstoffquelle*:

„movements of carbon in the form of carbon dioxide“	(Houghton: S. 252, 3),
„respiration returns carbon to the atmosphere as CO ₂ “	(IPCC: S. 514, 2),
„the source of all carbon [...] is carbon dioxide“	(Smith & Smith: S.478, 3)

Bei Schlesinger enthalten die einzelnen Speicher Kohlenstoff in unterschiedlicher Form: Ozeane größtenteils als anorganischen Kohlenstoff (Schlesinger: S. 360, 1), die Atmosphäre als anorganisches CO₂ (Schlesinger: S. 361, 2) und die Vegetation als organischen Kohlenstoff (Schlesinger: S. 367, 2). Er beschreibt dabei die unterschiedlichen Konstitutionen des Kohlenstoffs in den verschiedenen Speichern, ohne das Konzept *Verbrennen Ist umwandeln* zu nutzen. Wendungen, wie

„the release of CO ₂ in fossil fuels“	(Schlesinger: S. 361, 2)
„CO ₂ release from fossil fuels enters the atmosphere“	(Schlesinger: S. 361, 3)

können die Vorstellung *Fossile Energieträger enthalten CO₂* evozieren, nach der CO₂ bereits in fossilen Energieträgern enthalten ist und durch die Verbrennung nur noch freigesetzt wird. Im Gesamtkontext äußert Schlesinger reflektiertere Vorstellungen, sodass hier von einer unvorsichtigen Formulierung ausgegangen werden kann. Die Vorstellung wird der Vollständigkeit wegen als Parallelkonzept aufgenommen.

Der IPCC hingegen nutzt zur Beschreibung der Übergänge zwischen verschiedenen Kohlenstoffvorkommen das Konzept *Entfernen Ist Umwandeln*:

„the removal of [CO ₂] from the atmosphere by conversion to a different chemical compound“	(IPCC: S. 512, 1)
--	-------------------

Damit wird neben der räumlichen Perspektive auf die Kohlenstoffvorkommen auch eine stoffliche Perspektive auf den Kohlenstoffkreislauf eingenommen. Smith und Smith betrachten den Kohlenstoff aus stofflichen und energetischen Aspekten, wenn sie die untrennbare Verbindung zwischen Kohlenstoff- und Energiefluss betonen und machen damit das Konzept *Kohlenstoffflüsse sind Energieflüsse* deutlich:

„Carbon is so closely tied to energy-flow that the two are inseparable“	(Smith & Smith: S. 478,2)
---	---------------------------

In seiner Argumentation zur Bindung des anthropogenen CO₂ ist Houghton widersprüchlich: So beschreibt er die lange Lebenszeit des CO₂ als ursächlich für den Verbleib des zusätzlichen Kohlenstoffs in der Atmosphäre (*CO₂ Hat Lange Lebenszeit*):

„Because of the long lifetime a substantial proportion of the carbon dioxide emitted [...] from human activities today will affect its atmospheric concentration up to a century and more from now.“ (Houghton: S. 253, 3)

Der Quellbereich *Lebenszeit* ist fachlich nicht angemessen zur Beschreibung der Verweildauer des CO₂ in der Atmosphäre: Der Verbleib von CO₂ in der Atmosphäre ist nicht durch seine „Lebenszeit“, sondern durch den begrenzten Zuwachs der gespeicherten Kohlenstoffmenge in den übrigen Speichern und somit der Totzeit der Atmosphäre gekennzeichnet. Die Metapher *CO₂ Hat Lange Lebenszeit* ist somit im Kontext logisch inkonsistent. Die Vorstellungen zum Trajektor im Kohlenstoffkreislauf lassen sich somit wie folgt verallgemeinern und strukturieren:

Konzepte	Schlesinger	Houghton	Smith&Smith	IPCC
Atmosphäre enthält CO₂. Die Atmosphäre ist ein CO ₂ -Speicher.	+	+	+	+
Atmosphäre enthält Kohlenstoff. Die Atmosphäre ist ein Kohlenstoffspeicher.	+	+	+	+
CO₂ enthält Kohlenstoff. CO ₂ ist eine Speicherform von Kohlenstoff.	+	+	+	+
Fossile Energieträger enthalten CO₂. Fossile Energieträger sind ein Speicher für CO ₂ .	+			
Kohlenstofffluss ist Energiefluss. Mit Kohlenstoff wird Energie transportiert.			+	
CO₂ Hat Lange Lebenszeit. Das CO ₂ verbleibt durch seine lange Lebenszeit in der Atmosphäre.	+			

Tabelle 6.13: Konzepte zum im Kohlenstoffkreislauf fließenden Stoff

6.3.9 Denkfigur: Unterschiedliches CO₂

Schlesinger, Houghton und der IPCC beschreiben eine veränderte Zusammensetzung der Atmosphäre über verschiedene Kohlenstoffisotope, was sich auch auf die Bindungsfähigkeit des atmosphärischen Kohlenstoffs in der Biosphäre auswirkt:

„Photosynthesis discriminates against ¹³CO₂ in favour of ¹²CO₂ [...]. Plant tissue dilute [...] ¹³CO₂, when they are burned [...]. Fossil fuels contain no ¹⁴C [...] burning fossil fuels also dilutes ¹⁴CO₂.“ (Schlesinger: S. 147, 4)

„growth [...] of CO₂ has been largely due to the burning of fossil fuels as is evidenced from carbon isotope studies with a significant contribution resulting from deforestation“ (Houghton: S. 250, 5)

„the carbon-13 isotope is less abundant in vegetation and in fossil fuels that were formed from past vegetation. The relative amount of the carbon-13 isotope in the atmosphere has been declining, showing that the added carbon comes from fossil fuels and vegetation“ (IPCC: S. 512, 5)

Die Atmosphäre enthält die Isotope ^{12}C , ^{13}C und ^{14}C in absteigender Häufigkeit. Fossile Energieträger enthalten so gut wie kein ^{14}C , die Vegetation enthält wenig ^{13}C und ^{14}C . Die Konzepte sind somit: *CO₂ aus Verbrennung enthält ^{12}C* , *CO₂ aus Abholzung enthält ^{12}C* und *Verbrennung und Abholzung verschieben Isotopenverhältnis*.

Die Differenzierung der CO₂-Isotope erfolgt dabei nicht zwischen *CO₂ aus der Verbrennung* und *CO₂ aus der Atmung*, wie in den Vorstellungen der Lerner beschrieben wird (vgl. Kapitel 7.3), sondern anhand des in der Atmosphäre vorhandenen CO₂ und des durch *Verbrennung* und *Abholzung zusätzlich hinzugefügten CO₂*. Die Vorstellungen lassen sich somit wie folgt zu nachstehender Denkfigur verallgemeinern und strukturieren:

Denkfigur: Unterschiedliches CO₂				
Das durch die Verbrennung und Abholzung freigesetzte CO ₂ hat eine andere Isotopenzusammensetzung als das natürliche CO ₂ .				
Der Denkfigur sind folgende Konzepte zugeordnet:	Schlesinger	Houghton	Smith&Smith	IPCC
CO₂ aus Verbrennung enthält ^{12}C. In den fossilen Energieträgern sind überdurchschnittlich viele ^{12}C -Isotope gebunden, sodass bei der Verbrennung viel ^{12}C frei wird.	+	+		+
CO₂ aus Abholzung enthält ^{12}C. In der Vegetation sind überdurchschnittlich viele ^{12}C -Isotope gebunden, sodass bei der Abholzung viel ^{12}C frei wird.	+	+		+
CO₂ in der Atmosphäre enthält ^{12}C, ^{13}C und ^{14}C. In der Atmosphäre sind in absteigender Menge ^{12}C , ^{13}C und ^{14}C -Isotope enthalten.	+	+		+
Verbrennung und Abholzung verschieben Isotopenverhältnis. Die Kohlenstofffreisetzung aus der Vegetation und den fossilen Energieträgern erhöht den ^{12}C -Anteil in der Atmosphäre.	+	+		+

Tabelle 6.14: Konzepte zur Denkfigur UNTERSCHIEDLICHES CO₂

6.3.10 Fachlich geklärte Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf

Ziel dieses Abschnittes ist die Zusammenführung zentraler Ergebnisse dieses Kapitels zur Vermittlung des Kohlenstoffkreislaufs im Rahmen des Klimawandels.

Erdgeschichtlicher und moderner Kohlenstoffkreislauf

Die Analyse der Wissenschaftlervorstellungen zeigt, dass Wissenschaftler biogeochemische Kreisläufe wie den Kohlenstoffkreislauf mithilfe des Speicher-Fluss-Schemas und des Gleichgewichtsschemas beschreiben. Im Folgenden sind die für den Klimawandel relevanten erdgeschichtlichen und modernen Gleichgewichte und Ungleichgewichte im Kohlenstoffkreislauf aufgeführt. In der Darstellung in Tabelle 6.15 werden den Veränderungen im Kohlenstoffkreislauf die jeweiligen Grundlagen aus Perspektive des dynamischen Gleichgewichts im Speicher-Fluss-Schema gegenübergestellt.

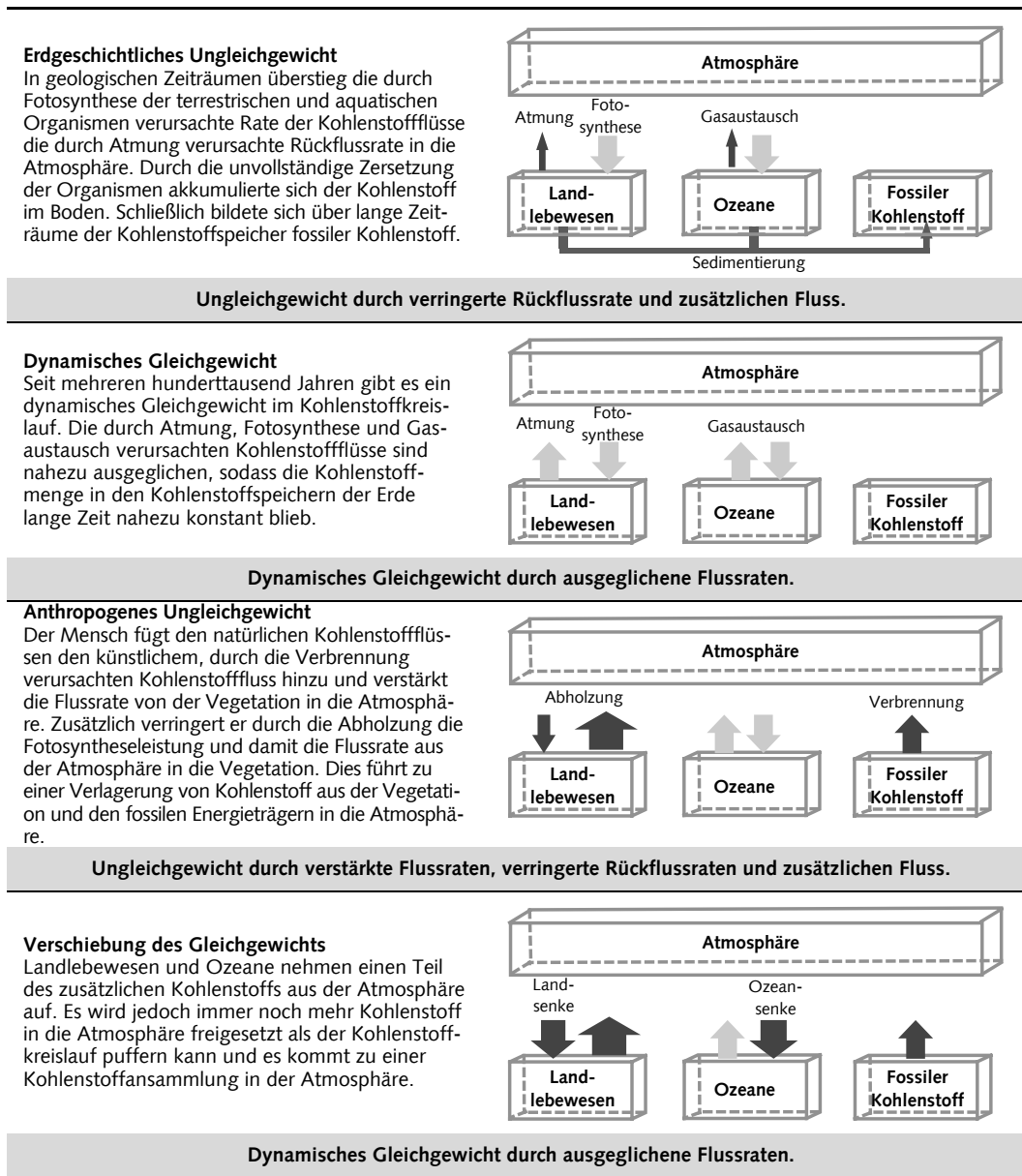


Tabelle 6.15: Erdgeschichtlicher und moderner Kohlenstoffkreislauf

Bei der Beschreibung von ausgeglichenen Kohlenstoffflüssen ist zu beachten, dass es sich aus fachlicher Sicht beim Gleichgewicht lediglich um ein Modell handelt, das in der Wirklichkeit keine Korrespondenz findet. Auch wenn Cuddington (2007, S. 464) und Egerton (1973) die Idee des Gleichgewichts als theoriebildende Metapher der Ökologie beschreiben, ist ihre Anwendung auf den Kohlenstoffkreislauf zwar geläufig, aber mit einer großen fachlichen Unschärfe belegt.

Moderner Kohlenstoffkreislauf

Der Kohlenstoffkreislauf mit seinen derzeit gespeicherten Kohlenstoffmassen und Flussraten kann fachlich geklärt wie folgt beschrieben werden:

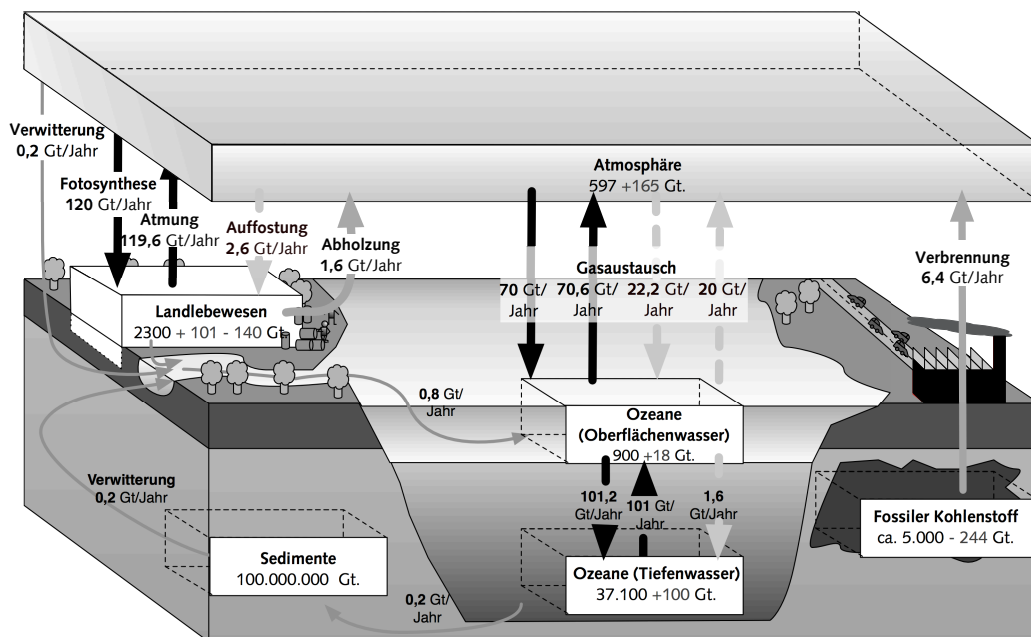


Abbildung 6.6: Moderner Kohlenstoffkreislauf

Natürliche verursachte Kohlenstoffflüsse sind schwarz, künstlich verursachte hellgrau und die Anpassungen des Kohlenstoffkreislaufs gestrichelt dargestellt. Die für den Klimawandel nicht relevanten Kohlenstoffflüsse und Speicher sind dünn eingezeichnet. Die gespeicherten Kohlenstoffmassen und Flussraten sind dem IPCC-Bericht als aktuellster Quelle entnommen.

6.4 Wissenschaftlervorstellungen zum Treibhauseffekt

Svante Arrhenius beschrieb 1896 als erster die Wirkungen des CO_2 auf das Klima und legte damit den Grundstein für die Forschung zur Rolle der klimaaktiven Gase im Treibhauseffekt. Die Rolle des Treibhauseffekts und der gestiegenen Treibhausgaskonzentration für das Weltklima war lange umstritten. 1999 hat die Deutsche Meteorologische Gesellschaft (DMG) den Stand der Wissenschaft zu den veränderten Strahlungsflüssen in der Atmosphäre zusammengetragen und als Konsens veröffentlicht, der im Folgenden analysiert wird. Darüber hinaus wird mit *Physics of the Atmospheres* von John Houghton (2001) ein Standardwerk der Klimatologie in seinen für die Fragestellung zentralen Kapiteln (Climate and Climate Change, S. 250-260) untersucht. Um den aktuellen Stand der Wissenschaft zu erfassen und zu analysieren wurden darüber hinaus Teile des Vierten Sachstandsberichts des Weltklimarats IPCC analysiert (What Factors Determine Earth's Climate? 96-97; und What is the Greenhouse Effect? 115-116; Concept of Radiative Forcing. 133-136. Die Literaturangaben bei der DMG beziehen sich ob der Kürze des Dokuments auf Absätze (z. B. DMG, 5). Die Auswahl der Literatur wurde mit Experten der Klimatologie (Prof. Dr. Stefan Rahmsdorf, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung und Prof. Dr. Thomas Hauf, Leibniz Universität Hannover) abgestimmt.

6.4.1 Quellen der Vorstellungen: Die Atmosphäre als Behälter

Die globale Erwärmung wird von allen untersuchten Wissenschaftlern auf eine Veränderung der atmosphärischen Strahlungsbilanz im Rahmen des Treibhauseffekts zurückgeführt. Als Grundlage der Erklärung wird das Behälterschema genutzt. Dabei werden meist Erde und Atmosphäre als Behälterinneres konzeptualisiert, um die Strahlungsflüsse zwischen Innen und Außen, also Erde und Weltraum zu beschreiben:

„the solar radiation coming in is balanced by thermal radiation leaving the top of the atmosphere“ (Houghton: S. 257, 1)

„incoming solar radiation and outgoing infrared (thermal) radiation“ (IPCC: S. 136, 5)

Dabei wird mit dem Konzept *Atmosphäre Ist ein Behälter* ein fiktiver Oberrand der Atmosphäre genutzt, um Strahlungsgleichgewichte zwischen der Atmosphäre und dem Weltraum zu beschreiben. Bei der Erde mitsamt ihrer Atmosphäre ist die Beschreibung der Grenzen aber auch nicht vollends möglich: Die Atmosphäre geht graduell in den Weltraum über und zeichnet sich durch eine Abnahme der Teilchendichte aus. Aber eine Grenze, die als fester Übergang gedacht werden kann, existiert nicht. Da der Erdball mit Atmosphäre jedoch von einem leeren Raum umgeben ist, sind die Energieflüsse zwischen Atmosphäre und Weltall im Modell relativ genau zu erfassen.

Daneben beschreiben der IPCC und auch Houghton weitere, parallele Konzepte, denen zufolge die Atmosphäre weitere Sphären, also weitere Behälter enthält:

„radiation at the top of the troposphere [...] change in the downward radiation from the stratosphere“ (Houghton: S. 257, 2)

„radiative forcing at either the top of the atmosphere or the tropopause can be substituted“ (IPCC: S. 134, 2)

Das Konzept *Atmosphäre Enthält Behälter* wird ebenfalls genutzt, um Strahlungsflüsse und Gleichgewichtsprozesse innerhalb der Atmosphäre zu beschreiben. Die Atmosphäre wird dabei in Stratosphäre und Troposphäre untergliedert. Das Behälterschema wird somit wie folgt für die Atmosphäre genutzt: *Atmosphäre Ist Behälter*, *Stratosphäre Ist Behälter* und *Troposphäre Ist Behälter* (mit der Tropopause als Grenze). Darüber hinaus gilt die Logik *Atmosphäre Enthält Stratosphäre Und Troposphäre* (vgl. Abbildung 6.7).

Zur Beschreibung des Klimawandels wird somit auf die unteren beiden Sphären, die Troposphäre und die Stratosphäre Bezug genommen. Die darüber liegende Mesosphäre, Thermosphäre und Exosphäre werden von keiner der untersuchten Quellen in Rahmen des Klimawandels analysiert, da sie für den Klimawandel keine Rolle spielen.

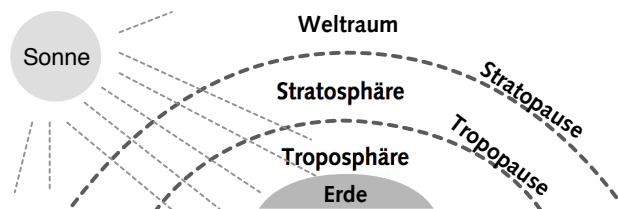


Abbildung 6.7: Erde und Atmosphäre als Speicher-Fluss-Schema

6.4.2 Denkfigur: Strahlungsgleichgewicht

In den untersuchten Quellen wird das Strahlungsgleichgewicht der Atmosphäre unter Nutzung des Gleichgewichtsschemas als ein dynamisches Gleichgewicht beschrieben, in dem im langjährigen Mittel genauso viel Energie abgestrahlt wie eingestrahlt wird:

- „there prevails an equilibrium in the temperature of the [...] atmosphere. (Arrhenius: S. 254, 3)
The atmosphere must radiate as much heat to space as it gains“
- „Der absorbierte Anteil wird in Wärme umgewandelt und muss im (DMG, 2)
Gleichgewichtszustand im infraroten Spektralbereich wieder abgestrahlt
werden.“
- „the radiation budget averaged over longitude and over a complete year (Houghton: S. 50, 1; 257,
[...]. Under natural conditions the net solar radiation coming in is bal- 1)
anced by thermal radiation leaving the top of the atmosphere.“
- „To balance the incoming energy, the earth itself must radiate, on aver- (IPCC: S. 115, 1)
age, the same amount of energy back to space.“

Alle Wissenschaftler rekurren auf das Gleichgewichtsschema zur Erklärung der Strahlungsflüsse in der Atmosphäre (*Strahlungsflüsse Sind Ausgeglichen*). Dabei wird die Energie der eingehenden Sonnenstrahlung u. a. mit der abgehenden Wärmestrahlung verrechnet. Die Nutzung des Gleichgewichtsschemas zur Erklärung der Strahlungsflüsse ist so geläufig wie problematisch: Ständige Veränderungen in der Sonnenaktivität, der Zusammensetzung der Atmosphäre, des Tag-Nacht-Zyklus und der Jahreszeiten beeinflussen die Strahlungsflüsse unablässig. Houghton und der IPCC beschreiben deshalb kein absolutes Strahlungsgleichgewicht, sondern *räumlich und zeitlich durchschnittlich* (Houghton) oder *durchschnittlich* (IPCC) *ausgeglichene Strahlungsflüsse*, die im Konzept *Durchschnittlich ausgeglichene Strahlungsflüsse* zusammengeführt werden können.

Houghton, die DMG und auch der IPCC unterscheiden zwischen verschiedenen Gleichgewichten am Rand der Atmosphäre (siehe o. a. Zitate) und in den unterschiedlichen Atmosphärenschichten (*Unterschiedliche Gleichgewichte in verschiedenen Schichten*):

- „die Erdoberfläche und auch die Troposphäre erwärmt sich [...] Wird (DMG: 4-5)
das Emissionsniveau in eine größere Höhe verschoben, so strahlt die
Stratosphäre in diesem Spektralbereich wegen der höheren Temperatur
mehr Energie ab und muss sich zwangsläufig abkühlen.“
- „Required is the change in net radiation at the top of the troposphere. (Houghton: S. 257, 1+4)
[There is a] change in the downward radiation from the stratosphere
resulting from the changes there [...]. To restore balance the temperature
of the lower atmosphere and the surface will rise.“
- „Radiative forcing [(RF) is] defined as the net flux imbalance at the (IPCC: S. 136, 5)
tropopause. [...] [A] stratospheric-adjusted RF allows stratospheric
temperatures to adjust to reach equilibrium“

In Zusammenhang mit der Beschreibung des Strahlungsgleichgewichts tendieren die verschiedenen Quellen zu einer finalistischen Perspektive auf das Klimasystem. Die Herstellung eines *Gleichgewichts* wird als *Ziel* der Reaktionen des Klimasystems auf die auftretenden Veränderungen der Treibhausgaskonzentration betrachtet, was aus Wendungen, wie „*muss sich*“, „*is required*“, „*restore balance*“ oder „*allows to adjust*“ hervorgeht.

Die Denkfigur kann somit wie folgt verallgemeinert werden:

Denkfigur: Strahlungsgleichgewicht				
Im langjährigen Mittel ist das Verhältnis zwischen der zur Erde eingestrahlichten Energie und von der Erde abgestrahlter Energie ausgeglichen.				
Der Denkfigur sind folgende Konzepte zugeordnet:	Arrhenius	DMG	Houghton	IPCC
Atmosphäre Ist Behälter. Die Atmosphäre ist ein Behälter, der vom Erdboden und Weltall umgeben ist.	+	+	+	+
Strahlungsflüsse Sind Ausgeglichen. Die Strahlungsflüsse zwischen Weltraum und Atmosphäre sind ausgeglichen.	+	+		
Durchschnittlich ausgeglichene Strahlungsflüsse. Die Strahlungsflüsse zwischen Weltraum und Atmosphäre sind durchschnittlich ausgeglichen.			+	+
Atmosphäre Enthält Behälter. Die Atmosphäre besteht aus mehreren klimarelevanten Sphären, zwischen denen Strahlung ausgetauscht wird.		+	+	+
Unterschiedliche Gleichgewichte in unterschiedlichen Schichten. In den unterschiedlichen Atmosphärenschichten herrschen verschiedene Strahlungsgleichgewichte.		+	+	+
Gleichgewicht Ist Ziel. Die Strahlungsflüsse im Klimasystem sind auf die Herstellung eines Gleichgewichts ausgerichtet.		+	+	+

Tabelle 6.16: Denkfigur STRAHLUNGSGLEICHGEWICHT

6.4.3 Denkfigur: Verschiebung des Strahlungsgleichgewichts

Alle untersuchten Quellen führen den aktuellen Klimawandel auf eine veränderte Treibhausgaskonzentration und eine damit stattfindende Veränderung in der Strahlungsbilanz zurück:

„If the quantity of carbonic acid increases in geometric progression, the augmentation of the temperature will increase nearly in arithmetic progression.“ (Arrhenius: S. 267, 1)

„Durch die vom Menschen verursachte Konzentrationszunahme der klimarelevanten Spurengase [...] kann die Erdoberfläche weniger Energie an den Weltraum abgeben [...] und muss sich, um ein neues Energiegleichgewicht zu erreichen, erwärmen.“ (DMG: 5)

„If carbon dioxide concentration is doubled, L [outgoing radiation] is decreased. [...] The imbalance [...] at the top of the atmosphere creates an imbalance in the energy budget there. To restore balance the temperature of the lower atmosphere [...] rises. This change in radiation at the top of the troposphere is known as radiative forcing.“ (Houghton: S. 257, 1-3)

„When radiative forcing from a factor [...] is positive, the energy of the earth-atmosphere system will ultimately increase, leading to a warming of the system. [...] The forcings for all greenhouse gases increases, which are due to human activities, are positive. [...] earth's radiative balance is being pushed away from its normal state.“ (IPCC: S. 136, 3-5)

Zur Beschreibung der Strahlungsflüsse beim Treibhauseffekt wird auf das Gleichgewichtsschema zurückgegriffen, demzufolge die Erde sich normalerweise in einem ausgeglichenen Strahlungsgleichgewicht befindet. Durch die gestiegene Treibhausgaskonzentration wird dieses dynamische Gleichgewicht verschoben (*Mehr Treibhausgase verändern Strahlungsgleichgewicht*).

Houghton und der IPCC nutzen das Konzept des Strahlungsantriebs (radiative forcing), um Faktoren zu beschreiben, die zu einer Änderung der Energiemenge in der Atmosphäre und damit

einer Veränderung des Strahlungshaushalts führen: *Treibhausgase führen zu positivem Strahlungsantrieb* und *Positiver Strahlungsantrieb führt zu Erwärmung*. Dabei kommt es zu einer *Energiezunahme in der Atmosphäre durch mehr Treibhausgase*, wie die DMG und auch der IPCC betonen. Auch die DMG greift somit auf das Konzept des Strahlungsantriebs zurück, ohne den Terminus explizit zu nutzen. Aus den Zitaten wird das Konzept *Mehr Treibhausgase verändern Strahlungsgleichgewicht* deutlich, das sich bei einer höheren Temperatur neu einpendelt. Da sich die CO₂-Konzentration nicht plötzlich, sondern allmählich verdoppelt, muss es zwischenzeitlich zu einer *vorübergehenden Serie von Ungleichgewichten* im globalen Strahlungshaushalt und schließlich zu einer höheren Temperatur kommen: *Ausgleich des Ungleichgewichts durch Temperaturanstieg*. Wenn die CO₂-Konzentration schließlich – auf einem höheren Niveau – wieder konstant ist, pendelt sich somit ein neues, verschobenes Strahlungsgleichgewicht bei höherer Temperatur ein. Arrhenius nimmt in seinen Beschreibungen nicht den Weg über den Strahlungsantrieb, sondern beschreibt eine Erwärmung über mathematische Zusammenhänge.

Der IPCC unterscheidet explizit zwischen *natürlichen* und *künstlichen (anthropogenen)* Einflüssen auf das Klima:

„anthropogenic and natural forcing“	(IPCC: S. 103, 2)
„anthropogenic warming“	(IPCC: S. 103, 4)
„anthropogenic greenhouse gases“	(IPCC: S. 106, 1)

Damit wird deutlich, dass der IPCC den Menschen als nicht-natürlichen Faktor betrachtet. Entsprechend wird vom IPCC zwischen einem natürlichen, ungestörten Strahlungsgleichgewicht und einem künstlichen, vom Menschen gestörten Strahlungsgleichgewicht unterschieden:

„The imbalance of 4 W/m ² at the top of the troposphere creates an imbalance in the energy budget there.“	(Houghton: S. 257, 4)
„the unperturbed temperature profile is shown as the blue line and the perturbed temperature profile as the red line“	(IPCC: S. 134 ,5 zu Abb. 2.2)

Es wird deutlich, dass die durch den Menschen veränderten Prozesse negativ gegenüber den natürlichen Prozessen als *Störung* gewertet werden (*Störung des Gleichgewichts*). Beim Strahlungshaushalt der Atmosphäre (wie auch beim Kohlenstoffkreislauf) gehen die Wissenschaftler von einem natürlichen Gleichgewicht aus. Ein Ungleichgewicht entsteht dann, wenn das funktionierende Gleichgewicht von außen gestört wird, wenn also z. B. durch einen vom Menschen verursachten CO₂-Ausstoß erst ein Ungleichgewicht im Kohlenstoffkreislauf und dadurch schließlich ein Ungleichgewicht in der atmosphärischen Strahlungsbilanz entsteht. Offensichtlich werden die in Kapitel 6.3.4 beschriebenen stark konventionalisierten Gleichgewichtsmetaphern der Ökologie auch von der Klimawissenschaft übernommen.

In der Beschreibung der Veränderungen der atmosphärischen Strahlungsbilanz wird die Atmosphäre in unterschiedliche Schichten und damit Behälter aufgeteilt, um Gleichgewichtsprozesse in unterschiedlichen Sphären zu beschreiben. So kommt es neben einer *Erwärmung der Troposphäre* gleichzeitig zu einer *Abkühlung der Stratosphäre*:

„[...] strahlt die Stratosphäre [...] mehr Energie ab und muss sich zwangsläufig abkühlen“	(DMG: 5)
„the influence of increased carbon dioxide on atmospheric temperature is to cool the stratosphere“	(Houghton: S. 258, 2)
„net flux imbalance [leads to a] stratospheric temperature adjust[ment]“	(IPCC: S. 134, Abb. 2.2)

Houghton betont dabei jedoch, dass zwar die CO₂-Konzentration und die stratosphärische Abkühlung, nicht hingegen die Temperaturen in den unterschiedlichen Sphären, in einem kausalen

Zusammenhang stehen (Houghton 256, 2). Der IPCC führt darüber hinaus aus, dass es durch das so genannte Ozonloch zu einer Abkühlung des Klimas kommt (*Abkühlung durch Ozonloch*):

„stratospheric ozone decreases have contributed to cooling“ (IPCC: S. 136, 2)

Somit können die Veränderungen des Strahlungshaushalts durch den Menschen wie folgt verallgemeinert und zusammengefasst werden:

Denkfigur: Verschiebung des Strahlungsgleichgewichts				
Der vermehrte Treibhausgasausstoß führt zu einer Veränderung des atmosphärischen Strahlungsgleichgewichts. Durch einen positiven Strahlungsantrieb nimmt der Energiegehalt der Atmosphäre zu und die untere Atmosphäre erwärmt sich.				
Der Denkfigur sind folgende Konzepte zugeordnet:	Arrhenius	DMG	Houghton	IPCC
Mehr Treibhausgase verändern Strahlungsgleichgewicht. Eine veränderte Treibhausgaskonzentration führt zu einer Veränderung der Strahlungsbilanz.	+	+	+	+
Treibhausgase haben einen positiven Strahlungsantrieb. Mehr Treibhausgase führen zu mehr Energie in der Atmosphäre.	+	+	+	+
Vorübergehende Serie von Ungleichgewichten. Durch eine Änderung der Treibhausgaskonzentration kommt es zu einer Serie von Strahlungsungleichgewichten.		+	+	+
Ausgleich des Ungleichgewichts durch Temperaturanstieg. Das durch den positiven Strahlungsantrieb der Treibhausgase entstandene Strahlungsungleichgewicht wird durch einen Temperaturanstieg ausgeglichen.		+	+	+
Erwärmung der unteren Atmosphäre. Durch mehr Treibhausgase erwärmt sich die untere Atmosphäre.	+	+	+	+
Abkühlung der oberen Atmosphäre. Durch die Zunahme der Treibhausgaskonzentration wird mehr Strahlung in der oberen Atmosphäre emittiert, was zu einer Abkühlung der oberen Atmosphäre führt.		+	+	+
Störung des Gleichgewichts. Die gestiegene Treibhausgaskonzentration führt zu einer Störung eines vormals ungestörten Strahlungsgleichgewichts.			+	+
Abkühlung durch Ozonloch. Die Ausdünnung stratosphärischen Ozons führt zu einer Abkühlung der Atmosphäre.				+

Tabelle 6.17: Denkfigur: VERSCHIEBUNG DES STRAHLUNGSGLEICHGEWICHTS

6.4.4 Denkfigur: Erwärmung Durch Treibhauseffekt

Die zur Erwärmung führenden Absorptions- und Emissionsmechanismen der Atmosphäre werden von allen untersuchten Wissenschaftlern mit Gewächshäusern zum Aufziehen von Pflanzen analogisiert und als Treibhauseffekt benannt:

„atmosphere acts like the glass of a hot house“ (Arrhenius: S. 237, 1)
 „des anthropogenen Treibhauseffektes“ (DMG: Titel)
 „the enhanced greenhouse effect“ (Houghton: S. 255, 1)
 „this blanketing is known as the natural greenhouse effect“ (IPCC: S. 97, 3)

Der Begriff *Treibhaus* wurde im 19. Jahrhundert geprägt und bezeichnete ein heizbares Glashaus zum Treiben von Pflanzen. Im Glashaus staut sich mangels Luftzirkulation die Wärme, was aufgrund einer Beschleunigung biochemische Prozesse zu einem schnelleren Pflanzenwachstum

führt. Die Treibhausanalogie geht auf den Physiker und Mathematiker Joseph Fourier (1824) zurück. Er verglich die Erde und ihre Lufthülle mit einem Glasbecher mit Glasdeckel unter dem Terminus *hothouse*, da ihm bekannt war, dass sich das Innere eines solchen Gefäßes erwärmt, wenn es von der Sonne bestrahlt wird. Fourier entwarf daraufhin ein einfaches Rechenmodell zur Vorhersage der Atmosphärentemperatur unter Einbezug des Treibhauseffekts. Fachlich ist die Analogisierung eines Treibhauses mit der Atmosphäre nur eingeschränkt adäquat: Zwar ist der Effekt der Erwärmung des Klimas ähnlich dem der Erwärmung des Treibhausinneren, die beteiligten Prozesse und Strukturen sind hingegen verschieden (vgl. Tabelle 6.18).

	Atmosphäre	Treibhaus
verursachende Struktur	klimaaktive Gase	Glaswände
Position der Struktur	gesamte Atmosphäre	Außenwände des Treibhauses
verursachender Prozess	(1) Absorption und Emission von Wärmestrahlung, aber nicht von sichtbarer Strahlung	(1) Verhinderung der Konvektion warmer Luft (2) Absorption und Emission von Wärmestrahlung, aber nicht von sichtbarer Strahlung

Tabelle 6.18: Die Treibhausmetapher

In der Treibhausmetapher werden zwei in ihren Mechanismen unterschiedliche Phänomene analogisiert: Die Atmosphäre erwärmt sich durch Absorption und Emission von Strahlung durch klimaaktive Gase, während sich das Treibhaus aufgrund der Unterbindung eines Luftaustauschs, also dem Aufsteigen erwärmter Luft bei gleichzeitigem Absinken kälterer Luft in der Umgebung, erwärmt. Hervorgehoben wird in der Metapher des Treibhauseffekts die Erwärmung des Inneren eines Behälters durch Sonnenstrahlung durch Absorptions- und Emissionsprozesse. Verdeckt werden hingegen der Unterbindung der Konvektion im Treibhaus und die gleichmäßige Verteilung der Treibhausgase in der Atmosphäre. Houghton und der IPCC schränken die Analogisierung des Treibhauseffekts mit seinem Quellbereich Treibhaus auch ein:

„The warmth of a greenhouse is largely due to the suppression of air motions within it“ (Houghton: S. 3, 1)

„The glass walls in a greenhouse reduce airflow and increase the temperature of the air inside. Analogously, but through a different physical process, the Earth’s greenhouse effect warms the surface of the planet.“ (IPCC: S. 115, 1)

Die Erwärmung im Treibhaus wird in beiden Quellen auf die Unterbindung der Luftzirkulation und damit der Konvektion zurückgeführt. Die Glaswände eines Treibhauses und die Treibhausgase in der Atmosphäre haben somit den gleichen Effekt. Dieser kommt jedoch durch unterschiedliche Mechanismen zustande.

Die dem Treibhauseffekt zugrunde liegenden Mechanismen werden über die Absorption und Emission von Wärmestrahlung durch Treibhausgase beschrieben:

„Heat from the sun [is] passing earth’s atmosphere“ [...]. „Diffusion [of the atmosphere is] great for ultra-violet rays and diminishes continuously with increasing wavelength [... so] it is insensible for the [...] radiation from a body of the mean temperature of the earth.“ (Arrhenius: S. 238, 2; 251, 2)

„Die an der Erdoberfläche einfallende solare Strahlung wird nur wenig geschwächt, da die Atmosphäre im sichtbaren Spektralbereich weitgehend durchlässig ist. Im infraroten Spektralbereich dagegen wird die vom Boden emittierte Strahlung zu einem großen Teil von der Atmosphäre absorbiert und [...] wieder in alle Richtungen abgestrahlt.“ (DMG: 2)

- „greenhouse effect [occures in an] atmosphere that is more transparent to solar radiation than to infrared radiation. [IR-radiation] emitted by the planetary surface is absorbed by greenhouse gases. [...] This is [...] the natural greenhouse effect from the presence of the natural occurring greenhouse gases.“ (Houghton: S. 3, 1; 255, 2)
- „The sun powers earth’s climate, radiating energy at very short wavelengths [...]. Roughly one-third of the solar energy [...] is reflected directly back to space. The remaining two-thirds is absorbed by the surface and, to a lesser extent, by the atmosphere. [...] The] thermal radiation emitted by the land and ocean is absorbed by the atmosphere, including clouds, and [...] reemitted in all directions.“ (IPCC: S. 115, 1 + Abb. FAQ 1.3)

Der von den Wissenschaftlern beschriebene Treibhauseffekt basiert auf kurzwelliger Strahlung, die von der Sonne kommend in die Atmosphäre eindringt. Die Treibhausgase sind nahezu durchlässig für kurzwellige Strahlung, sodass diese am Erdboden entweder reflektiert oder absorbiert wird. Ein Teil der absorbierten Strahlung wird vom Erdboden als langwellige Strahlung emittiert. Die Treibhausgase absorbieren die langwellige Strahlung und emittieren sie in alle Richtungen. Sonnenstrahlung und Erdstrahlung werden dabei wie folgt beschrieben:

Richtung der Strahlung	Bezeichnung	Quelle
die Erde erreichende Strahlung	<i>Sonnenstrahlung, sun's rays, solar radiation</i>	(DMG: 1) (IPCC: S. 135, 1) (Houghton: S. 51, 1)
	<i>sichtbare Strahlung</i>	(DMG: 1)
	<i>light heat</i>	(Arrhenius: S. 238, 2)
	<i>ultra-violet rays</i>	(Arrhenius: S. 238, 3)
von der Erde emittierte Strahlung	<i>Wärmestrahlung</i>	(DMG: 1) (IPCC: S. 135, 1) (Houghton: S. 257, 1)
	<i>thermal radiation</i>	
	<i>infrarote Strahlung</i>	(DMG: 1) (IPCC: S. 136, 2) (Houghton: S. 51, 1)
	<i>dark heat</i>	(Arrhenius: S. 238, 2)

Tabelle 6.19: Bezeichnungen der imitierten und emittierten Strahlung

Für die Beschreibung der die Erde erreichenden und sie verlassenden Strahlung werden in den untersuchten Quellen unterschiedliche Bezeichnungen für die gleichen Begriffe verwendet. Deutlich wird, dass die Emissionsspektren der Sonne und der Erde klar verschoben sind (vgl. Pidwirny 2006): Während die Sonne hauptsächlich im sichtbaren Spektrum emittiert, emittiert die Erde größtenteils im infraroten Spektrum, sodass die Verallgemeinerung der solaren Strahlung als *Sonnenstrahlung* und der Erdstrahlung als *Wärmestrahlung* legitim ist.

Die Grundlagen des Treibhauseffekts lassen sich somit in folgende Konzepte strukturieren und verallgemeinern, die nummeriert sind, da sie eine logische Abfolge ergeben:

1. Die Sonne sendet Sonnenstrahlung zur Erde.
2. Sonnenstrahlung ist überwiegend kurzwellig.
3. Treibhausgase absorbieren keine Sonnenstrahlung.
4. Die Erde absorbiert Sonnenstrahlung.
5. Die Erde emittiert Wärmestrahlung.
6. Die Treibhausgase absorbieren Wärmestrahlung.
7. Treibhausgase emittieren Wärmestrahlung in alle Richtungen.

Die Eigenschaft der Treibhausgase, Wärmestrahlung zu absorbieren, wird von Houghton auf molekularer Ebene erklärt: Durch ihren Aufbau können sie durch Übergänge zwischen Elektro-

nen-, Schwingungs- und Rotationsenergiezuständen Strahlung absorbieren und emittieren (Houghton 51, 1): *(6a) Treibhausgase haben spezielle Eigenschaften*. Dieses Konzept wird auch vom IPCC beschrieben, jedoch ohne die Eigenschaften weiter auszuführen (IPCC 135, 1).

In allen untersuchten wissenschaftlichen Quellen wird eine Verstärkung des Treibhauseffekts durch eine Zunahme der Treibhausgaskonzentration beschrieben:

„If the quantity of carbonic acid increases [...] the temperature will increase.“ (Arrhenius: S. 267, 1)

„Durch die vom Menschen verursachte Konzentrationszunahme der klimarelevanten Spurengase erniedrigt sich die Durchlässigkeit der Erdatmosphäre.“ (DMG: 3)

„If greenhouse gases are increasing this is leading to an enhanced greenhouse effect.“ (Houghton: S. 255, 3)

Human activities intensify the blanketing effect through greenhouse gases.“ (IPCC: S. 97, 3)

Arrhenius nutzt mit dem Terminus „carbonic acid“ die Ende des 19. Jahrhunderts übliche Bezeichnung für das Treibhausgas CO₂. In der Beschreibung der Auswirkungen einer Zunahme der Treibhausgaskonzentration werden unterschiedliche Termini verwendet, die jedoch immer auf das gleiche Konzept verweisen:

8. Mehr Treibhausgase verstärken Treibhauseffekt.

Arrhenius benennt den verstärkten Treibhauseffekt zwar nicht explizit als solchen, greift jedoch wie die anderen Wissenschaftler auch auf das dem Treibhauseffekt zugrunde liegende Konzept *Mehr CO₂ führt zu mehr Wärme* zurück. Auf der anderen Seite beschreiben die übrigen Quellen an dieser Stelle nicht die Auswirkungen des verstärkten Treibhauseffekts (Erwärmung), sondern nur den Effekt an sich. Es sei deshalb auf die von allen Wissenschaftlern genutzten Konzepte *Mehr Treibhausgase verändern Strahlungsgleichgewicht* und *Erwärmung der unteren Atmosphäre* in der Denkfigur Gestörtes Strahlungsgleichgewicht verwiesen. Somit wird auch das Konzept

9. Verstärker Treibhauseffekt führt zu Erwärmung.

von allen Wissenschaftlern genutzt.

Der natürliche Treibhauseffekt führt den untersuchten Quellen zufolge zu einer Erdmitteltemperatur von +15 °C. Ohne den Treibhauseffekt läge diese bei -18 °C (DMG, 2; Houghton: S. 255, 2; IPCC: S. 115, 1). Die Ausmaße der Erwärmung werden in den Quellen verschieden prognostiziert: Arrhenius errechnet eine Erwärmung um 6 °C für eine Verdopplung der CO₂-Konzentration (Arrhenius: S. 266, Tabelle), die DMG geht von >1 °C aus (DMG: 8), Houghton von 2,5 °C bei einer Verdopplung der CO₂-Konzentration (Houghton: S. 257, 1) und der IPCC von 2 bis 6,5 °C (IPCC: S. 749, 3). Die unterschiedlichen Prognosen sind dabei auf verschiedene Rechenmodelle zurückzuführen, wobei die Modelle des IPCC verschiedene Szenarien enthalten und Arrhenius seinen Prognosen die Mondstrahlung zugrunde legte, was die Spannweite der Prognosen erklärt.

Die Atmosphäre mit den Treibhausgasen wird zum Teil metaphorisch als Decke bezeichnet:

„Gases which absorb in the infrared part of the spectrum act as blankets over the earth's surface.“ (Houghton: S. 255, 1)

„greenhouse gases, which act as a partial blanket for the longwave radiation [...] Human activities intensify the blanketing effect through [...] greenhouse gases.“ (IPCC: S. 97, 3)

Analog einer Bettdecke, die die vom menschlichen Körper abgestrahlte Wärme dämmt, wird von Houghton und auch dem IPCC das Bild der Decke genutzt, um die Wirkungsweise der Treibhausgase in der Atmosphäre metaphorisch zu beschreiben. Mit dem Konzept *Treibhausgase Sind Decke* wird die abstrakte Vorstellung von unsichtbaren, in der Atmosphäre gleich verteilten Gasen vergegenständlicht. Mehr Treibhausgase verstärken dabei die Decke (IPCC).

Die Grundlagen des Treibhauseffekts lassen sich in der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT wie folgt verallgemeinern:

Denkfigur: Erwärmung durch Treibhauseffekt				
Der vermehrte Treibhausgasausstoß führt zu einer Veränderung des atmosphärischen Strahlungsgleichgewichts. Durch einen positiven Strahlungsantrieb nimmt der Energiegehalt der Atmosphäre zu und die untere Atmosphäre erwärmt sich.				
Der Denkfigur sind folgende Konzepte zugeordnet:	Arrhenius	DMG	Houghton	IPCC
Die Sonne sendet Sonnenstrahlung zur Erde. Die Sonne sendet Strahlung verschiedener Wellenlängen zur Erde.	+	+	+	+
Sonnenstrahlung ist überwiegend kurzwellig. Sonnenstrahlung besteht hauptsächlich aus kurzwelliger elektromagnetischer Strahlung.	+	+		+
Treibhausgase absorbieren keine Sonnenstrahlung. Treibhausgase absorbieren keine kurzwellige Strahlung.	+	+	+	+
Die Erde absorbiert Sonnenstrahlung. Die Erde nimmt den Großteil der durch die Atmosphäre zur Erdoberfläche hindurchdringenden Sonnenstrahlung auf.	+	+		+
Die Erde emittiert Wärmestrahlung. Die Erde strahlt kontinuierlich Wärmeenergie ab.	+	+	+	+
Treibhausgase absorbieren Wärmestrahlung. Die Treibhausgase absorbieren langwellige Strahlung.	+	+	+	+
Treibhausgase emittieren Wärme in alle Richtungen. Die Treibhausgase emittieren die von ihnen absorbierte Energie in alle Richtungen.		+		+
Mehr Treibhausgase verstärken Treibhauseffekt. Durch die Emission von zusätzlichen Treibhausgasen verstärkt der Mensch den natürlichen Treibhauseffekt.	+	+	+	+
Verstärker Treibhauseffekt führt zu Erwärmung. Der verstärkte Treibhauseffekt erwärmt die Atmosphäre.	+	+	+	+
Treibhausgase Sind Decke. Treibhausgase wirken wie eine wärmende Decke über der Erde.			+	+
Mehr Treibhausgase Verstärken Decke. Mehr Treibhausgase verstärken die wärmende Wirkung der Decke.				+
Treibhaus und Klima sind verschieden. Die Erwärmung eines Treibhauses und der Atmosphäre haben verschiedene Ursachen.			+	+

Tabelle 6.20: Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT

Die Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT wird durch verschiedene Varianten erweitert, die sich in Position und Funktion der Treibhausgase unterscheiden. Die Varianten werden meist parallel genutzt, um unterschiedliche Aspekte des Treibhauseffekts hervorzuheben. So lassen sich zwei verschiedene Varianten des metaphorischen Konzepts *Treibhausgase Sind Decke* beschreiben: Entweder bildet die Atmosphäre den Rand des Behälters Atmosphäre (*Atmosphäre Hat Decke*) oder die Atmosphäre an sich bildet eine Decke mit Treibhausgasen über der Erde (*Atmosphäre Ist Decke*). In letzterem Fall bildet die Treibhausgasdecke die Füllung des Behälters Atmosphäre.

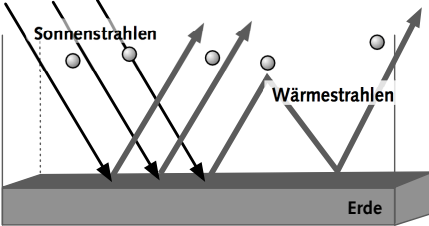
Variante: Treibhausatmosphäre

Die metaphorische Decke, unter der Wärme gespeichert wird, liegt in dieser Variante nicht – wie häufig in wissenschaftsorientierten Abbildungen dargestellt – am oberen Rand der Atmosphäre, sondern wird von der Atmosphäre selbst gebildet:

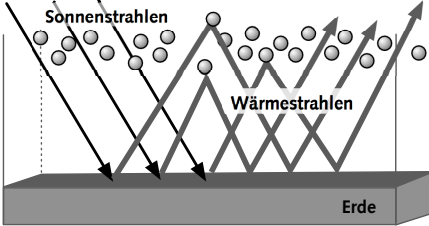
„The atmosphere of a planet is a gaseous envelope“ [...] „Movements of carbon dioxide into and out of the atmosphere“ (Houghton: S. 1, 1; 252, 2)
 „CO₂ is [...] well mixed in the atmosphere“ (IPCC: S. 138, 1)

Beim IPCC wird explizit die Durchmischung der Atmosphäre mit CO₂ beschrieben (*CO₂ ist in der Atmosphäre gleichmäßig verteilt*). Bei Houghton wird implizit die gleiche Vorstellung deutlich: Dem zufolge wird CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt und aus ihr wieder gebunden. Es ist somit fortwährend im Kontakt zu anderen, am Erdboden lokalisierten Kohlenstoffspeichern und kann sich nicht in einer bestimmten Schicht konzentrieren. Beide verfügen damit über das Konzept einer gut durchmischten Atmosphäre. Diese Vorstellung lässt sich in der Variante TREIBHAUSATMOSPHERE der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT zusammenfassen.

Variante Treibhausatmosphäre				
Die Treibhausgase sind in der Atmosphäre gleichmäßig verteilt und absorbieren bzw. emittieren überall Wärmestrahlung.				
Der Denkfigur sind folgende Konzepte zugeordnet:				
	Arrhenius	DMG	Houghton	IPCC
Gleichmäßig verteiltes CO₂. Das CO ₂ ist in der Atmosphäre gleichmäßig verteilt.			+	+
Atmosphäre ist Decke. Die Atmosphäre bildet mit den Treibhausgasen eine Decke, die die ausgehende Wärmestrahlung am Entweichen in den Weltraum hindert.			+	+



natürlicher Treibhauseffekt



verstärkter Treibhauseffekt

Tabelle 6.21: Variante TREIBHAUSATMOSPHERE

Variante: Treibhausgasschicht

Houghton analogisiert die Treibhausgase mit den Glaswänden eines Treibhauses in ihrer Funktion beim Treibhauseffekt. In der Abbildung zum Treibhauseffekt stellt Houghton (S. 3, Abb. 1.1) die Treibhausgase in einer atmosphärischen Schicht angeordnet dar.

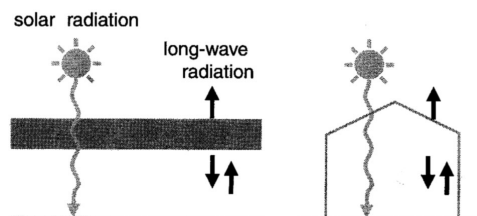
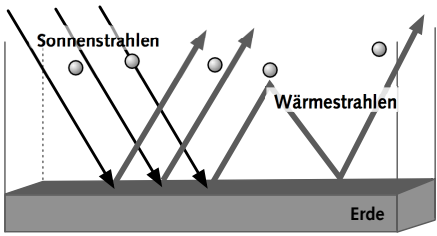


Abbildung 6.8: Der Treibhauseffekt bei Houghton (S. 3, Fig. 1.1)

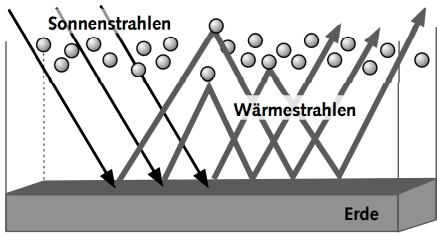
Die Wirkung der Treibhausgase als Decke (Houghton 255, 1) wird in zwei parallelen Konzepten verwandt: Das Konzept *Treibhausgase Sind Decke* bezieht sich z. T. auf die ganze Atmosphäre und z. T. auf eine atmosphärische Schicht, sodass Houghton parallel über die Konzepte *Atmosphäre Hat Decke* und *Atmosphäre Ist Decke* verfügt.

Variante Treibhausgasschicht				
Die Treibhausgase sind in einer atmosphärischen Schicht angeordnet in der Wärmestrahlung absorbiert und wieder emittiert wird.				
Der Denkfigur sind folgende Konzepte zugeordnet:				
	Arrhenius	DMG	Houghton	IPCC
Atmosphäre Hat Decke. Die Atmosphäre hat eine Schicht aus Treibhausgasen, die die ausgehende Wärmestrahlung am Verlassen der Atmosphäre hindert.			+	



natürlicher Treibhauseffekt

➔



verstärkter Treibhauseffekt

Tabelle 6.22: Variante TREIBHAUSGASSCHICHT

Variante: Atmosphärenfenster

Die DMG argumentiert in der Beschreibung des Treibhauseffekts metaphorisch in einer Fenstermetapher:

„In so genannten Fensterbereichen (insbesondere im großen atmosphärischen Fenster im Wellenlängenbereich von 8 bis 13 μm) kann die Infrarotstrahlung vom Boden teilweise direkt in den Weltraum entweichen.“ (DMG: 2)

„Die Verengung des atmosphärischen Fensters durch die Zunahme des CO_2 kann [...] einfach nachgewiesen werden.“ (DMG: 14)

In der Nutzung der Fenstermetapher (*Strahlungsfluss durch Strahlungsfenster*), die die DMG explizit kenntlich macht („in so genannten Fensterbereichen“) wird die Nutzung des Behälterschemas in der Alltagsvorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH (vgl. Kapitel 7.4.1) umgekehrt: In der von der DMG geäußerten Vorstellung entsteht kein Fenster, durch das mehr Strahlung einfallen kann, sondern es schließt sich ein Fenster, durch das Strahlung entweichen kann. Mit der Fenstermetapher bezeichnet die DMG nicht eine makroskopische Struktur, sondern die molekularen Eigenschaften der Treibhausgase. Dennoch kann die Fenstermetapher bei einer lebensweltlich makroskopischen Interpretation auch das Bild *Atmosphäre Hat Treibhausgasdecke* entstehen lassen, denn ein Fenster ist eine „Öffnung für Luft und Licht in der Wand“ (Duden 2002). Somit muss es auch eine Schicht geben, in der ein Loch ist. Ein Mehr an Treibhausgasen schließt dieses Fenster.

Variante Atmosphärenfenster				
Die Atmosphäre besitzt Fenster in einer Treibhausgasschicht, durch die Wärmestrahlung entweichen kann. Je mehr Treibhausgase in der Atmosphäre sind, desto kleiner werden die Fenster und desto weniger Wärmestrahlung kann entweichen.				
Der Denkfigur sind folgende Konzepte zugeordnet:	Arrhenius	DMG	Houghton	IPCC
Atmosphäre Hat Treibhausgasdecke. Die Atmosphäre hat eine Schicht aus Treibhausgasen, die die thermische Strahlung am Verlassen der Atmosphäre hindert.		+		
Die Atmosphäre Hat Fenster. Die Atmosphäre hat Strahlungsfenster, in denen die Wärmestrahlung in den Weltraum entweicht.		+		
Treibhausgase Verkleinern Fenster. Die Treibhausgase verkleinern die atmosphärischen Fenster, sodass mehr Wärmestrahlung in der Atmosphäre bleibt.		+		

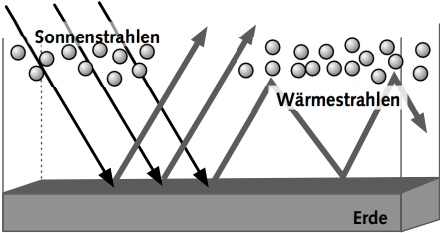
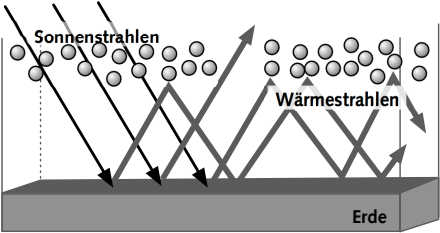
 <p>natürlicher Treibhauseffekt</p>	➔	 <p>verstärkter Treibhauseffekt</p>
---	---	--

Tabelle 6.23: Variante ATMOSPÄRENFENSTER

6.4.5 Fachlich geklärte Vorstellungen zum Treibhauseffekt

In diesem Abschnitt werden die für das Verstehen des Treibhauseffekts zentralen Konzepte und Denkfiguren zusammengeführt. Ziel ist die theoriegeleitete Erstellung eines Desiderats für die Vermittlung des Treibhauseffekts. Zusammenfassend ergeben sich folgende fachlich geklärte Vorstellungen zum Treibhauseffekt und somit dem Strahlungshaushalt der Atmosphäre, die der Erklärung des Klimawandels aus fachdidaktischer Perspektive angemessen sind.

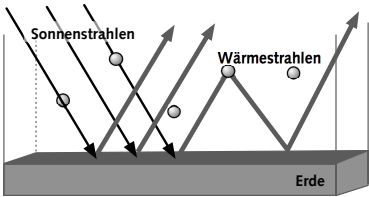
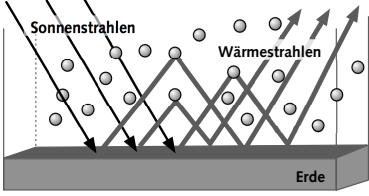
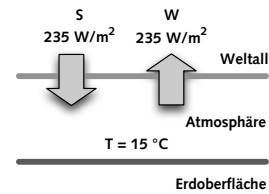
<p>Natürlicher Treibhauseffekt</p> <p>Die Sonne sendet größtenteils kurzwellige elektromagnetische Strahlung zur Erde. Die Treibhausgase sind durchlässig für die Sonnenstrahlung. Am Erdboden wird die Sonnenstrahlung absorbiert und als Wärmestrahlung wieder emittiert. Die Wärmestrahlung wird von den Treibhausgasen absorbiert und in alle Richtungen emittiert. Diese zusätzliche Wärmeemission in Richtung Erde ist der Treibhauseffekt. Der natürliche Treibhauseffekt hebt die Erdmitteltemperatur von -18 °C auf 15 °C.</p>	
<p>Verstärkter Treibhauseffekt</p> <p>Die Treibhausgase sind in der Atmosphäre gleichmäßig verteilt. Durch die Zunahme an Treibhausgasen kommt es zu einer verstärkten Absorption von Wärmestrahlung in der Atmosphäre. Der natürliche Treibhauseffekt wird verstärkt und es kommt zu einer Erwärmung der Atmosphäre.</p>	

Tabelle 6.24: Fachlich geklärte Vorstellungen zum Treibhauseffekt

Der Treibhauseffekt hat Auswirkungen auf die Strahlungsbilanz der Erde. Die für den Klimawandel relevanten Veränderungen in der Troposphäre lassen sich wie folgt beschreiben:

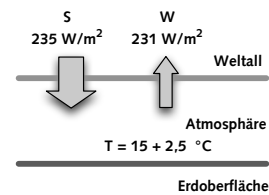
1. Strahlungsgleichgewicht

Unter konstanten Bedingungen gleichen sich die von der Sonne zur Erde gestrahlte Sonnenenergie (S) und von der Erde emittierte Wärmeenergie (W) aus. Der atmosphärische Strahlungshaushalt ist im Gleichgewicht. Die Erdmitteltemperatur beträgt ca. 15 °C.



2. Ungleichgewicht

Durch den verstärkten Treibhauseffekt kommt es zu einem positiven Strahlungsantrieb und somit einer Serie von Ungleichgewichten im Strahlungshaushalt. Die Abstrahlung von Wärmeenergie verringert sich um ca. 4 W/m². Der Energiegehalt der Troposphäre nimmt zu. Durch den höheren Energiegehalt der Troposphäre nimmt die Temperatur dort zu.



3. Vershobenes Strahlungsgleichgewicht

Die höhere Temperatur führt schließlich dazu, dass mehr Energie von den Treibhausgasen abgestrahlt wird und sich wieder ein Gleichgewicht zwischen eingestrahelter und abgestrahlter Energie einstellt.

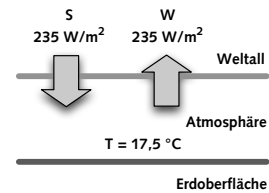


Tabelle 6.25: Fachlich geklärte Vorstellungen zum veränderten Strahlungsgleichgewicht
Die Daten sind abgeleitet aus IPCC: S. 96 und Houghton: S. 257.

Vorstellungen wie *Abkühlung durch Ozonloch* oder *Abkühlung der oberen Atmosphäre* werden aus Gründen der Komplexitätsreduktion nicht in die zentralen fachlichen Vorstellungen zum Treibhauseffekt aufgenommen. In der Vermittlung des Strahlungshaushalts muss deutlich gemacht werden, dass es sich bei der in den Abbildungen in Tabelle 6.25 eingezeichneten Grenzen zwischen Atmosphäre und Weltraum um ein Modell handelt, um Strahlungsflüsse zu errechnen und nicht um eine tatsächlich vorhandene Grenzschicht in der Atmosphäre.

7 Lernervorstellungen zum Klimawandel

Für das Erfassen der Lernerperspektive werden Lernervorstellungen zu zwei zentralen Aspekten des Klimawandels empirisch erfasst: zum Kohlenstoffkreislauf mit seinen Veränderungen als Ursache des Klimawandels und zum Treibhauseffekt als Mechanismus der Erwärmung der Atmosphäre. Zur Erhebung der Lernervorstellungen werden die Ergebnisse der Interviewstudie wie auch die Interviewphasen zu Beginn der Vermittlungsexperimente herangezogen. Die methodisch kontrollierte Auswertung der Daten erfolgt mithilfe der Qualitativen Inhaltsanalyse (Gropengießer 2005; Mayring 2003) und einer Metaphernanalyse (vgl. Schmitt 2003; Schmitt 2005).

7.1 Fragestellung des Kapitels

Die Analyse der Lernervorstellungen wird durch folgende Fragestellungen geleitet:

- Über welche Vorstellungen vom Kohlenstoffkreislauf und vom Treibhauseffekt als zentrale Aspekte des Klimawandels verfügen Lerner?
- In welchen Erfahrungen gründen sich diese Vorstellungen?

Im Folgenden ist zunächst das methodische Vorgehen bei der Erhebung und Analyse der Lernervorstellungen dargestellt, bevor anschließend die Vorstellungen analysiert werden. Die Darstellung der Alltagsvorstellungen erfolgt dabei gegliedert nach den Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf und zum Treibhauseffekt.

7.2 Methodisches Vorgehen

7.2.1 Wahl und Angemessenheit der Methoden

Die Auswahl einer Forschungsmethode kann nur unter Berücksichtigung der jeweiligen Fragestellung und des Forschungsgegenstandes getroffen werden. Als Kriterium für die Entscheidung für oder gegen eine Methode nennen Flick et al. (2004) die Gegenstandsangemessenheit. Eine grundlegende zu treffende Entscheidung besteht in der Auswahl qualitativer bzw. quantitativer Methoden. Qualitative Methoden sind immer dann angemessen, wenn es um die Erforschung eines bisher unbekanntes Forschungsfelds geht (Flick et al. 2004). Bei quantitativen Methoden steht hingegen die Frage nach der numerischen Darstellung empirischer Sachverhalte im Vordergrund. Um von statistischen Zusammenhängen auf Kausalzusammenhänge schließen zu können, bedarf es quantitativer Methoden. Für die empirische Identifizierung von Kausalzusammenhängen und ihre Verallgemeinerung sind qualitative Methoden die adäquatere Vorgehensweise (Gläser & Laudel 2006, S. 23f.).

In der vorliegenden Studie wurden zur Untersuchung der individuellen Vorstellungen deshalb qualitative Methoden verwendet. Zwar gibt es bereits eine Vielzahl quantitativer Erhebungen über Lernervorstellungen zum Klimawandel, jedoch sind diese nicht im Rahmen der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens einer Auswertung zugänglich, da die abgefragten Items vorgege-

ben waren und nicht von den Lernern selbst konstruiert wurden. Die Aufgabe der Untersuchung, individuelle Denkstrukturen, ihre Genese und Veränderungen zu erfassen, setzt eine subjektbezogene Datenerhebung voraus. Für die Analyse der Lernervorstellungen in ihrer gesamten Komplexität ist ein problemzentriertes offenes und interaktives Verfahren angemessen, wie es mit qualitativen Untersuchungsmethoden vorliegt (Gropengießer 2001).

7.2.2 Maßnahmen zur Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung der Ergebnisse sind in der Planung und Durchführung der Untersuchung bestimmte Maßnahmen zu ergreifen, die die Auswahl- und Verfahrensgültigkeit sicherstellen (Gropengießer 2001, S. 132).

Auswahlgültigkeit

Die Probanden der Interview- und der Interventionsstudie wurden in Oberstufenkursen mit einem naturwissenschaftlichen Schwerpunkt gewonnen. Im Gegensatz zu der in der quantitativen Forschung üblichen Sicherstellung der Generalisierbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse über den wahrscheinlichkeitstheoretisch abgesicherten Schluss von zufällig gezogenen Stichproben auf Populationen, greift diese Studie auf das Kriterium des »theoretical sampling« (Strauss & Corbin 1996) zurück. Ausgehend von ersten Interviews wurden so lange Daten erhoben, bis keine neuen Vorstellungen mehr gefunden werden konnten, die Ergebnisse somit gesättigt sind (Mayring 2007). Die Auswahl der zu untersuchenden Fälle wird also nicht nach dem Zufallsprinzip, sondern theoriegeleitet vom Forschenden selbst getroffen (Bortz & Döring 2006, S. 335).

Verfahrensgültigkeit

Die Interpretation von Daten kann als Fremdverstehen bezeichnet werden, bei dem ein Forscher den Erfahrungen und Vorstellungen Anderer einen Sinn verleiht (Schütz 1981, S. 198). Qualitativ Forschende entwerfen dabei Konstruktionen zweiter Ordnung, die kontrollierte, methodisch überprüfte, verstehende Rekonstruktionen von Konstruktionen erster Ordnung darstellen (Soeffner 2004). Die ausführliche und nachvollziehbare Dokumentation des Forschungsprozesses und der angewandten Methoden ist aus diesem Grunde unverzichtbar.

Um die Validität der Datenauswahl und -interpretation sicherzustellen werden sechs an Mayring (2003, S. 111) angelehnte Gütekriterien zugrunde gelegt:

- **Verfahrensdokumentation:** Die Dokumentation der Bedingungen und Verfahren bei der Erhebung, Aufbereitung und Auswertung der Daten ist nachvollziehbar und detailliert dargestellt.
- **Sequentielle, methodisch kontrollierte Analyse:** Die Aufbereitung und Analyse der Daten erfolgt nach vorher festgelegten Methoden. Das Vorgehen bei der Qualitativen Inhaltsanalyse ist im Folgenden und das der Metaphernanalyse in Kapitel 6.2.2 dargestellt.
- **Interne Validierung:** In den Explikationen und Strukturierungen der Vorstellungen wird die Interpretation der Daten jeweils argumentativ abgeleitet. Die Interpretationen werden anhand der Transkripte einer konsensuellen Validierung unterzogen. Dabei wurden die ausgewerteten Daten sowohl am Projekt beteiligten Forschern in der Arbeitsgruppe, wie auch – in den zentralen Ergebnissen der Studie – außenstehenden Lehrern und Fachdidaktikern zur Konsentierung der Interpretationen vorgelegt.
- **Externe Validierung:** Die Daten und Interpretationen der Studie werden mit den in Kapitel 3 dargestellten Ergebnissen anderer Forscher zum gleichen Untersuchungsgegenstand in Beziehung gesetzt.
- **Mitwirkung der Probanden:** Die Mitwirkung der Lerner ist eine maßgebliche Voraussetzung für die Qualität der Ergebnisse dieser Untersuchung. In der Erhebung der Daten wird

davon ausgegangen, dass die Äußerungen der Respondenten authentisch und ehrlich sind. Wichtig ist es somit, eine vertrauensvolle Atmosphäre zu schaffen. Die Lerner werden deshalb u. a. mehrfach darauf hingewiesen, dass es in der Studie nicht um Leistungsmessung, sondern Vorstellungsforschung geht und somit alle Äußerungen zum Untersuchungsgegenstand gewünscht und wertvoll sind.

- **Interne Triangulation:** Die Interviews und Vermittlungsexperimente sind so gestaltet und durchgeführt, dass an mehreren Stellen auf gleiche Aspekte des Kohlenstoffkreislaufs bzw. Treibhauseffekts rekuriert wird. Dadurch können Äußerungen der Lerner zu verschiedenen Zeitpunkten und durch verschiedene Impulse angeregt und miteinander verglichen werden, was die Validität sinngleicher Aussagen erhöht.

7.2.3 Vorgehensweise bei der Erhebung der Lernervorstellungen

Die Kontaktaufnahme zu den Lernern erfolgte in fünf verschiedenen gymnasialen Oberstufen in der Region Hannover. Die Studie wurde den Lernern mit dem Ziel der „Verbesserung der Qualität des naturwissenschaftlichen Unterrichts“ (Interviewstudie) bzw. der „Evaluation von Unterrichtsmaterialien“ (Interventionsstudie) vorgestellt, jedoch ohne den Themenbereich zu nennen. Die Schüler wurden des Weiteren auf die Art der Datenaufnahme mithilfe von Audiographie (Interviewstudie) bzw. Videographie (Interventionsstudie) hingewiesen. Eine Vorlage für eine schriftliche Einverständniserklärung zur Erhebung und Verarbeitung personenbezogener Daten wie auch ein Informationsblatt zum Datenschutz wurde den allesamt volljährigen Schülern zur Unterschrift vorgelegt (siehe Anhang).

Die Interviews wurden in einem von den jeweiligen Schulen zur Verfügung gestellten Raum durchgeführt, während die Interventionsstudie in Räumlichkeiten der Leibniz Universität Hannover stattfand. Die Datenerhebungen erfolgten im Sommer 2007 (Interviews) und 2008 (Interventionsstudie) bei Lernern der Jahrgangsstufen 11 und 12. Dadurch, dass die Erhebung in Klasse 11 am Ende des Schuljahres und in Klasse 12 zu Beginn des Schuljahres erfolgte, kann von einem ähnlichen schulischen Wissensstand ausgegangen werden. Die Lerner wurden gebeten, jeweils zu zweit oder zu dritt an einem Interview bzw. dem Test von Unterrichtsmaterialien teilzunehmen. Dabei war es ihnen freigestellt, gleichgeschlechtliche oder gemischtgeschlechtliche Gruppen zu bilden. Die Gruppengröße wurde auf maximal drei Lerner begrenzt, um überschaubare Kommunikationswege zu gewährleisten. Da die Interaktionen untereinander als Interventionen erfasst und entsprechend ausgewertet werden (siehe Kapitel 8), spielt die Gruppengröße als mögliche unabhängige Variable für die Qualität der Ergebnisse keine Rolle. Hoffmann-Riem (1980) und Bohnsack (1999) argumentieren, dass methodische Kontrolle des Verfahrens umso mehr gegeben ist, je offener und weniger standardisiert ein Erhebungsverfahren ist: Je weniger der Versuchsleiter in die Interviewsituation eingreift, desto mehr Freiheiten haben die Lerner ihre Vorstellungen unbeeinflusst zu äußern. Wolcott (1990, S. 127) bringt den für diese Studie gewählten Ansatz wie folgt auf den Punkt: „Der Forscher sollte im Feld weniger selber reden, sondern möglichst viel zuhören.“ Kleingruppeninterviews und auch die Vermittlungsexperimente in Kleingruppen führen zu einer stärkeren Diskussion der Lerner untereinander, als dies in Einzelinterviews der Fall wäre. Somit sind Kleingruppensettings der Zielstellung dieser Studie und auch den Qualitätskriterien angemessen.

7.2.4 Vorgehen bei der Interpretation der Lernervorstellungen

Grundlage der Interpretation der Lernervorstellungen sind die aufgezeichneten verbalen und nonverbalen Äußerungen der Lerner. Dazu zählen in erster Linie sprachliche Äußerungen und

Zeichnungen. Gestik und Mimik werden im Video bzw. im Interviewprotokoll erfasst, sofern sie bedeutungstragend erscheinen. Der Interpretationsprozess als methodisch kontrolliertes Fremdverstehen soll die vom Lerner gemeinte Bedeutung in den Lerneräußerungen erfassen. Die Sicherstellung der Qualität der Interpretation und auch die Vermeidung einer Überinterpretation erfolgt anhand o. a. Gütekriterien. Die Interpretation des Datenmaterials basiert auf folgenden Annahmen (Ault et al. 1984, S. 446f.; Gropengießer 2001, S. 105):

- *Aufrichtigkeit*: Die Lerner sind ehrlich und ernsthaft in ihren Äußerungen.
- *Korrespondenz*: Interpret und Lerner teilen ein gewisses Maß an Übereinstimmung hinsichtlich der Reaktion auf bestimmte Aspekte der Wirklichkeit.
- *Konsistenz*: Die Lerner bemühen sich, ihre Erfahrungen und Beobachtungen mit ihren Vorstellungen in Einklang zu bringen.
- *Kohärenz*: Vorstellungen sind nicht beliebige Ansammlungen einzelner Urteile, sondern bilden in der Regel ein – in einem begrenzten Betrachtungshorizont – in sich konsistentes Konstrukt.
- *Parallelkonzepte*: Zu ein und demselben Bereich können kontextabhängig mehrere verschiedene, z. T. auch gegensätzliche Vorstellungen geäußert werden. Davon zu trennen sind aufgrund einer Erklärungsnot erzeugte Artefakte.
- *Ermittlung ist Vermittlung*: Nicht nur die Vermittlungsexperimente, auch die Interviews verändern – auch ohne zusätzliche Impulse des Versuchsleiters – die Vorstellungen der Lerner. Die Lerner setzen sich auch im Interview 60 bis 90 Minuten mit einem Thema auseinander und reflektieren dabei ihre Vorstellungen. Jede Ermittlung ist somit immer auch eine Vermittlung.
- *Verstehen durch Metaphern*: Die geäußerten Metaphern sind vor dem Hintergrund der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens mehr als bloße Ausschmückungen, sondern verweisen auf kognitive Strukturen.
- *Kontextabhängigkeit der Bedeutung*: Die Bedeutung einer Äußerung ist in der Regel aus dem Kontext, z. B. den vorhergehenden Äußerungen des Respondenten zu erschließen.

7.2.5 Vorgehensweise bei der Aufbereitung des Datenmaterials

Zur Sicherstellung der Nachvollziehbarkeit der Interpretationen der Lerneräußerungen ist ein iteratives Vorgehen eine wichtige Kontrollmaßnahme (Gropengießer 2001, 143). Die Aufbereitung und Analyse der Lernervorstellungen in dieser Studie orientiert sich am von Gropengießer (2005) vorgeschlagenen Verfahren und lässt sich in die Schritte Erhebung, Aufbereitung und Auswertung des Materials zusammenfassen. Die Mitschnitte aus der Interviewstudie liegen als digitale Audiodaten im MP3-Format und die Mitschnitte aus der Interventionsstudie als digitale Videodaten im Mini-DV-Format vor. Im Folgenden sind die einzelnen Schritte der Aufbereitung des Materials erläutert und an einem Beispiel verdeutlicht.

Transkription

Innerhalb der Aufbereitung des Datenmaterials werden die verbalen sowie die nonverbalen Äußerungen aller Kommunikationspartner in eine schriftliche und lesbare Form überführt. Die Verschriftlichung des Ton- und Bildmaterials findet mithilfe der Software »InqScribe« statt. Bei der Verschriftlichung der Mitschnitte erfolgt eine erste Reduzierung des Datenmaterials auf die im Sinne der Fragestellung relevanten Aussagen.

Die Transkription erfolgt dabei in einem dreischrittigen Verfahren:

- **Auswahl relevanter Äußerungen.** Nach mehrfachem Abhören der Mitschnitte werden Inhalt tragende Passagen ausgewählt. Hierbei findet eine erste Reduktion dadurch statt, dass für die Fragestellung nicht relevante Teile, wie beispielsweise die Einleitung durch den Interviewer, nicht übertragen werden.

- **Wortprotokoll.** In der Wortprotokollierung wird der Dialekt bereinigt. Der Sprachstil des Lerners wird jedoch nicht geglättet und auch Satzbaufehler bleiben erhalten. Zum Schutz der Personenrechte erfolgt eine Abänderung der Lernernamen in von den Lernern ausgewählte Synonyme.
- **Kommentierung.** Über das Wortprotokoll hinaus werden Stellen kommentiert, die im Sinne der Fragestellung gewinnbringend sein können. So werden längere Sprechpausen notiert, da sie Hinweise darauf geben können, wie vertraut die Lerner mit den geäußerten Vorstellungen sind. Als Pausenzeichen sind Striche (/) gewählt, wobei jeder Strich circa einer Sekunde entspricht. Reine Pausenfüller wie „Äh“ werden als Pausen behandelt und so verschriftlicht. Wird ein Sprecher durch einen anderen unterbrochen oder ändert er seinen Satzbau, wird dies durch „...“ gekennzeichnet. Nonverbale Äußerungen wie Gestik und Mimik, Lachen und technische Hinweise werden als Kommentare in Klammern aufgenommen. Für eine einfache spätere Bezugnahme auf Transkriptausschnitte werden Zeilennummern in das Transkript integriert.

84	Interviewer: „Ihr habt ja jetzt gesagt, Kohlenstoffdioxid sei der Hauptfaktor der globalen Erwärmung. Beschreibt doch mal, was dieses Kohlendioxid macht, damit es wärmer wird.“
85	
86	Max: „War es nicht so, dass es nicht die Ozonschicht irgendwie angreift und dadurch halt, dass das
87	Ozonloch dann durch diese Beschädigung immer größer wird, wie gesagt mehr Wärme einstrahlt
88	und dadurch auch wärmer wird? Mehr ja... also, dass es halt die Ozonschicht angreift. Wie das im
89	Einzelnen jetzt,... wie genau die Moleküle... oder was jetzt da wie zerstört wird, weiß ich jetzt auch
90	nicht. Ich bin...“
91	Lukas: „Ja, ich hab mir das auch so vorgestellt, dass CO ₂ sozusagen kleine Teilchen sind, Kohlen-
92	stoff- und Sauerstoffatome, die dann zum Beispiel beim Verbrennen freigesetzt werden und dass
93	die sozusagen dann nach oben wandern und dann an der Ozonschicht was verändern. So hätte ich
94	mir das immer vorgestellt. Also so, dass die Ozonschicht... dieses Loch sozusagen wie so... ich
95	meine wie man sich beim Zahnarzt immer diese Informationsfilme guckt, wo diese kleinen Tier-
96	chen kommen und sozusagen das auffressen. So hab ich mir das bei der Ozonschicht auch vorge-
97	stellt. So rein bildlich, mit einem Ozonloch, das größer wird.“

Tabelle 7.1: Beispiel eines Transkriptes

Redigieren der Aussagen

Durch das Redigieren sollen die Aussagen des Lerners an Klarheit und Zugänglichkeit gewinnen. Ausgehend von der Fragestellung wird das Transkript dabei bearbeitet, um die Aussagen für die Auswertung lesbarer und prägnanter werden zu lassen. Das Redigieren findet in vier Schritten statt.

- **Selektion bedeutungstragender Aussagen.** Es erfolgt eine erneute, von der Fragestellung geleitete Reduktion des Datenmaterials. Passagen, die nebensächliche Äußerungen enthalten, werden ausgelassen. Die Herkunft der Aussagen wird durch die jeweilige Anfangs- und End-Zeilenummer des Transkripts dokumentiert, die in runden Klammern davor gesetzt werden.
- **Auslassen von Redundanzen sowie Füllwörtern und -sätzen.** Die wörtliche Rede ist oft von Redundanzen, durchsetzt, die das Lesen unnötig erschweren. Diese werden, ebenso wie Füllwörter und -sätze ausgelassen. Variationen einzelner Wörter, wie auch Präzisierungen werden in Klammern hinzugesetzt. Dabei muss entschieden werden, inwiefern bestimmte vom Lerner benutzte Begriffe weiterführend sind oder synonym benutzt werden.
- **Transformation in eigenständige Aussagen des Interviewpartners.** Die Äußerungen der Lerner werden so umformuliert, dass sie unabhängig vom Interviewenden für sich Sinn tragende Aussagen darstellen. D. h. Fragen und Anmerkungen des Interviewenden werden in eigenständige Äußerungen des Interviewten transformiert.

- **Paraphrasierung.** Die Aussagen des Interviewten werden grammatikalisch geglättet und als ganze Sätze formuliert. Dabei soll jedoch der Sprachstil des jeweiligen Lernalers erhalten bleiben.

Anschließend erfolgt durch einen Vergleich der redigierten Aussagen mit dem Mitschnitt eine Qualitätsprüfung, mit der sichergestellt werden soll, dass die redigierten Aussagen der Lerner mit den von ihnen getroffenen Aussagen übereinstimmen.

Max (84-90): „War es nicht so, dass das CO₂ die Ozonschicht angreift und durch diese Beschädigung das Ozonloch immer größer wird? Dadurch wird mehr Wärme eingestrahlt und es wird wärmer. Was da wie zerstört wird (wie genau die Moleküle das zerstören), weiß ich nicht.“

Lukas (91-97): „Ich hab mir das auch so vorgestellt, dass CO₂ sozusagen kleine Teilchen sind, Kohlenstoff- und Sauerstoffatome, die bei Verbrennungen freigesetzt werden. Die wandern dann nach oben und verändern was an der Ozonschicht. Wie man sich beim Zahnarzt immer diese Informationsfilme anguckt, wo diese kleinen Tierchen kommen und das auffressen. So habe ich mir das bei der Ozonschicht auch vorgestellt. So rein bildlich, mit einem Ozonloch, das größer wird.“

Tabelle 7.2: Beispiel Redigierter Aussagen

7.2.6 Auswertung der Daten

Nach der Aufbereitung der Daten werden diese mithilfe der Qualitativen Inhaltsanalyse und einer Metaphernanalyse ausgewertet. Das Vorgehen bei der Metaphernanalyse ist in Kapitel 6.2.2 beschrieben. Ihre Ergebnisse fließen in die Explikation der Vorstellungen im Rahmen der Qualitativen Inhaltsanalyse ein. Die Qualitative Inhaltsanalyse folgt dabei dem von Gropengießer (2005) und Mayring (2003) vorgeschlagenen Vorgehen und gliedert sich in das Ordnen der Aussagen, die Explikation und die Einzelstrukturierung. Bei Zweifelsfällen in der Interpretation wird auf Originalaufzeichnungen zurückgegriffen.

Ordnen der Aussagen

Die redigierten Aussagen der Lerner werden zu Komplexen zusammengefasst. Dabei sollen individuelle Denkgebäude der Lerner möglichst in ihrem eigenen Sprachstil dargestellt werden. Das Ordnen erfolgt in folgenden Schritten:

- **Thematisches Ordnen.** Entsprechend der Fragestellung werden die Aussagen der Lerner in sich aus dem Material ergebende Themenfelder geordnet.
- **Kohärenzprüfung und Identifizierung von Widersprüchen.** Es wird geprüft, ob die einzelnen Vorstellungen zueinander kohärent sind oder ob Widersprüche z. B. in Form von Parallelkonzepten auftreten. Kohärente Aussagen werden zusammengefasst, gegensätzliche Aussagen bleiben bestehen. Metaphern, Analogien und sprachliche Eigenheiten bleiben erhalten.
- **Sequenzierung.** Einzelne Aussagen werden in eine sinnvolle Reihenfolge gebracht, wobei Argumentationsketten erhalten bleiben.

Geordnete Aussagen von Lukas

Ursache der Erwärmung (42-46, 91-97)

Das hängt beides miteinander zusammen: Die Treibhausgase sorgen dafür, dass das Ozonloch größer wird. Und dadurch, dass das Ozonloch größer wird, gibt es mehr Sonneneinstrahlung. Die Strahlung wird auch mehr irgendwie gespiegelt.

Eigenschaften des CO₂ (89-97)

CO₂ sind kleine Teilchen, Kohlenstoff- und Sauerstoffatome, die bei Verbrennungen freigesetzt werden. Die wandern dann nach oben und verändern was an der Ozonschicht.

Quelle der Vorstellung Erwärmung Durch Ozonloch (89-96)

Ich stelle mir das mit dem größer werdende Ozonloch bildlich so vor, wie diese Informationsfilme beim Zahnarzt, wo diese kleinen Tierchen kommen und das auffressen.

Tabelle 7.3: Beispiel geordneter Aussagen

Explikation

Mit der Explikation wird das Ziel verfolgt, das für den jeweiligen Lerner charakteristische Verständnis zu ermitteln sowie Quellen der Vorstellungen und Brüche in selbigen aufzudecken. Es findet eine interpretative Erschließung der Charakteristika der jeweiligen Vorstellungen statt. Dabei wird zwischen einem Verständnis, welches in lebensweltliche Erfahrungen und einem, welches in wissenschaftsorientierten Erfahrungen gründet, unterschieden. Vor dem Hintergrund der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens fließen an dieser Stelle mit einer Analyse der sprachlichen Aspekte auch die Ergebnisse der Metaphernanalyse wie sie in Kapitel 6.2.2 beschrieben ist ein. In Hinblick auf die Vermittlungsabsicht der Studie sollen Widersprüche und Schwierigkeiten im Lernerverständnis dokumentiert werden.

Lukas stellt sich vor, dass die globale Erwärmung durch Treibhausgase verursacht wird. Er nennt dabei CO₂ als einziges Treibhausgas. Die Freisetzung von CO₂ führt er auf Verbrennungsprozesse zurück, beschreibt das Edukt der Verbrennung jedoch nicht näher.

Das CO₂ zerstört seinen Vorstellungen zufolge die Ozonschicht, sodass mehr Sonnenstrahlung in die Atmosphäre eindringen kann. Lukas greift somit auf ein Behälterschema zurück, bei dem die Behälterwand von der Ozonschicht gebildet wird. Durch die vom CO₂ verursachten Löcher in der Ozonschicht kommt es zu einer vermehrten Einstrahlung. Daraus geht implizit hervor, dass die intakte Ozonschicht die Erde vor zu viel Sonnenstrahlung schützt.

Die seine Vorstellungen zur globalen Erwärmung leitende Denkfigur ist somit ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH mit dem lebensweltlichen Hintergrund ERWÄRMUNG DURCH MEHR EINSTRAHLUNG. Er erklärt zusätzlich, dass die Strahlung mehr reflektiert werde und bezieht sich dabei, wie eine ergänzende Zeichnung belegt, auf eine Spiegelung der Strahlung zwischen Erdoberfläche und Ozonschicht. Die zusätzlich einfallende Sonnenstrahlung wird somit zwischen Ozonschicht und Erde in einer Art Falle gefangen. Es findet hier somit eine Hybridisierung der Konzepte aus der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT und ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH zur VARIANTE ERWÄRMUNG DURCH STRAHLENFALLE statt.

Als Quelle seiner Vorstellung gibt er die mediale Vermittlung über Filme beim Zahnarzt an. Er analogisiert das CO₂ mit Bakterien (die er für Tiere hält), die die Zähne zerstören.

Tabelle 7.4: Beispiel einer Explikation

Einzelstrukturierung

Die Interpretation des Datenmaterials wird in der Einzelstrukturierung weitergeführt. Hier werden die Vorstellungen der Lerner auf der Ebene von Konzepten und Denkfiguren formuliert, bezeichnet und kurz beschrieben. Die Formulierung der Konzepte erfolgt auf der gleichen Ebene, wie jene Konzepte, die aus der fachlichen Klärung hervorgehen, damit diese später einander gegenüber gestellt werden können.

Innerhalb der Kommunikationssituation können die Lerner zum einen Vorstellungen äußern, die sie persönlich als richtig ansehen. Zum anderen können die Konzepte auch fragend diskutiert oder explizit abgelehnt werden. Für das Verständnis und die Interpretation der Lernervorstellungen können diese kontrastierenden oder ablehnenden Vorstellungen nützlich sein (vgl. Gropengießer 2001).

Die Konzepte werden wie folgt gekennzeichnet: a) vom Lerner zustimmend vertreten (+), b) vom Lerner antithetisch vertreten (-), c) vom Lerner fragend diskutiert (?). Grau unterlegte Konzepte werden nur teilweise als Teil der Denkfigur genannt.

ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH VAR. STRAHLENFALLE

- + **Ozonschicht schützt vor Sonnenstrahlung.** Die Ozonschicht schützt die Erde vor zu viel Sonneneinstrahlung.
- + **CO₂ aus Verbrennung.** Durch Verbrennungsprozesse wird CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt.
- + **CO₂ zerfrisst Ozonschicht.** Das CO₂ frisst Löcher in die Ozonschicht.
- + **Sonnenstrahlung dringt durch Ozonlöcher zur Erde.** Durch die beschädigte Ozonschicht dringen Sonnenstrahlen zur Erde vor.
- + **Sonnenstrahlung erwärmt Erde.** Die Erde wird durch von der Sonne kommende Strahlung erwärmt.

Tabelle 7.5: Beispiel einer Strukturierung

Darstellung der Daten

Die Auswertung der Interviews und Vermittlungsexperimente folgte dem oben angegebenen Vorgehen. Die Darstellung der Vorstellungen zu verschiedenen Aspekten des Klimawandels in dieser Studie ist hingegen nicht in Form von Einzelstrukturierungen nach Lernern, sondern nach den identifizierten Denkfiguren aufgeschlüsselt. Insofern folgt die Darstellung der Analyse vom Ergebnis her: Die Ergebnisse der Inhaltsanalyse und auch der Metaphernanalyse sind nach Denkfiguren geordnet.

Die auf Ebene der Denkfiguren dargestellten Vorstellungen der Lerner sind jeweils mit beispielhaften Äußerungen der Lerner eingeleitet und anschließend expliziert. Diese Äußerungen entstammen den Interviews. Sie sind redigiert und geordnet worden, was zu einer starken Kondensation der Aussagen führt. Dargestellt sind hier somit Beispielaussagen mit dem Ziel eine möglichst große Varianz an Vorstellungen abzubilden und zu analysieren.

In der Analyse wird deutlich, dass die Lerner im Laufe eines 60 bis 110-minütigen Interviews bzw. Vermittlungsexperimente durchaus unterschiedliche Denkfiguren zu gleichen Themenbereichen formulieren. Dies deutet nicht auf eine Einschränkung der Validität der Denkfiguren hin, sondern ist u. a. auf die Vorstellungsentwicklung im Laufe der Interviewphasen zurückzuführen.

Um eine Vergleichbarkeit der Alltagsvorstellungen untereinander, aber auch mit den Wissenschaftlervorstellungen zu erreichen, wird in den Beschreibungen der einzelnen Denkfiguren eine Verallgemeinerung herbeigeführt. Um die Nachvollziehbarkeit der Interpretationen zu gewährleisten, sind zu Beginn der Beschreibung jeder Denkfigur die geordneten Lerneraussagen aufgeführt. Anschließend sind in der Explikation individuelle Konzepte gleichen Inhalts zusammengeführt und in einem sie umschließenden Konzept verallgemeinert. Die Darstellung folgt somit immer der Form

- Geordnete Aussagen: „Aussage a, b, c“
- Explikation: individuelles Konzept a, b, c
- Verallgemeinerung: verallgemeinertes Konzept a, b, c
VERALLGEMEINERTE DENKFIGUR ABC

7.3 Lernervorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf im Klimawandel

In diesem Abschnitt werden die Äußerungen der Lerner zu den Ursachen der globalen Erwärmung dargestellt. Die Daten entstammen dabei den entsprechenden Abschnitten der Interviewstudie und den Einstiegspassagen der Interventionsstudie.

Neben der Emission von Kohlenstoffdioxid nennen die untersuchten Lerner noch eine Zahl weiterer Treibhausgase als Ursache des Klimawandels. Da sich die Fragestellung dieser Untersuchung auf Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf bezieht und das Treibhausgas CO₂ mit einem Anteil von mehr als 2/3 der vom Menschen verursachten Erwärmung der größte Einzelfaktor ist (vgl. u.a. IPCC 2007), wird die folgende Auswertung auf das CO₂ im Rahmen des Kohlenstoffkreislaufs fokussiert.

7.3.1 Denkfigur: Künstliches Kohlenstoffdioxid

Die Denkfigur ist charakterisiert durch die Vorstellung, dass CO₂ ausschließlich durch industrielle Aktivitäten freigesetzt wird. Eine natürliche CO₂-Emission wird entweder nicht erwähnt oder abgelehnt. Da industrielle Prozesse vom Menschen verursacht und somit künstlich sind, werden Vorstellungen, die eine ausschließlich auf der Verbrennung fossiler Energieträger beruhende CO₂-Emission ausdrücken, unter der Denkfigur KÜNSTLICHES KOHLENSTOFFDIOXID zusammengeführt.

Geordnete Aussagen

Tina (24-30, 71-73, 90): „Den CO₂-Ausstoß kann man nicht auf Null reduzieren. So ein bisschen schon, aber ich glaube nicht, dass wir alles umstellen können, mit so viel Industrialisierung. Wenn man komplett auf Erneuerbare Energien umstellen würde, würde es gehen, den CO₂-Ausstoß auf Null zu reduzieren.“

Felix (108-114, 142-158, 284-287): „CO₂-Gase aus der Verbrennung von Benzin aus Autos, Fabriken und Industrie haben einen großen Anteil an der globalen Erwärmung. Man kann alternative Energien nutzen, aber es wird immer irgendwo durch Verbrennung CO₂ ausgestoßen. Der Ausstoß wird also nie auf komplett Null reduzierbar sein.“

Jakob (282-308, 406-431): „Der CO₂-Ausstoß ist unnatürlich. Den gab es bei einem früheren Klimawandel nicht. Ich glaube nicht, dass man seinen CO₂-Ausstoß auf Null reduzieren kann, jedenfalls nicht in den nächsten fünfzig Jahren. Dazu ist der Mensch viel zu abhängig davon. [...] CO₂ ist ein Giftgas. Ich weiß nicht, ob man diese CO₂-Moleküle irgendwie spalten kann, dass die nicht mehr gefährlich sind.“

Detlef (88-94, 194-227, 344-354, 376-390): „Der CO₂-Ausstoß ist generell schlecht. Der Klimawandel kommt durch die Fabriken in China, die Abgase in die Luft pusten. Holz ist kein fossiler Brennstoff, da entsteht bei der Verbrennung kein CO₂. Wenn man die Abgase mit Partikelluftfiltern ordentlich gefiltert hätte, könnte man den CO₂-Ausstoß bestimmt um 50 % verringern.“

Ina (189-236, 245-301): „Das CO₂ kommt aus der Verbrennung von Brennstoffen (Diesel, Benzin, Öl, Kerosin). Wenn Holz kein fossiler Brennstoff ist, wird da kein CO₂ drin sein. Das ist wie eine autoimmune Krankheit, weil das Öl in unserer Erde drin ist. Wenn du es rausholst und benutzt, zerstört es die Ozonschicht. Um den CO₂-Ausstoß zu senken, müssten wir Partikelfilter nutzen.“

Dirk (194-227, 368-379): „CO₂ entsteht bei der Verbrennung von Brennstoffen. Außer bei Holz, denn Holz ist kein fossiler Brennstoff.“

Daniel (161-164, 291-301): „CO₂ entsteht durch die Verbrennung von Öl oder von den fossilen Brennstoffen. Die Schadstoffe aus der Verbrennung sind giftig. In normaler Luft ist kein CO₂ drin. Jeder sollte einen Filter einbauen, der das CO₂ filtert.“

Nanni (55-71): Das CO₂ kommt von Fabriken und Autos. Bei den Autos ist es die Verbrennung von dem Benzin und in den Fabriken ist es die Verbrennung von Erdöl.

Explikation

Lerner, die auf die Denkfigur KÜNSTLICHES KOHLENSTOFFDIOXID zurückgreifen, beschreiben die Verbrennung fossiler Energieträger als einzige Quelle des atmosphärischen Kohlenstoffdioxids. Natürliche Prozesse, wie die physiologische oder biogeochemische Fixierung und Emission von CO₂ (Atmung, Fotosynthese, Lösungsprozesse) werden entweder nicht genannt oder zurückgewiesen. Ina z. B. unterscheidet sehr deutlich zwischen erneuerbaren Rohstoffen wie Holz auf der einen und fossilen Rohstoffen auf der anderen Seite. Ursächlich für die Entstehung von CO₂ ist hier somit nicht der Verbrennungsprozess an sich, sondern das Edukt der Verbrennung. Die Konzepte

CO ₂ aus Verbrennung von Öl, Kohle, Gas, Benzin	(alle)
Holz enthält kein CO ₂	(Dirk, Detlef, Ina)
Null CO ₂ -Emissionen sind möglich mit Erneuerbaren Energien	(Tina)
Null CO ₂ -Emissionen sind nicht möglich wegen der Industrie	(Tina, Felix, Jakob)

sind somit verschiedene Ausprägungen einer Vorstellung, nach der Kohlenstoffdioxid ausschließlich in fossilen Energieträgern enthalten ist. Stoffe wie Holz kann man verbrennen, ohne dass CO₂ entsteht. Bei der Verbrennung fossiler Energieträger hingegen wird CO₂ freigesetzt. Die Ursache der CO₂-Emission wird in dieser Denkfigur somit nicht prozessorientiert an der *Verbrennung*, sondern an den Edukten *Erdöl, Öl, Kohle, Gas, Benzin, Kerosin etc.* orientiert betrachtet. Die von den Lernern genannten Ausgangsstoffe der CO₂-Produktion können zusammenfassend als *fossiler Kohlenstoff* bezeichnet werden. Die Bezeichnung *fossiler Kohlenstoff* erscheint angemessener als die häufig gebrauchte Bezeichnung *fossile Brennstoffe*, da ersteres den Stoff statt seiner Verwertungsabsicht hervorhebt und somit weniger utilitaristisch ist.

Der Logik der Vorstellungen folgend ist das CO₂ aus fossilem Kohlenstoff Basis der globalen Erwärmung. Das Konzept *CO₂ aus Lebewesen* (vgl. Kapitel 6.3.3) wird entweder nicht genannt und spielt somit für Lerner in diesem Kontext keine Rolle, oder aber das Konzept wird – wie von Ina, Detlef und Dirk – sogar abgelehnt. Nanni erklärt ihre Vorstellung von einem schädlichen CO₂ aus Erdöl mit der Verweildauer im Erdboden: „*Vielleicht ist Erdöl schädlicher als Rapsöl, weil es länger im Boden ist.*“ (Nanni, 307-309). Stoffe, die aus der Erde kommen und verbrannt werden, setzen ihrer Meinung nach CO₂ frei. Ein möglicher Erklärungsansatz wäre, dass der Erdboden lebensweltlich als schmutzig und dreckig wahrgenommen wird, genau wie Erdöl und Kohle. Natur wird hingegen als schön, rein und natürlich (vgl. Gebhard 2009, S. 43f.), also sauber wahrgenommen. Die Lerner greifen hier also auch auf das Natürlich-Künstlich-Schema zurück (vgl. Kapitel 2.2.4). Nanni weiß nicht, was unter der Erdoberfläche passiert, weshalb ihr sich die Vorgänge dort nicht erschließen. Je länger sich ein Stoff unter der Erdoberfläche befindet, desto mehr Zeit stand zur Verfügung, in der sich der Stoff von einem sauberen Teil der Natur zu einem dreckigem Teil des Bodens verändert haben kann. Wenn man also die „saubere, schöne“ Natur verbrennt, wird dabei kein schmutziges, die Atmosphäre zerstörendes CO₂ freigesetzt, während bei der Verbrennung von Öl aus dem Boden klimafeindliches CO₂ freigesetzt wird.

Verzichtet man auf die Verbrennung fossiler Energieträger, z. B. durch die Nutzung erneuerbarer Energien, wäre eine Null-Emission von CO₂ in den Vorstellungen der Lerner möglich. Insbesondere die Argumentation der Lerner auf die von Friedensnobelpreisträger Al Gore in seinem Film „An Inconvenient Truth“ geäußerte Forderung „*Reduzieren Sie Ihren CO₂-Ausstoß auf Null*“ (Gore 2006) lässt die Monokausalität der CO₂-Emission deutlich werden: „*Wenn man komplett auf erneuerbare Energien umstellen würde, würde es gehen, den CO₂-Ausstoß auf Null zu reduzieren*“ (z. B. Tina, 71-73). Diese Argumentation deutet darauf hin, dass CO₂ als ein Stoff betrachtet wird, der keinen natürlichen, sondern einen ausschließlich künstlichen, vom Menschen herbeigeführten Ursprung hat. Einige Lerner bestärken diese Interpretation, indem sie CO₂ als Giftgas bezeichnen, das in normaler Luft nicht vorkommt. Die Konzepte

CO ₂ ist ein Giftgas	(Jakob)
Normale Luft enthält kein CO ₂	(Daniel)
CO ₂ ist ein Schadstoff	(Daniel)
CO ₂ muss aus den Abgasen gefiltert werden	(Ina, Detlef, Daniel)
Künstliche CO ₂ -Spaltung	(Jakob)

stützen die Interpretation, nach der CO₂ als ein Fremdkörper in der Atmosphäre gesehen wird. Ohne den vom Menschen ausgelösten Industrialisierungsprozess und die damit verbundene Verbrennung fossilen Kohlenstoffs gäbe es kein CO₂ und somit auch keinen Klimawandel.

Aus den Vorstellungen gehen folgende Konzepte bzw. Erweiterungen oben beschriebener Konzepte hervor: *Die natürliche Atmosphäre enthält kein CO₂ und Künstliches CO₂ aus fossilem Kohlenstoff.* Die den Konzepten gemeinsame Vorstellung ist: *CO₂ ist ein künstlicher Stoff, der durch Verbrennung auf künstlichem Weg in die Atmosphäre gelangt ist.* Dieser künstliche Stoff kann nicht auf natürlichem Wege aus der Atmosphäre entfernt werden, sondern bedarf einer künstlichen Intervention des Menschen. Dies wird besonders in Konzepten wie *CO₂ muss aus*

dem Abgas gefiltert werden oder CO_2 muss gespalten werden deutlich. CO_2 ist ein Fremdkörper in der Luft, der nur auf künstlichem Wege wieder aus der Atmosphäre entfernt werden kann, z. B. indem man die Luft filtert oder die CO_2 -Moleküle künstlich spaltet. In Konzepten, wie

CO_2 ist schlecht (Detlef)
 CO_2 ist gefährlich (Jakob)

wird über die kognitive Zuschreibung von CO_2 zu verschiedenen Aspekten des Klimawandels eine Konnotation von Empfindungen wie *Gefahr* oder die negativ wertende Einschätzung *schlecht* deutlich. Auf Grundlage des Natürlich-Künstlich-Schemas zeigt sich, dass CO_2 als künstlicher Stoff beschrieben wird, der einen negativen Einfluss auf die Atmosphäre und durch den Klimawandel auf unsere Zukunft hat. Diese negative Bewertung des CO_2 spiegelt sich auch im medialen Diskurs zum Klimawandel wider (Pansegrau 2000; Weingart et al. 2000).

Eine Variante der Vorstellung wird von Ina in der Metapher *Erde als Lebewesen* ausgeführt: „Das ist wie eine autoimmune Krankheit, weil das Öl in unserer Erde drin ist. Wenn du es rausholst und benutzt, zerstört es die Ozonschicht“ (Ina, 240-253). Autoimmunkrankheiten sind Erkrankungen, die durch immunologische Reaktionen gegenüber körpereigenen Proteinen bzw. Zellantigenen bedingt sind. Kohlenstoff ist in ihrer Vorstellung somit ein natürlicher Bestandteil der Erde, der unschädlich ist, solange der Kohlenstoffspeicher *Fossiler Kohlenstoff* kein Kohlenstoff aus ihm entnommen wird. Wird der Kohlenstoff in die Atmosphäre freigesetzt, kommt es zum Klimawandel.

Verallgemeinerung

Die Denkfigur kann wie folgt verallgemeinert und durch die beigeordneten Konzepte beschrieben werden:

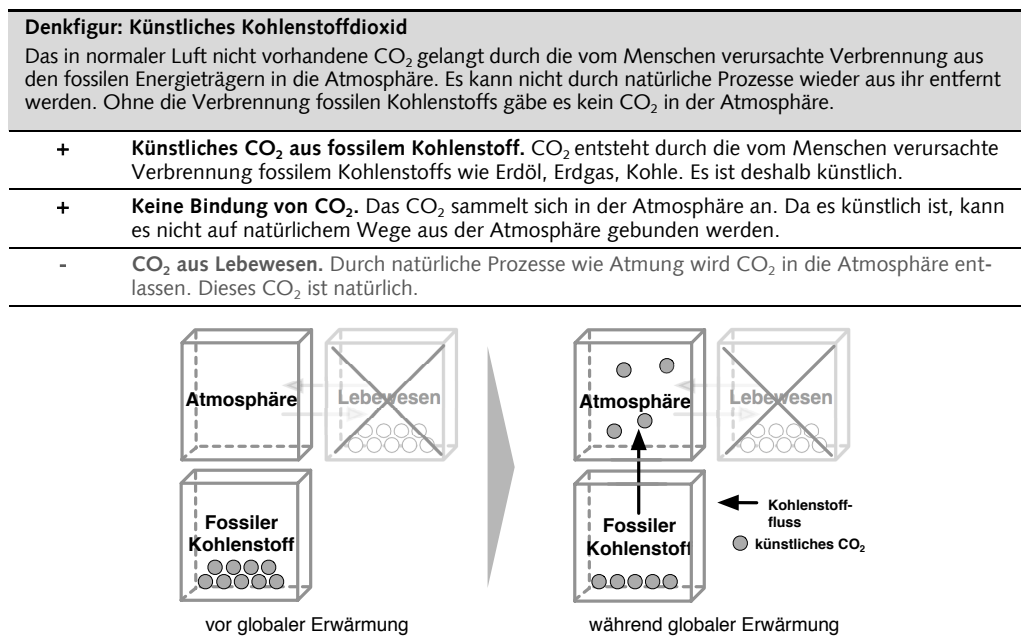


Tabelle 7.6: Denkfigur KÜNSTLICHES CO_2

7.3.2 Denkfigur: Natürliches und künstliches Kohlenstoffdioxid

In der Denkfigur NATÜRLICHES UND KÜNSTLICHES KOHLENSTOFFDIOXID sind Lernervorstellungen zusammengefasst, die sowohl natürliche CO₂-Quellen (z. B. Atmung) also auch künstliche Quellen (z. B. Verbrennung) beschreiben. Unterschieden werden hierbei jedoch nicht nur die Quelle des CO₂, sondern auch seine Beschaffenheit: Mit den verschiedenen Quellen werden auch verschiedene molekulare Eigenschaften verbunden.

Geordnete Aussagen

Gustav (157-230): „Der Mensch atmet CO₂ aus. Das wird dann von den Pflanzen durch Fotosynthese wieder umgesetzt zu Sauerstoff, den wir atmen. Es ist eine Tatsache, dass das CO₂ aus der Verbrennung strukturell verändert ist, wodurch es nicht mehr, wie bei der Atmung, gebunden werden kann.“

Fritz (157-230): „Wenn etwas so oder so stattfindet, ist das nicht chemisch. [...] Es gibt einen Unterschied zwischen dem CO₂ aus der Verbrennung von Öl und aus der Atmung. Vielleicht ist das eine CO₂ radioaktiv? ¹⁴C-Atome und ¹⁶C-Atome sind auch unterschiedlich. Die CO₂-Atome sind wahrscheinlich unterschiedlich aufgrund der anderen Erzeugung.“

Emma (198-209): „Es gibt keinen Zusammenhang zwischen dem CO₂, das die Pflanzen produzieren und dem CO₂, das wir durch Verbrennung beim Autofahren produzieren. Das eine ist chemisch und aus Menschenhand und nichts Biologisches.“

Explikation

In dieser Denkfigur äußern Lerner die Existenz eines natürlichen CO₂, das aus physiologischen Prozessen hervorgeht sowie eines künstlichen CO₂, das durch vom Menschen verursachte Verbrennungsprozesse entstanden ist. Die Beschreibung des künstlichen Kohlenstoffdioxids folgt dabei dem Konzept *Künstliches CO₂ aus fossilem Kohlenstoff*:

CO ₂ entsteht beim Autofahren	(Emma)
CO ₂ aus der Verbrennung von Öl	(Fritz)

Darüber hinaus wird noch ein weiteres, auf natürlichem Wege entstehendes Kohlenstoffdioxid beschrieben:

Der Mensch atmet CO ₂ aus	(Gustav, Fritz)
Pflanzen produzieren CO ₂	(Emma)
Pflanzen binden CO ₂ vom Menschen	(Gustav)

Dieses natürliche CO₂ ist in der Atmosphäre vorhanden, solange es atmende Lebewesen gibt. Die Konzepte beschreiben die Vorstellung eines natürlichen CO₂, das durch den Prozess der Atmung emittiert und anschließend auf natürlichem Wege wieder durch die Fotosynthese fixiert wird. Diese Vorstellung gründet in den Konzepten *CO₂ aus Lebewesen* und *Bindung von CO₂ aus Lebewesen*.

Die Eigenschaften des Kohlenstoffdioxids aus der Atmung und der Verbrennung werden von den Lernern dabei als unterschiedlich beschrieben:

CO ₂ aus Verbrennung ist strukturell verändert	(Gustav)
CO ₂ aus der Verbrennung ist radioaktiv	(Fritz)
CO ₂ aus Verbrennung ist chemisch	(Emma)
CO ₂ aus Verbrennung und Atmung ist unterschiedlich	(Fritz)
Chemisches CO ₂ ist anders als biologisches CO ₂	(Emma)

Die Lerner unterscheiden zwischen einem *biologischen, nicht-chemischen, nicht-radioaktiven* CO₂ aus der Atmung und einem *chemischen, strukturell veränderten, radioaktiven* CO₂ aus der Verbrennung. Die Unterscheidung zwischen den verschiedenartigen Kohlenstoffdioxiden wird durch die involvierten Kohlenstoffreservoirs (*Lebewesen vs. fossiler Kohlenstoff*) und die Freisetzungsprozesse (*Verbrennung vs. Atmung*) getroffen:

Das künstliche CO₂ wird aus dem Behälter *fossiler Kohlenstoff* durch den künstlichen Prozess der Verbrennung freigesetzt. Das natürliche CO₂ hingegen wird durch den natürlichen Prozess der Atmung aus dem natürlichen Behälter *Lebewesen* freigesetzt. Die Vorstellungen der Lerner lassen die Konzepte *CO₂ aus fossilem Kohlenstoff* und *CO₂ aus Verbrennung ist chemisch* sowie *CO₂ aus Lebewesen* und *CO₂ aus Atmung ist biologisch* zu den verallgemeinerten Konzepten *Künstliches CO₂ aus fossilem Kohlenstoff* und *Natürliches CO₂ aus Lebewesen* zusammenführen. Die Lerner greifen an dieser Stelle somit auf das Natürlich-Künstlich-Schema zurück und schreiben die Eigenschaften *künstlich* und *natürlich* dem CO₂ zu, das chemisch oder biologisch, strukturell verändert oder unverändert sowie radioaktiv oder nicht radioaktiv sein kann.

Die unterschiedlichen Eigenschaften führen dazu, dass das CO₂ aus der Verbrennung im Gegensatz zum CO₂ aus der Atmung nicht mehr durch die Fotosynthese gebunden werden kann:

Pflanzen binden CO ₂ aus der Atmung	(Gustav)
CO ₂ aus Verbrennung kann nicht gebunden werden	(Gustav)
Es gibt keinen Zusammenhang zwischen CO ₂ aus der Verbrennung und CO ₂ aus der Atmung	(Emma)

Während Emma Zusammenhänge zwischen dem CO₂ aus der Verbrennung und der Atmung ablehnt, beschreibt Gustav seine Vorstellungen ausführlicher: Das natürliche CO₂ kann durch den natürlichen Prozess der Fotosynthese von den Pflanzen wieder gebunden werden, während das auf künstlichem Wege entstandene CO₂ strukturell so verändert ist, dass es von den Pflanzen nicht gebunden werden kann und in der Atmosphäre verbleibt. Es lässt sich somit das Konzept *Bindung von natürlichem CO₂* verallgemeinern

Die von den Lernern erwähnten physiologischen Prozesse der CO₂-Freisetzung und Fixierung werden nicht mit der ökologischen Frage der globalen Erwärmung verknüpft. Dies führt zu der Vorstellung eines Kreislaufs zwischen Atmosphäre und Lebewesen, der durch Atmung und Fotosynthese angetrieben wird. Die Vorstellung der CO₂-Emission durch die Verbrennung ist durch eine Einbahnstraße geprägt, in der das CO₂ nur vom fossilen Kohlenstoff in die Atmosphäre fließen kann. Aufgrund der strukturellen Unterschiede zwischen dem CO₂ aus der Atmung und dem CO₂ aus der Verbrennung kann das CO₂ aus der Verbrennung nicht in den Kreislauf zwischen Lebewesen und Atmosphäre aufgenommen werden.

Die Lerner greifen auch in dieser Denkfigur auf das Behälterschema zur Beschreibung der CO₂-Freisetzung zurück. Sie involvieren dabei neben den Kohlenstoffreservoirs *Atmosphäre, fossiler Kohlenstoff* auch die *Lebewesen*.

Die Vorstellungen der Lerner basieren auf der Idee, dass schon immer natürliches CO₂ in der Atmosphäre vorhanden gewesen sei. Dies wird begründet mit der wissenschaftsorientierten Idee der Assimilation und Dissimilation von Kohlenstoffverbindungen. Da es erst durch die verbrennungsinduzierte Freisetzung von fossilem Kohlenstoff zum Klimawandel kommt, ist dieses neue CO₂ für die Lerner anders. Die Andersartigkeit wird dabei aus dem Gegensatz natürlich-künstlich begründet und mit strukturellen Veränderungen im Kohlenstoffdioxid erklärt.

Verallgemeinerung

Die Denkfigur kann wie folgt verallgemeinert und durch die beigeordneten Konzepte beschrieben werden:

Denkfigur: Natürliches und Künstliches Kohlenstoffdioxid

Lebewesen stoßen in natürlichen Prozessen Kohlenstoffdioxid aus. Dieses Kohlenstoffdioxid kann der Atmosphäre von den Lebewesen durch natürliche Prozesse wieder entzogen werden. Durch die Verbrennung von fossilem Kohlenstoff gelangt künstliches Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre, das anders ist als das natürliche und somit nicht von den Lebewesen gebunden werden kann. Es sammelt sich in der Atmosphäre an.

- + **Künstliches CO₂ aus fossilem Kohlenstoff.** Kohlenstoffdioxid entsteht durch die künstliche Verbrennung fossiler Energieträger wie Erdöl, Erdgas, Kohle. Es ist somit künstlich.
- + **Keine Bindung von künstlichem CO₂.** Das CO₂ sammelt sich in der Atmosphäre an. Da es künstlich ist, kann es nicht auf natürlichem Wege aus der Atmosphäre gebunden werden.
- + **Natürliches CO₂ aus Lebewesen.** Durch natürliche Prozesse wie Atmung wird CO₂ in die Atmosphäre entlassen. Dieses CO₂ ist natürlich.
- + **Bindung von natürlichem CO₂.** Das natürliche CO₂ kann durch Photosynthese wieder gebunden werden.

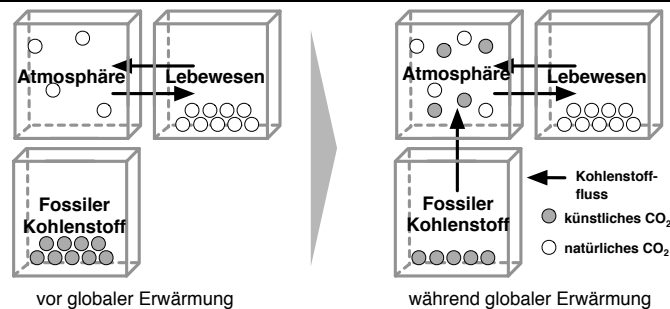


Tabelle 7.7: Denkfigur KÜNSTLICHES UND NATÜRLICHES KOHLENSTOFFDIOXID

7.3.3 Denkfigur: Pflanzennahes und -fernes Kohlenstoffdioxid

Diese Denkfigur ist durch Lernervorstellungen charakterisiert, nach denen das CO₂ aus der Atmung wieder gebunden werden kann, während das CO₂ aus der Verbrennung nicht gebunden werden kann. Die Unterschiede werden dabei nicht auf verschiedene Eigenschaften, sondern auf unterschiedliche Aufenthaltsorte des CO₂ zurückgeführt: Das CO₂ aus der Atmung ist nah bei den Pflanzen, während das CO₂ aus der Verbrennung weit von den Pflanzen entfernt ist.

Geordnete Aussagen

Marie (89, 107-180, 294-306): „Das CO₂ wird immer ausgestoßen. [...] und von den Bäumen umgewandelt. Es gibt keinen Unterschied zwischen dem CO₂ aus der Verbrennung und der Atmung. CO₂ ist CO₂. Aber das CO₂ aus der Verbrennung kommt nicht wieder runter. Es bleibt da oben.“

Detlef (195-200, 417-447): „Das CO₂ kommt aus den Fabriken, die Abgase in die Luft stoßen und der Verbrennung von Diesel, von Brennstoffen (Diesel, Benzin, Öl) aus Flugzeugen. Pflanzen machen auch noch ein bisschen CO₂. Es klappt nicht, dass das CO₂ aus der Verbrennung von den Pflanzen aus der Atmosphäre gezogen wird, weil es zu hoch ist. Das CO₂ kommt nicht wieder runter.“

Leon (47-50, 57-61): „Es gibt keine Unterschiede zwischen dem CO₂ aus Verbrennung von Öl und dem natürlichen. CO₂ ist CO₂. Es ist die Frage, wo CO₂ ausgestoßen wird. Es bringt nichts, dass der Regenwald in Afrika oder in Lateinamerika steht, aber das meiste in den USA, Europa und China ausgeblasen wird. Das CO₂ wandert nicht bis dahin und freut sich, dann aufgenommen zu werden.“

Explication

Ähnlich der Denkfigur NATÜRLICHES UND KÜNSTLICHES KOHLENSTOFFDIOXID gibt es auch in dieser Denkfigur zwei Kohlenstoffdioxide. Hier wird die Unterscheidung jedoch nicht über strukturelle Verschiedenheiten oder differierenden Eigenschaften getroffen, sondern über den Aufent-

haltsort. Als Quellen des atmosphärischen Kohlenstoffdioxids werden die Verbrennung (fossilen Kohlenstoffs) und die Atmung genannt:

Verbrennung produziert CO ₂	(Marie, Detlef, Leon)
CO ₂ aus der Atmung	(Marie)
Pflanzen machen CO ₂	(Detlef)

Auch hier lassen sich somit wieder die Konzepte *CO₂ aus fossilem Kohlenstoff* und *CO₂ aus Lebewesen* finden. Darüber hinaus wird die Möglichkeit der Bindung von CO₂ durch Pflanzen beschrieben:

Bäume wandeln CO ₂ um	(Marie)
Pflanzen ziehen CO ₂ aus der Atmosphäre	(Detlef)
Regenwald nimmt CO ₂ auf	(Leon)

Die Lerner beschreiben somit neben den Mechanismen der CO₂-Emission auch eine Möglichkeit der CO₂-Fixierung durch fotosynthetisch aktive Organismen: *Pflanzen binden CO₂*. Jedoch sind die Pflanzen nicht in der Lage, das ganze atmosphärische Kohlenstoffdioxid zu binden, da es sich an verschiedenen Orten befindet:

CO ₂ aus der Verbrennung ist oben in der Atmosphäre	(Detlef)
CO ₂ aus der Verbrennung bleibt oben	(Marie)
CO ₂ wird unten bei den Pflanzen gebunden	(Detlef)

Deutlich werden Vorstellungen, nach denen sich das CO₂ aus der Verbrennung an einem anderen Ort befindet als das von Lebewesen ausgestoßene und von Pflanzen wieder gebundene CO₂. Es lässt sich somit hier die Vorstellung eines Kohlenstoffkreislaufs finden, in dem die untere Atmosphäre und die Lebewesen im Austausch stehen, während die obere Atmosphäre als CO₂-Depot dient. Zwei grundlegende Konzepte stehen hinter diesen Vorstellungen und bestimmen die Denkfigur: *CO₂ aus der Verbrennung ist oben* und *CO₂ aus der Atmung ist unten*. Neben der vertikalen CO₂-Differenzierung *oben-unten* lässt sich bei Leon noch eine geographische Differenzierung beschreiben:

CO ₂ wird in den Industriestaaten produziert	(Leon)
CO ₂ wird in den Regenwäldern gebunden	(Leon)

Die Orte der CO₂-Produktion und der CO₂-Fixierung werden von Leon als unterschiedlich beschrieben. Das dahinter stehende Bild ist das einer grauen Industriestadt, in der CO₂ produziert wird und das eines grünen Regenwaldes, in dem CO₂ fixiert wird. Somit scheint nicht nur die Art der CO₂-Deponierung, sondern auch der Ort der Produktion für dessen Fixierung eine Rolle zu spielen. Es bilden sich somit zwei Konzepte aus, die charakteristisch für die Denkfigur PFLANZENNAHES UND -FERNES KOHLENSTOFFDIOXID ist: *CO₂ in der pflanzennahen Atmosphäre*, wobei die pflanzennahe Atmosphäre an Pflanzen bzw. Regenwälder angrenzt und *CO₂ in der pflanzenfernen Atmosphäre*, wobei die pflanzenferne Atmosphäre mit Industrielandschaften und der oberen Atmosphäre verbunden wird.

Sowohl die vertikale als auch die horizontale Differenzierung der CO₂-Vorkommen beruhen auf dem Bild einer nicht stattfindenden Durchmischung der Atmosphäre:

Das CO ₂ kommt nicht wieder runter	(Detlef)
CO ₂ aus der Verbrennung bleibt da oben	(Marie)
CO ₂ kann nicht von den Industriestaaten zum Regenwald wandern	(Leon)

Die Konzepte machen eine Vorstellung deutlich, nach der CO₂ nicht mobil ist: Wenn es durch die Industrie in die obere Atmosphäre ausgestoßen wird, kann es nicht wieder runter, bzw. wenn es in den USA produziert wird, kann es nicht im tropischen Regenwald fixiert werden. Das CO₂ ist somit an die Region seines Ausstoßes oder die Region seiner Deponierung gebunden. Das von den Lebewesen in der Atmung emittierte CO₂ hingegen ist in räumlicher Nähe zu fotosynthetisch aktiven Organismen und kann wieder gebunden werden. Deutlich wird die Ablehnung des vom IPCC und Houghton geäußerten Konzepts *Gleichmäßig verteiltes CO₂*.

In dieser Vorstellung wird das CO₂ aus der Verbrennung in einem Teil der Atmosphäre weit entfernt von den Lebewesen und somit außerhalb der Reichweite der Pflanzen abgelagert: Das CO₂ ist nicht an Orten hoher Fotosyntheseaktivität, weil es entweder zu hoch oder in den Industriestaaten deponiert ist. Während der Teil der Atmosphäre, der Kontakt zu Lebewesen hat, mit ihnen im Kohlenstoff-Gleichgewicht steht, ist der pflanzenferne Teil der Atmosphäre ein durch Verbrennungsprozesse sich stetig anfüllender Kohlenstoff-Speicher.

Verallgemeinerung

Die Denkfigur kann wie folgt verallgemeinert werden:

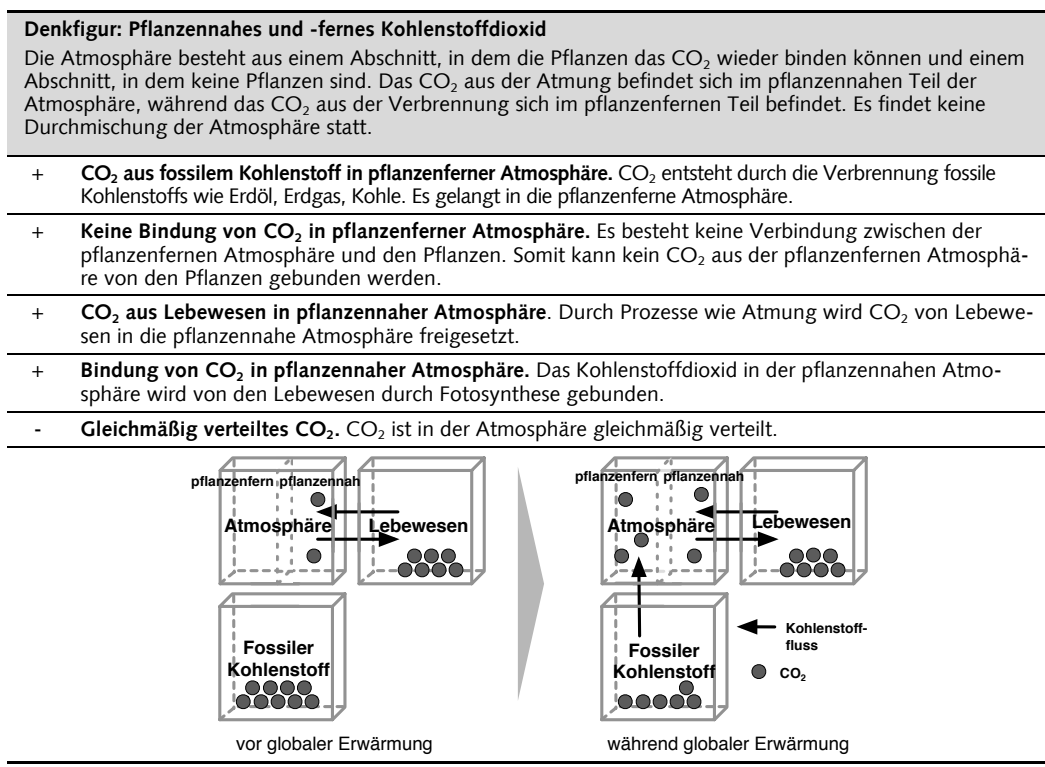


Tabelle 7.8: Denkfigur PFLANZENNAHES UND -FERNES KOHLENSTOFFDIOXID

7.3.4 Denkfigur: Anthropogenes Ungleichgewicht

Diese Denkfigur beschreibt die Entstehung der steigenden atmosphärischen CO₂-Konzentration aufgrund eines Ungleichgewichts im Kohlenstoffkreislauf. Die Entstehung des Ungleichgewichts wird dabei auf verschiedene stärker oder schwächer werdende Flüsse im Kohlenstoffkreislauf zurückgeführt.

Geordnete Aussagen

Jaqueline (44-49, 57-59, 61, 97-103, 116-118): „Es gibt immer einen CO₂-Ausstoß auf der Erde. Wenn es keinen Strom und keine Autos, sondern nur Menschen auf der Erde gibt, dann wäre das im Gleichgewicht wegen den Pflanzen. Wegen der Abholzung wird es immer mehr CO₂ in der Atmosphäre.“

Chantal (50-54, 63-70, 74-83, 104-106, 111-115, 121-123): „Dadurch, dass auch die Pflanzen weniger werden, gibt es weniger Pflanzen, die CO₂ aufnehmen oder umwandeln können. Es wird einen Ausgleich (ein Gleichgewicht) geben, sodass es zwar CO₂ auf der Welt gibt, aber nur so, dass es nicht zu dieser starken Klimaveränderung kommt.“

Dirk (427-439, 502-504): „Wenn man genügend Pflanzen hätte, könnte auch genügend CO₂ von den Pflanzen wieder resorbiert werden. Es ist zu viel CO₂, sodass die Pflanzen das nicht umsetzen können. Wir bräuchten also mehr Pflanzen. CO₂ im Übermaß ist schlecht.“

Emma (173-193): „Die Pflanzen nehmen immer so viel auf, wie sie auch brauchen können. Die Pflanze nimmt nicht noch mehr CO₂ auf, um der Menschheit gut zu tun. Damit würde sie sich selber schaden.“

Jürgen (4-13, 94-108, 526-531): „Die Industrie stört durch die Verbrennung fossiler Energieträger den natürlichen Kohlenstoffkreislauf der Erde, also das Gleichgewicht, das es eigentlich gibt, dadurch steigt die Konzentration an CO₂ in der Atmosphäre.“

Claudia (408-416, 569-589): „Das Gleichgewicht wurde dadurch gestört, dass immer mehr Verbrennung in der Industrie und immer mehr Abholzung in der Agrarwirtschaft betrieben wird, also durch menschliche Einflüsse immer mehr Treibhausgase in die Atmosphäre ausgestoßen wurden.“

Sandra (4-26): „CO₂ entsteht bei jeder Verbrennung. Es kommt auf das Gleichgewicht an. Es entsteht mehr CO₂ als die Pflanzen für die Fotosynthese brauchen.“

Kay (46-56, 63): „Wir haben das Problem, dass bei der Verbrennung von Öl immer mehr CO₂ emittiert wird. Das ist nicht das einzige CO₂, was wir haben. Es vermehrt sich und gleichzeitig wird der Regenwald abgeholzt, der ein CO₂-Speicher ist.“

Explikation

Der Denkfigur liegt die Vorstellung zugrunde, dass der Klimawandel durch zu viel CO₂ in der Atmosphäre verursacht wird. In dieser Denkfigur gibt es einen natürlichen CO₂-Gehalt in der Atmosphäre. Das durch die Verbrennung fossiler Energieträger und die Abholzung von Wäldern freigesetzte CO₂ kommt zu diesem natürlichen CO₂-Gehalt aus physiologischen Prozessen hinzu. Diese Vorstellung wird geprägt durch das Gleichgewichtsschema:

Der natürliche Kohlenstoffkreislauf ist im Gleichgewicht	(Jürgen)
Die Pflanzen sorgen für ein Gleichgewicht	(Dirk)
Ohne Strom und Autos gäbe es ein Gleichgewicht im Kohlenstoffkreislauf	(Jaqueline)
Im Gleichgewicht gibt es keinen starken Klimawandel	(Chantal)

Dieses Gleichgewicht führt zu einer gleichbleibenden CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und hält die natürlichen Lebensbedingungen auf der Erde konstant. In dieser Vorstellung stecken die verallgemeinerten Konzepte: *Kohlenstoff wird ständig ausgetauscht* und *Es gibt ein natürliches Gleichgewicht im Kohlenstoffkreislauf*. In Abgrenzung zu den vorigen Denkfiguren steht hier die Existenz eines CO₂ im Vordergrund, dessen Kohlenstoff ständig durch verschiedene Prozesse zwischen den Kohlenstoffreservoirs hin- und herfließt. Im *natürlichen, ungestörten* Zustand befinden sich diese Flüsse im Gleichgewicht, sodass die Speicher immer gleich gefüllt bleiben. Durch Zutun des Menschen jedoch gerät dieses Gleichgewicht aus den Fugen:

Verbrennung stört Kohlenstoffkreislauf	(Jürgen, Claudia, Sandra, Kay)
Mehr CO ₂ durch Abholzung	(Jaqueline, Claudia, Kay)

Durch die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs und der Abholzung kommt es zu einem Ungleichgewicht, da die Menge an atmosphärischem CO₂ zunimmt und dies nicht durch die Pflanzen ausge-

glichen werden kann: *Ungleichgewicht durch Verbrennung* und *Ungleichgewicht durch Abholzung*. Das Konzept *Ungleichgewicht durch mehr CO₂-Ausstoß als Bindung* verdeutlicht die Idee von einem Ungleichgewicht. Dabei lassen sich die in den Wissenschaftlervorstellungen gefundenen, zu einem Ungleichgewicht führenden Mechanismen (vgl. Tabelle 6.7) auch bei den Lernern finden:

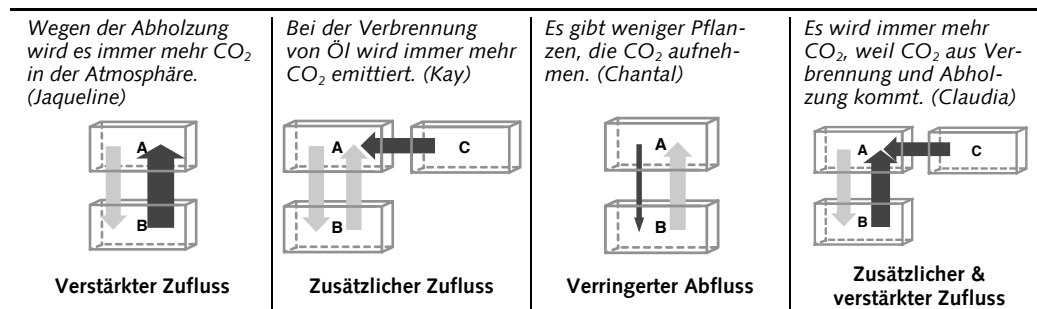


Tabelle 7.9: Ungleichgewichte im Kohlenstoffkreislauf

Die ursprünglichen Kohlenstoffflüsse sind grau, die zum Ungleichgewicht führenden schwarz gekennzeichnet.

Die Vorstellungen zur Entstehung des Ungleichgewichts unterscheiden sich in den Ursachen der Vermehrung des Kohlenstoffanteils in der Atmosphäre: *Verstärkter Ausstoß* bedeutet einen höheren Ausstoß von CO₂ aus dem Behälter *Lebewesen* (z. B. *Abholzung*), der auch vorher schon mit der Atmosphäre im Kohlenstoffaustausch stand. Bei dem Konzept *Zusätzlicher Ausstoß* wird außerdem CO₂ aus dem Speicher *fossiler Kohlenstoff* in die *Atmosphäre* entlassen. Das Konzept *Verringerter Abfluss* nimmt zusätzlich die sinkenden Kapazitäten der Biosphäre zur Kohlenstofffixierung in den Blick. Die Lerner differenzieren in ihren Äußerungen nicht zwischen den Begriffen *verstärkt* und *zusätzlich*. Eine Zuordnung der Konzepte erfolgt deshalb aufgrund der jeweiligen Behälter, aus denen das Kohlenstoffdioxid stammt.

Die von einigen Lernern geäußerte Differenzierung zwischen einem *verstärkten* und einem *zusätzlichen CO₂-Ausstoß* zeigt die Vorstellung einer qualitativen Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Ursachen eines Ungleichgewichts. Damit äußern einige Lerner – zumindest auf qualitativer Ebene – eine reflektierte Kombination des Gleichgewichtsschemas mit dem Speicher-Fluss-Schema, indem sie zwischen verschiedenen Zu- und Abflüssen unterscheiden. Nicht alle Ungleichgewichtsvorstellungen wurden bei allen Lernern gefunden. Es zeigt sich somit eine unterschiedlich reflektierte Differenzierung bei Lernern in der Beschreibung eines Gleichgewichts in Speicher-Fluss-Modellen, wie sie auch Booth-Sweeney und Serman (2000) bei Studierenden mathematisch-technischer Studiengänge finden konnten.

Die Ungleichgewichtskonzepte *Verstärkter Zufluss* und *Verringerter Abfluss* unterscheiden sich nicht in ihren relativen Flüssen: In der Bilanz betrachtet, fließt bei beiden Konzepten mehr Kohlenstoff aus dem Behälter fossiler Kohlenstoff in den Behälter Atmosphäre. Eine Unterscheidung lässt sich erst im Vergleich mit einem (ursprünglichen) Gleichgewicht treffen, demgegenüber Flüsse verstärkt oder verringert sein können. Die Ursachen für die Ungleichgewichte lassen sich getrennt, aber auch gemeinsam denken, wie folgende Vorstellung zeigt:

Es wird mehr CO₂ bei der Verbrennung von Öl emittiert und der Regenwald als CO₂-Speicher wird abgeholzt (Kay)

Abholzung bedeutet, dass sich der Kohlenstoffspeicher Lebewesen teilweise entleert und gleichzeitig – bei einer oxidativen Verwertung des Kohlenstoffs – das gebundene CO₂ in die Atmosphäre emittiert wird. Findet keine Wiederaufforstung statt, ist auch der Rückfluss von Kohlenstoff in den Speicher Lebewesen verringert.

Eindeutiger betont wird die Vorstellung der Verstärkung des Ausstoßes (*mehr CO₂-Emission*) bei gleichzeitiger Verringerung der Aufnahmekapazitäten der Pflanzen (*kleinerer CO₂-Speicher*) durch das zweite Konzept (vgl. Tabelle 7.9). Die zugrundeliegende Logik ist somit *Mehr CO₂ durch mehr Ausstoß* und *Mehr CO₂ durch weniger Bindung*.

Darüber hinaus lassen sich auch unterschiedliche Ursachen für die geringere Bindung von CO₂ im Kohlenstoffgleichgewichtes finden:

- | | | |
|-----|--|-----------|
| (1) | Es werden immer weniger Pflanzen, die CO ₂ aufnehmen | (Chantal) |
| | Mehr Pflanzen sind notwendig, um das CO ₂ umzusetzen | (Dirk) |
| (2) | Pflanzen nehmen nur so viel CO ₂ auf, wie sie brauchen. Mehr schadet ihnen. | (Emma) |
| | Es entsteht mehr CO ₂ als die Pflanzen brauchen | (Sandra) |

Den aufgeführten Konzepten ist die Vorstellung gemein, dass das Ungleichgewicht im Kohlenstoffkreislauf nicht durch die Pflanzen ausgeglichen wird, weil die Pflanzen zu wenig CO₂ aufnehmen können. Dabei lassen sich zwei Varianten in den Vorstellungen ausmachen: Die unter (1) dargestellten Konzepte machen deutlich, dass es auf Ebene des Behälterschemas zu wenige Pflanzen gibt, die CO₂ aufnehmen können. Dadurch ist der Behälter *Lebewesen* zu klein, um das zusätzliche CO₂ aus der Atmosphäre aufzunehmen. Die dahinter stehende Logik lautet *Zu wenig Pflanzen für mehr CO₂*. Die hinter dem ersten Konzept unter (1) stehende Vorstellung führt noch weiter und bringt eine dynamische Perspektive ein: So sind die Aufnahmekapazitäten der Pflanzen nicht nur zu gering, sondern sinken auch noch: *Immer weniger Pflanzen für mehr CO₂*.

Die Konzepte unter (2) machen deutlich, dass es einen Behälter *Pflanzen* gibt, der die Aufnahme von sich aus begrenzt. Die Pflanzen werden hier personifiziert und ihrer CO₂-Fixierung eine Zielgerichtetheit unterstellt. Es ist nichts darüber gesagt, ob der Behälter das zusätzliche CO₂ aufnehmen könnte. Kern dieser Vorstellung ist, dass er es nicht aufnimmt, weil *es ihm schadet* (Emma) bzw. *er es nicht mehr braucht* (Sandra). Entscheidend ist hier also eine Regelung des CO₂-Flusses von der Atmosphäre in den Behälter *Lebewesen* durch die Pflanze. Das dominierende Konzept ist somit *Zu viel CO₂ durch zu wenig Bindung*. In den Konzepten unter (1) ist die Aufnahme des CO₂ in die Vegetation somit durch die Speichergröße der Vegetation und in den Konzepten unter (2) durch die Flussraten begrenzt.

Verallgemeinerung

Die Denkfigur kann wie in Tabelle 7.11 dargestellt verallgemeinert und durch die beigeordneten Konzepte beschrieben werden. Während die in Tabelle 7.11 dargestellten Konzepte die Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT charakterisieren, zeigen sich die Varianten dieser Denkfigur in den Ausdifferenzierungen der Ursachen des Ungleichgewichts. Diese sind durch folgende Konzepte charakterisiert, die alternativ oder in Kombination gedacht werden können. Die Komplexität der Denkfigur steigt dabei mit zunehmender Zahl der involvierten Konzepte:

+	Mehr CO₂ durch mehr Ausstoß. Es gibt zu viel Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre, weil aus dem Behälter <i>Lebewesen</i> mehr CO ₂ in die Atmosphäre ausgestoßen wird.
+	Mehr CO₂ durch zusätzlichen Ausstoß. Es gibt zu viel Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre, weil durch die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs zusätzliches CO ₂ in die Atmosphäre ausgestoßen wird.
+	Zu wenig Pflanzen für mehr CO₂. Der Kohlenstoffspeicher <i>Lebewesen</i> ist zu klein, um das ganze zusätzliche CO ₂ aus der Atmosphäre aufzunehmen.
+	Immer weniger Pflanzen für mehr CO₂. Der Kohlenstoffspeicher <i>Lebewesen</i> wird immer kleiner und kann das zusätzliche CO ₂ aus der Atmosphäre nicht aufnehmen.
+	Mehr CO₂ durch zu wenig Bindung. Es gibt zu viel Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre, weil die Pflanzen nicht genug CO ₂ aufnehmen.

Tabelle 7.10: Varianten der Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT

Denkfigur: Anthropogenes Ungleichgewicht

Lebewesen und Atmosphäre tauschen kontinuierlich Kohlenstoff aus. Diese Kohlenstoffflüsse sind im Gleichgewicht. Durch die Verbrennung und die Abholzung gelangt zusätzliches CO₂ in die Atmosphäre. Dieses kann nicht gebunden werden, weil die fotosynthetisch aktiven Organismen nicht alles aufnehmen können.

- + **CO₂ aus fossilem Kohlenstoff.** Kohlenstoffdioxid entsteht durch die Verbrennung fossiler Energieträger wie Erdöl, Erdgas, Kohle.
- + **CO₂ aus Lebewesen.** Durch Prozesse wie Atmung wird CO₂ in die Atmosphäre ausgestoßen.
- + **Bindung von CO₂ durch Pflanzen.** CO₂ kann durch Pflanzen wieder gebunden werden.
- + **Gleichgewicht zwischen Lebewesen und Atmosphäre.** Die Erde hat ein natürliches Kohlenstoffgleichgewicht zwischen Lebewesen und Atmosphäre.
- + **Ungleichgewicht durch Verbrennung.** Die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs stört das Kohlenstoffgleichgewicht der Erde.
- + **Ungleichgewicht durch Abholzung.** Die Abholzung stört das Kohlenstoffgleichgewicht der Erde.

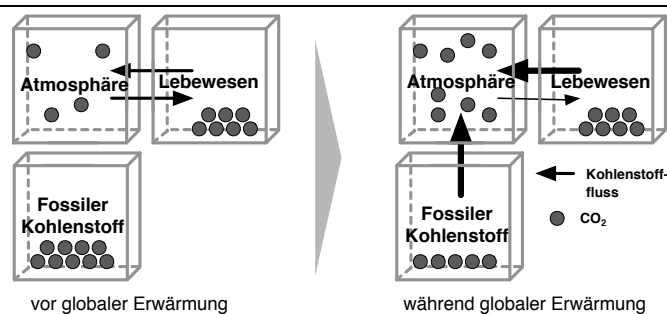


Tabelle 7.11: Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT

7.3.5 Quellen der Vorstellungen

Die Lernervorstellungen zum CO₂-Ausstoß unterscheiden sich in der Qualität des ausgestoßenen Stoffes und auch der Ursache der Kohlenstoffflüsse. Im Folgenden sind die Vorstellungen auf ihren erfahrungsbasierten Hintergrund hin analysiert.

Kohlenstoffkreislauf als Speicher-Fluss-Schema

Allen gleich ist die Verwendung eines Behälterschemas als Grundlage ihrer Erklärungen. Indikator für die Nutzung des Behälterschemas ist die Verwendung von Termini wie „in“, „aufnehmen“, „abgeben“, „freisetzen“, „binden“, „drin sein“, „Speicher“ etc. (s. Kapitel 2.2.4). In Tabelle 7.12 wird die Verwendung des Behälterschemas anhand von typischen Lerneräußerungen zum Kohlenstoffkreislauf analysiert.

Mit der Verwendung des Behälterschemas geht meist auch die Nutzung des von den Wissenschaftlern genutzt und in Kapitel 6.3.1 beschriebenen Konzepts *Verbrennen Ist Freisetzen* einher. Hervorgehoben wird in der Freisetzen-Metaphorik das Fließen eines Stoffes zwischen verschiedenen Behältern. Die Nutzung des Konzeptes *Verbrennen ist Freisetzen* ist in seiner Struktur eng mit der Vorstellung einer Kohlenstoffbilanz verknüpft. Darüber hinaus lässt sich bei den Lernern auch ein weiteres Metaphernkonzept zu den Kohlenstoffflüssen finden: *Verbrennen Ist Entstehen*, das aus metaphorischen Ausdrücken wie „Da entsteht CO₂ bei der Verbrennung“ (Jakob, 330) deutlich wird. Die Entstehung ist beschrieben als „ins Dasein treten, seinen Anfang nehmen; sich bilden“ (Duden 2002). Geprägt wird dieses Konzept durch Termini, wie *entstehen*, *umwandeln*, *produzieren* etc. Im Konzept *Verbrennen Ist Entstehen* wird die Freisetzung von CO₂ durch die Oxidation organischen Kohlenstoffs aus einer Perspektive betrachtet, in der eine

stärker stoffliche Perspektive im Gegensatz zu einer bilanzorientierten Perspektive eingenommen wird. Fokussiert wird in erster Linie auf das Produkt der Verbrennung (CO_2) und erst in zweiter Linie auf den Prozess (die *Entstehung*).


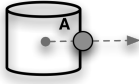
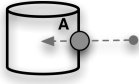
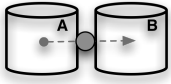
Lernervorstellung	Schema	Logik
„Die Treibhausgase sammeln sich <u>in der Atmosphäre an</u> .“ Claudia (227 f.) „ CO_2 ist <u>in den fossilen Brennstoffen drin</u> .“ Daniel (169-172, 317-322)		Ein Stoff ist in Behälter A.
„Der Mensch <u>atmet CO_2 aus</u> .“ Phillip (143) „Wenn man kein CO_2 <u>ausstoßen</u> soll, ...“ Marie (4 f.)		Ein Stoff X verlässt den Behälter A.
„Die Pflanzen <u>nehmen CO_2 auf</u> .“ Detlef (417) „[...] <u>gelangt das CO_2 in die Atmosphäre</u> .“ Jaqueline (278 ff.)		Ein Stoff wird in Behälter A aufgenommen.
„Das CO_2 kommt <u>aus den Fabriken</u> , die Abgase <u>in die Luft stoßen</u> .“ Detlef (118 ff.) „Die Pflanzen <u>geben CO_2 an die Atmosphäre ab</u> .“ Jürgen (530)		Ein Stoff verlässt Behälter A und wird von Behälter B aufgenommen.

Tabelle 7.12: Das Speicher-Fluss-Schema als Quelle der Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf

Dieses Metaphernkonzept tritt in einer weiteren Variante auf, die stärker auch das Edukt der Verbrennung betont: *Verbrennen Ist Umwandeln*. Während eine *Entstehung* definitionsgemäß eher auf das Produkt fokussiert, wird bei einer *Umwandlung* oder *Produktion* immer ein Edukt in ein Produkt umgesetzt (vgl. Tabelle 7.13).

Metaphernkonzept	Hervorgehoben wird...	Verdeckt wird...
<i>Verbrennen Ist Freisetzen</i>	... der Ort des Kohlenstoffvorkommens.	... die Art des Kohlenstoffvorkommens (C , CO_2 , CO_3^{2-}).
<i>Verbrennen Ist Entstehen</i>	... das Vorkommen von CO_2 der Ort des Kohlenstoffvorkommens und das Edukt der Verbrennung.
<i>Verbrennen Ist Umwandeln</i>	... die Art des Kohlenstoffvorkommens.	... der Ort des Kohlenstoffvorkommens (C , CO_2 , CO_3^{2-}).

Tabelle 7.13: Metaphern der Kohlenstoffflüsse

Das Start-Weg-Ziel und Kreislaufschema

Deutlich werden verschiedene Vorstellungen von den Kohlenstoffflüssen: Während in der Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT das CO_2 in der Atmosphäre nicht mehr nach *CO_2 aus den Lebewesen* und *CO_2 aus fossilem Kohlenstoff* unterschieden werden kann, akkumuliert sich in allen übrigen Denkfiguren ausschließlich das *CO_2 aus fossilem Kohlenstoff* in der Atmosphäre. Das *CO_2 aus Atmung* und *Abholzung* gibt es entweder nicht (Denkfigur KÜNSTLICHES CO_2) oder aber es wird wieder zumindest zum Teil von den Lebewesen gebunden. Es lassen sich somit unterschiedliche Anwendungen des Start-Weg-Ziel-Schemas auf die Bindung von CO_2 in den Lebewesen finden (vgl. Tabelle 7.14).

In den ersten drei Denkfiguren sammelt sich das CO_2 aus fossilem Kohlenstoff in der Atmosphäre an, während es in der Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT in den Kreislauf eingebunden wird, oder metaphorisch ausgedrückt: In den ersten drei Denkfiguren landet das CO_2 aus fossilem Kohlenstoff in der Sackgasse, während es in der Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT in einen Kreislauf eingeschleust wird.

	Künstliches CO ₂	Künstliches und natürliches CO ₂	Pflanzennahes und -fernes CO ₂	Anthropogenes Ungleichgewicht
CO ₂ aus Atmung & Abholzung		CO ₂ -Fluss ist Kreislauf	CO ₂ -Fluss ist Kreislauf	CO ₂ -Fluss ist Kreislauf
CO ₂ aus fossilem Kohlenstoff	CO ₂ -Fluss ist Einbahnstraße	CO ₂ -Fluss ist Einbahnstraße	CO ₂ -Fluss ist Einbahnstraße	

Tabelle 7.14: Anwendung des Start-Weg-Ziel-Schemas im Speicher-Fluss-Schema

Das Natürlich-Künstlich-Schema

Darüber hinaus zeigen sich Unterschiede zwischen den Denkfiguren in der Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas. Alle Lerner führen die globale Erwärmung auf Einflüsse des Menschen zurück. In den Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf zeigt sich darüber hinaus, dass verschiedene Elemente des Speicher-Fluss-Schemas in den Denkfiguren für künstlich und somit als Ursache des Klimawandels erklärt werden:

	Künstliches CO ₂	Künstliches und natürliches CO ₂	Pflanzennahes und -fernes CO ₂	anthropogenes Ungleichgewicht
künstlich	Eigenschaften des CO ₂	Eigenschaften des CO ₂	Position des CO ₂	Größe des CO ₂ -Ausstoßes

Tabelle 7.15: Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas auf das Speicher-Fluss-Schema

Die unterschiedliche Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas auf den Kohlenstoffkreislauf lässt sich dadurch erklären, dass es ein abstraktes Schema ist, das keiner direkten körperlichen Erfahrung entspringt, sondern stark kulturell geprägt wird. Damit unterliegt es einer großen individuellen Interpretation und Konzeptualisierung (vgl. Kapitel 2.2.4.).

Das Gleichgewichtsschema

In der Denkfigur ANTHROGENES UNGLEICHGEWICHT greifen die Lerner auf das Gleichgewichtsschema zurück, um die Ursachen des Klimawandels anhand von veränderten Kohlenstoffflüssen zu beschreiben. Dabei rekurrieren sie auf die Vorstellungen eines absoluten Gleichgewichts. Veränderungen dieses Gleichgewichts werden als Störung beschrieben. Diese Vorstellung lässt sich in der Untersuchung von Sander (2002) bestätigen, die zeigen konnte, dass Lerner sich das Gleichgewicht als einen naturgesetzlichen Zustand vorstellen, der in der vom Menschen unberührten Natur zu finden sei.

Die Gleichgewichtsvorstellung lässt sich auf die erfahrungsbasierten Ursprünge des Gleichgewichtsschemas zurückführen. Gleichgewichte werden als Normalzustand aufgefasst und (plötzliche) Veränderungen der Balance z. B. beim Stolpern, Ausrutschen o.ä. als Störung empfunden. Darüber hinaus spiegelt auch die Vorstellung einer sich nicht von allein verändernden Natur lebensweltliche Erfahrungen wider: Die Natur um uns herum verändert sich scheinbar nicht in von uns beobachtbaren Zeitabschnitten. Es ist also nachvollziehbar, dass beobachtbare Veränderungen als vom Menschen verursachte Störung des Normalzustandes angenommen werden.

Verbrennung Ist Verschmutzung

Das in der Literatur über Schülervorstellungen zum Klimawandel beschriebene Konzept *Erwärmung durch Verschmutzung* (vgl. Kapitel 3.1.3) konnte bei den untersuchten Lernern in der Form nicht gefunden werden. Zwar machen viele Lerner eine Verschmutzung und Abgase für den Klimawandel verantwortlich, jedoch immer in Beziehung mit der Emission von CO₂: CO₂ kommt von „Industriegasen, die die Luft verschmutzen“ (Claudia, 275-276) oder „Der Klimawandel kommt durch die ganzen Abgase, das CO₂“ (Daniel, 91). Dabei wird insbesondere in der Denkfigur KÜNSTLICHES CO₂ das Kohlenstoffdioxid als nicht-natürlicher, giftiger Stoff oder Abgas dargestellt. Diese Abgase entstehen jedoch immer im Zusammenhang mit der Freisetzung

von CO₂, die als Verschmutzung der Umwelt oder der Atmosphäre wahrgenommen werden. Die Verschmutzung spielt für die Lerner in dieser Arbeit eine Rolle als Quellbereich, um den Klimawandel als Umweltproblem wahrzunehmen und die Verbrennung fossiler Energieträger entsprechend zu bewerten.

7.3.6 Vergleich der Lernervorstellungen zur CO₂-Freisetzung

In der Nutzung der Konzepte in den Denkfiguren zeigen sich durchaus Überschneidungen (siehe Tabelle 7.16). So ist das Konzept CO₂ aus Verbrennung in allen Denkfiguren zu finden. Ähnlich ist es mit dem Konzept CO₂ aus Atmung, das außer in der Denkfigur KÜNSTLICHES CO₂ ebenfalls von allen Lernern verwendet wird. Variationen zeigen sich dabei im Detail: In der Denkfigur KÜNSTLICHES UND NATÜRLICHES CO₂ hat das CO₂ aus Verbrennung andere Eigenschaften als das CO₂ aus Atmung bzw. Abholzung, während es in der Denkfigur PFLANZENNAHES UND -FERNES CO₂ an einem anderen Ort ist als das CO₂ aus Atmung. Deutlich wird, dass sich die Vorstellungen in ihren Quellbereichen durch eine unterschiedliche Nutzung verschiedener Schemata unterscheiden.

	Künstliches CO ₂	Natürliches und Künstliches CO ₂	Pflanzennahes und -fernes CO ₂	Anthropogenes Ungleichgewicht
Kohlenstoffkreislauf als Speicher-Fluss-Schema				
Kohlenstoffflüsse	<ul style="list-style-type: none"> Künstliches CO₂ aus Verbrennung CO₂ aus Abholzung 	<ul style="list-style-type: none"> Künstliches CO₂ aus Verbrennung Natürliches CO₂ aus Atmung Bindung von natürlichem CO₂ in Fotosynthese 	<ul style="list-style-type: none"> CO₂ aus Verbrennung in pflanzenferner Atmosphäre CO₂ aus Atmung in pflanzennaher Atmosphäre Bindung von pflanzen-nahem CO₂ in Fotosynthese 	<ul style="list-style-type: none"> CO₂ aus Verbrennung CO₂ aus Abholzung CO₂ aus Atmung Bindung von CO₂ in Fotosynthese
genutzte Schemata		Kreislaufschema		
	Start-Weg-Ziel-Schema			
	Natürlich-Künstlich-Schema		Gleichgewichtsschema	

Tabelle 7.16: Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf

In den Denkfiguren NATÜRLICHES UND KÜNSTLICHES CO₂ und KÜNSTLICHES CO₂ wird die Klimaschädlichkeit über die Eigenschaften des künstlichen CO₂ aus der Verbrennung beschrieben, das nicht wieder gebunden werden kann. In der Denkfigur PFLANZENNAHES UND -FERNES CO₂ wird die Klimaschädlichkeit über die Position des CO₂ festgelegt, während es in der Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT über die Menge des CO₂-Ausstoßes konzeptualisiert wird.

Während in der Denkfigur KÜNSTLICHES CO₂ jeglicher CO₂-Ausstoß als problematisch betrachtet wird, zeigen die übrigen Denkfiguren Ähnlichkeiten in der Beschreibung der CO₂-

Emissionen. Das CO₂ aus der Biosphäre wird in den übrigen Denkfiguren immer ausgestoßen und ist unproblematisch, da es wieder gebunden werden kann. Erst das CO₂ aus der Verbrennung fossilen Kohlenstoffs ist problematisch und zwar entweder weil es *künstlich* ist (Denkfigur NATÜRLICHES UND KÜNSTLICHES CO₂), weil es sich *an anderer Stelle ablagert* (Denkfigur PFLANZENNAHES UND -FERNES CO₂) oder aber weil es schlichtweg *zu viel* ist (Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT).

Verteilung der Denkfiguren

In Tabelle 7.17 ist dargestellt, welche in dieser Arbeit untersuchten Lerner über welche Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf im Rahmen des Klimawandels verfügen. Dabei geht es nicht darum, eine prozentuale Verteilung der Vorstellungen herauszustellen, sondern zu belegen, dass die gefundenen Vorstellungen keine Einzelfälle darstellen.

Deutlich wird, dass ein Lerner über mehrere parallele Vorstellungen verfügen kann. Die Parallelität mehrerer Vorstellungen schränkt nicht die Validität der einzelnen Denkfiguren ein, sondern ist z. B. auch in der Interviewstudie auf Lernprozesse innerhalb der Interviews zurückzuführen.

		Künstliches CO ₂	Künstliches und Natürliches CO ₂	Pflanzennahes und -fernes CO ₂	Anthropogenes Ungleichgewicht
Interviewstudie	Ina	•			
	Dirk	•			•
	Detlef	•		•	
	Hanni	•			
	Nanni	•			•
	Jürgen				•
	Claudia				•
	Felix	•			
	Jakob	•			
	Emma		•		•
	Daniel	•			
	Interventionsstudie	Phillip			
Gustav			•		
Fritz			•		
Hanna					•
Sandra					•
Maria					•
Kay					•
Leon				•	
Tina		•			
Marie					•
Laura				•	
Jaqueline					•
Chantal					•

Tabelle 7.17: Zuordnung der Denkfiguren zu den befragten Lernern
Die Lerner eines Gruppeninterviews bzw. Vermittlungsexperiments sind grau zusammengefasst.

7.4 Lernervorstellungen zum Treibhauseffekt

In diesem Abschnitt werden die Vorstellungen der Lerner zu den zum Klimawandel führenden Veränderungen des Strahlungsgleichgewichts in der Atmosphäre analysiert. Diese werden gemeinhin unter der Metapher des „Treibhauseffekts“ zusammengefasst. In den Lernervorstellungen konnten hierzu zwei grundlegend verschiedene Denkfiguren gefunden werden: ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT und ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH, die sich in jeweils zwei weitere Varianten aufteilen lassen. Die Vorstellungen sind im Folgenden analysiert und auf ihre Quellbereiche hin untersucht.

7.4.1 Denkfigur: Erwärmung Durch Ozonloch

Lerner, die der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH folgen, stellen sich in der Variante ERWÄRMUNG DURCH MEHR SONNENSTRAHLEN ein Loch in der Ozonschicht vor, durch das Sonnenstrahlung zur Erde vordringt und diese erwärmt. Durch den CO₂-Ausstoß wird das Loch vergrößert, mehr Sonnenstrahlung erreicht die Erde und diese erwärmt sich stärker. In der Variante ERWÄRMUNG DURCH STRAHLENFALLE greifen die Lerner auch auf die Vorstellungen einer ERWÄRMUNG DURCH MEHR SONNENSTRAHLEN zurück. Zusätzlich wird in dieser Variante die Strahlung unter der Ozonschicht gefangen. Sie kann die Erde nicht wieder verlassen und erwärmt sie.

Geordnete Aussagen

Variante: ERWÄRMUNG DURCH MEHR SONNENSTRAHLEN

Nanni (13-33, 39, 91-101): „Die Erde erwärmt sich durch das Ozonloch, das immer größer wird. Dadurch dringt mehr Strahlung ein. Das Ozonloch wird durch die Abgase und CO₂ immer größer.“

Emma (106-135, 175-220, 386-400): „Das CO₂ frisst sich in die Atmosphäre rein und macht dann Ozonlöcher. Über Australien gibt es ein großes Ozonloch. Die Sonnenstrahlen gehen da richtig durch und die Erde erwärmt sich dort schneller, weil sie da empfindlicher ist. An der Ozonschicht prallt die Strahlung sonst ab, aber mit dem Loch geht mehr Sonnenstrahlung zur Erde durch.“

Daniel (106-135, 386-400): „Die Erde erwärmt sich, weil mehr Sonnenstrahlen durch die Ozonschicht gelassen werden und die Ozonlöcher größer werden.“

Horst (70-117, 138-145): „Durch CO₂ wird Ozon gespalten. Über Australien gibt es schon ein Ozonloch. Ohne Ozon würden die ganzen Strahlen schneller durchkommen und auch mehr davon. Dadurch würde es auch auf der Erde wärmer werden.“

Max (84-88): „Mehr Sonneneinstrahlung und stärkere Einstrahlung führen zu Erwärmung. War es nicht so, dass das CO₂ die Ozonschicht angreift und durch diese Beschädigung das Ozonloch immer größer wird? Dadurch wird mehr Wärme eingestrahlt und es wird auch wärmer.“

Freddi (21-37): „Der Klimawandel kommt auf jeden Fall von der Ozonschicht, die die Erde nicht mehr vor den Sonnenstrahlen schützen kann, wenn sie kaputt ist.“

Egon (40-44): „Es kommt zu einer Erwärmung, weil die Ozonschicht kaputt gemacht wird und die Strahlen dann von der Sonne ungehindert durchkommen.“

Raphael (90-96): „Bei der Erwärmung ist CO₂ ist vor allem für das Ozonloch verantwortlich. Ozonloch und diese Treibhausgasschicht ergänzen sich. Wenn es mehr von dieser Schicht geben würde, dann wäre das Ozonloch kleiner und die UV-Strahlen würden nicht ganz durchkommen. Das Problem ist, dass es noch nicht genug von dieser Schicht gibt.“

Ina (57-80, 167-180): „Durch den Klimawandel wird es immer wärmer. Der Klimawandel kommt durch die Zerstörung der Ozonschicht über Australien. Dann kommen mehr Sonnenstrahlen. Dass sich das Ozonloch nicht weiter vergrößert, kann ich mir nicht vorstellen, denn der CO₂-Ausstoß steigt.“

Variante: ERWÄRMUNG DURCH STRAHLENFALLE

Dirk (60-80, 90-110, 125, 167-180): „Der Klimawandel kommt durch die Zerstörung der Ozonschicht durch den erhöhten CO₂-Ausstoß. Das Ozonloch wird größer und die Sonneneinstrahlung stärker. Wärme wird reflektiert, aber sie bleibt unter der Ozonschicht drunter. Die Ozonschicht will nicht, dass die Wärme wieder raus geht. Dadurch steigen die Temperaturen.“

Detlef (60-80, 115-125, 140-150, 156-166, 460-500): „Das CO₂ greift die Ozonschicht an (CO₂ und Ozon reagieren miteinander). Und deswegen haben wir ein Loch. Dadurch wird die Sonneneinstrahlung stärker und die Temperaturen steigen. Die Wärme kann dann unter der Ozonschicht verteilt werden und kommt nicht wieder raus. Das Ozonloch kann sich wieder selber regenerieren, dafür muss man diesen CO₂-Ausstoß um einiges verringern.“

Felix (90-106, 199-240): „Durch verschiedene Gase wird die Ozonschicht immer mehr abgebaut und dadurch kann mehr Sonnenstrahlung durchkommen. Die Wärmestrahlung der Erde kann nicht mehr richtig abgegeben werden und dadurch heizt es sich immer mehr auf.“

Siebert (15-23, 59-65): „Beim Klimawandel wird die Ozonschicht angegriffen durch die Treibhausgase. Durch das Ozonloch können die Strahlen ungeschwächt auf die Erde treffen und dann wieder reflektieren an den Wolken, die dann gebildet werden, sodass die dann nicht mehr aus der Atmosphäre raus können.“

Lukas (42-46, 89-96): „Die Treibhausgase sorgen dafür, dass das Ozonloch größer wird. Und dadurch, dass das Ozonloch größer wird, gibt es mehr Sonneneinstrahlung. Die Strahlung wird auch mehr unter der Ozonschicht gespiegelt.“

Wie man sich beim Zahnarzt immer diese Informationsfilme anguckt, wo diese kleinen Tierchen kommen und das auffressen. So habe ich mir das bei der Ozonschicht auch vorgestellt.“

Explikation

In der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH wird eine Erwärmung der Atmosphäre durch ein Loch in der Ozonschicht beschrieben, durch das mehr Sonnenstrahlen als zuvor eindringen können. Diese in den Lerneraussagen gefundene Denkfigur wurde auch schon in diversen anderen Studien über Vorstellungen zum Klimawandel beschrieben (siehe Kapitel 3).

Basis der Variante ERWÄRMUNG DURCH MEHR SONNENSTRAHLEN wie auch der Variante ERWÄRMUNG DURCH STRAHLENFALLE ist die Sonne mit ihrer Sonnenstrahlung. Folgende individuelle Konzepte zur Rolle der Sonnenstrahlung finden sich in den Aussagen der Lerner:

Die Erde erwärmt sich, weil mehr Strahlung eindringt.	(Nanni, Emma, Daniel, Horst, Max)
Die Erde erwärmt sich, weil die Sonneneinstrahlung stärker wird.	(Max)
Die Erde erwärmt sich, weil die Strahlung schneller eindringt.	(Horst)
Die Erde erwärmt sich schneller, wo mehr Sonnenstrahlung ist.	(Emma)

Aus den Konzepten wird deutlich, dass die Sonneneinstrahlung der die Erde wärmende Faktor ist. Wenn die Sonnenstrahlung *mehr*, *stärker* oder *schneller* zur Erde durchdringt, wird es wärmer. Mit den verschiedenen Termini werden unterschiedliche Dimensionen beschrieben: Es verändert sich entweder die Quantität der Strahlung (*mehr Strahlung*; *schneller eindringende Strahlung* = mehr Strahlung pro Zeiteinheit) oder die Qualität der Strahlung (*stärkere Strahlung*). Die Qualität der Strahlung wird jedoch von Max nicht weiter ausgeführt, der als einziger die Vorstellung einer *stärkeren Sonneneinstrahlung* äußert. Raphael führt mit der UV-Strahlung eine weitere Qualität der Sonnenstrahlung an, differenziert dies jedoch auch nicht weiter. Es wird somit deutlich, dass es die direkte Sonnensstrahlung ist, die die Erde erwärmt. Diese Interpretation wird durch Emmas Aussage „*die Erde erwärmt sich schneller unter dem Ozonloch*“ bestärkt: Wo die Sonne hinstrahlt, wird es warm. Die Konzepte können somit als *Mehr Sonnenstrahlung erwärmt die Erde* verallgemeinert werden. Licht und Wärme werden dabei allgemein auf *die Sonnenstrahlung* zurückgeführt und nicht nach unterschiedlichen Qualitäten bzw. Strahlungsspektren unterschieden. Boyes und Stanistreet (1998) beschreiben die nicht stattfindende Diffe-

renzierung zwischen den Strahlungsspektren der Sonne als Schlüsselkonzept in der Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH.

Warum es zu einer vermehrten Einstrahlung von Sonnenstrahlen kommt, wird in Konzepten deutlich, in denen Ozonschicht als atmosphärischer Schutzschild betrachtet wird:

Die Ozonschicht lässt Strahlung abprallen	(Emma)
Die Ozonschicht schützt vor Strahlung	(Freddi)
Die Ozonschicht hindert Strahlung am Durchkommen	(Egon)

Die Konzepte explizieren die Idee eines Schutzschildes, welches das sich hinter dem Schild befindende Subjekt (*die Erde*) vor etwas Schädlichem (*der Strahlung*) schützt. Die individuellen Konzepte lassen sich somit verallgemeinern in *Die Erde hat eine Ozonschicht* und *Die Ozonschicht schützt vor zu viel Wärme*, oder kurz *Ozonschicht ist Schutzschicht*. Das Konzept *Ozonschicht ist Schutzschicht* lässt sich auch in den Vorstellungen von Wissenschaftlern finden. Jedoch beschreiben sie damit nicht den Schutz vor einer übermäßigen Erwärmung der Erde, sondern den Schutz vor UV-Strahlung. Das CO₂ wird von nahezu allen Lernern mit destruktiven Eigenschaften in Bezug auf die Ozonschicht belegt, wie folgende Konzepte zeigen:

CO ₂ frisst ein Loch in die Ozonschicht	(Emma)
CO ₂ spaltet Ozon	(Horst)
CO ₂ zerstört die Ozonschicht	(Nina)
CO ₂ greift die Ozonschicht an	(Max)
CO ₂ ist verantwortlich/sorgt für das Ozonloch	(Raphael)

Die zerstörerischen Eigenschaften des CO₂ werden durch die Nutzung negativ konnotierter Prädikate (*zerstören, spalten, angreifen, fressen*) unterstrichen. Einzig Raphael nutzt neutrale Prädikate in der Beschreibung der Eigenschaften des CO₂ (*sorgen für, verantwortlich sein*). Der Abbau der Ozonschicht wird dabei in der Regel als lokal begrenztes Loch beschrieben. Eine gleichmäßige, globale Ausdünnung o. ä. wissenschaftsorientierte Vorstellungen, werden von keinem Lerner diskutiert. Die Vorstellungen zur Wirkung des CO₂ können somit verallgemeinert als *CO₂ frisst ein Loch in die Ozonschicht* beschrieben werden.

Lukas beschreibt seine Vorstellung von den Vorgängen bei der Zerstörung der Ozonschicht mit der Analogie von „*kleinen Tierchen, die das kaputt fressen*“. Auch hier kommen den Treibhausgasen destruktive Eigenschaften zu und es findet eine Animisierung der Prozesse statt, um sie besser vorstellbar werden zu lassen. In den individuellen Konzepten

Durch die Ozonschicht dringt mehr Strahlung ein	(Nanni, Emma, Max)
Mehr Sonnenstrahlen werden durch die Ozonschicht gelassen	(Daniel)

wird deutlich, dass durch das Ozonloch nun mehr Sonnenstrahlen zur Erde durchdringen, die die Erde schließlich erwärmen. Aus diesen Vorstellungen einer verstärkten Einstrahlung von Wärme durch das Ozonloch wird auch deutlich, dass die Ozonschicht auch vorher schon teilweise durchlässig für Sonnenstrahlung gewesen sein muss und es nun zu einer quantitativen Zunahme kommt. Dies liefert innerhalb der Vorstellung auch die Erklärung dafür, dass die Temperaturen auf der Erde auch vor dem Klimawandel nicht bei oder unter Null Grad Celsius waren, schließlich steigt die Temperatur nun, weil *mehr Strahlung* zur Erde hindurch dringen kann. Allgemein lässt sich somit aus den individuellen Konzepten folgendes allgemeine Konzept ablei-

ten: *Mehr Sonnenstrahlung dringt durch das Ozonloch.* Die durch das Ozonloch zur Erde hindurch kommende Sonnenstrahlung lässt die Temperatur direkt steigen.

Variante: ERWÄRMUNG DURCH STRAHLENFALLE

Die Variante ERWÄRMUNG DURCH STRAHLENFALLE stellt eine Erweiterung der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH dar. Darin wird zusätzlich zu den in der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH MEHR SONNENSTRAHLEN beschriebenen Konzepten eine Sammlung von Strahlung zwischen Ozonschicht und Erde als Ursache der Erwärmung angeführt. Wie bei der Variante ERWÄRMUNG DURCH MEHR SONNENSTRAHLEN dringt Sonnenstrahlung durch ein Ozonloch zur Erde durch. Die Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH STRAHLENFALLE setzt an diesem Punkt ein und diskutiert, was mit der eingedrungenen Strahlung weiter geschieht:

(Wärme-)Strahlung wird reflektiert	(Dirk, Lukas)
Strahlen treffen auf die Erde und werden reflektiert	(Siegbert)

Es kommt somit zu einer *Reflexion von Strahlung zwischen der Erde und der Ozonschicht.* Bei dieser Reflexion behält die Strahlung ihre ursprüngliche Qualität. Die Lerner beschreiben keine Umwandlung der Strahlung, sondern verwenden die Termini Wärme und Strahlung synonym. Diese reflektierte Strahlung sammelt sich nun zwischen der Erdoberfläche und der Ozonschicht:

Wärme bleibt unter der Ozonschicht drunter	(Dirk)
Die Ozonschicht will nicht, dass die Wärme wieder raus geht	(Dirk)
Wärme wird unter der Ozonschicht verteilt, aber kommt nicht wieder raus	(Detlef)
Wärme verteilt sich unter Ozonschicht	(Detlef)
Die Strahlung wird unter der Ozonschicht reflektiert	(Lukas, Siegbert)

Durch die Undurchlässigkeit der Ozonschicht für Strahlung kommt es zu einer *Strahlungssammlung unter der Ozonschicht.*

In der Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH STRAHLENFALLE wird neben der verstärkten Einstrahlung von Sonnenenergie durch das Ozonloch auch weniger Wärme an das Weltall abgegeben, da sich die Energie unter der Ozonschicht sammelt. Dabei entsteht eine Kombination, bei der (1) mehr Strahlung zur Erde durchdringt und die Atmosphäre erwärmt, sowie (2) die eindringende Strahlung nicht wieder aus der Atmosphäre entweichen kann, da sie unter der Ozonschicht gefangen wird. Die Lerner führen die Erwärmung somit auf zwei Ursachen zurück und beschreiben damit eine »*doppelte Erwärmung*«: Die Erde erwärmt sich durch mehr direkte Strahlung von der Sonne durch das Ozonloch und durch mehr indirekte Strahlung, die unter der Ozonschicht reflektiert wird (*Erwärmung durch mehr Einstrahlung und Erwärmung durch Sammlung von Strahlung*).

Verallgemeinerung

Die Varianten der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH unterscheiden sich durch die Ursachen der Erwärmung: Während in der Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH MEHR SONNENSTRAHLEN mehr Einstrahlung ursächlich für die Erwärmung ist, kommt in der Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH STRAHLENFALLE zusätzlich noch eine Sammlung von Strahlung unter der Ozonschicht hinzu.

Die Denkfigur kann mit ihren Varianten wie folgt verallgemeinert werden:

Denkfigur: Erwärmung Durch Ozonloch, Var. Mehr Sonnenstrahlen

CO₂ frisst Löcher in die Ozonschicht. Durch die Löcher in der Ozonschicht dringt mehr Sonnenstrahlung ein und die Erde erwärmt sich.

- + **Die Sonne strahlt Sonnenenergie zur Erde.** Die Sonne sendet Strahlung zur Erde.
- + **Die Ozonschicht schützt vor zu viel Wärme.** Die Ozonschicht ist für Strahlung undurchlässig und reflektiert sie.
- + **CO₂ frisst ein Loch in die Ozonschicht.** Das CO₂ reagiert mit der Ozonschicht und zerfrisst sie, sodass ein Loch entsteht.
- + **Mehr Sonnenstrahlung dringt durch das Ozonloch.** Durch das Ozonloch können mehr Sonnenstrahlen zur Erde vordringen und erwärmen diese.
- + **Mehr Sonnenstrahlung erwärmt die Erde.** Die zur Erde hindurch kommende Sonnenstrahlung lässt die Temperatur steigen.

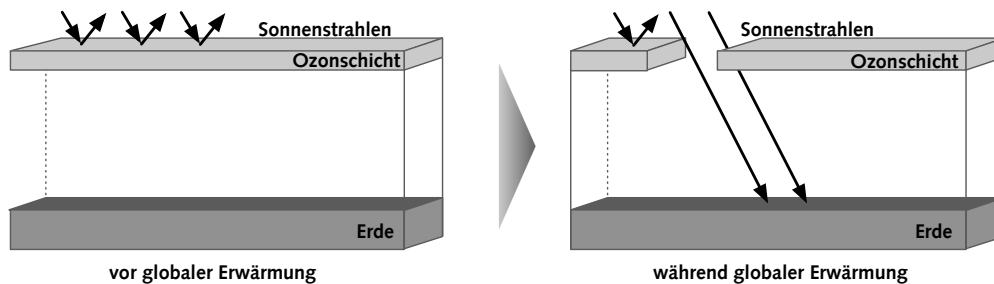


Tabelle 7.18: ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH, VAR. MEHR SONNENSTRAHLEN

Denkfigur: Erwärmung Durch Ozonloch, Var. Strahlenfalle

CO₂ frisst Löcher in die Ozonschicht. Durch die Löcher in der Ozonschicht dringt mehr Sonnenstrahlung ein. Die Strahlung wird in der Atmosphäre gefangen und die Erde erwärmt sich.

- + **Die Sonne strahlt Sonnenenergie zur Erde.** Die Sonne sendet Strahlung zur Erde.
- + **Die Ozonschicht schützt vor zu viel Wärme.** Die Ozonschicht ist für Strahlung undurchlässig und reflektiert sie.
- + **CO₂ frisst ein Loch in die Ozonschicht.** Das CO₂ reagiert mit der Ozonschicht und zerfrisst sie, sodass ein Loch entsteht.
- + **Mehr Sonnenstrahlung dringt durch das Ozonloch.** Durch das Ozonloch können mehr Sonnenstrahlen zur Erde vordringen und erwärmen diese.
- + **Die Erde reflektiert Sonnenstrahlung.** An der Erdoberfläche wird die von der Sonne kommende Strahlung reflektiert.
- + **Die Sammlung von Sonnenstrahlung erwärmt die Erde.** Die von der Erde kommende Strahlung sammelt sich in der Atmosphäre und erwärmt sie.

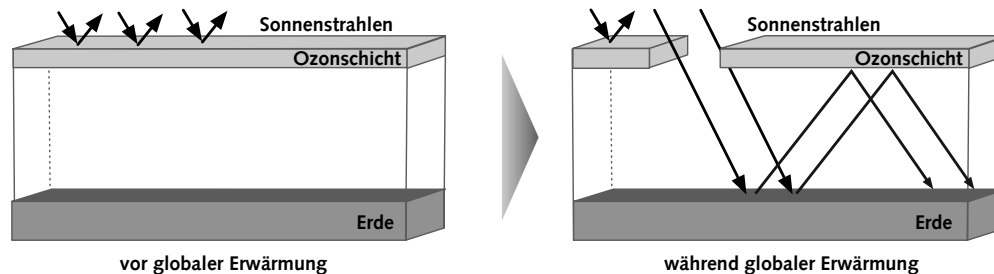


Tabelle 7.19: ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH, VAR. STRAHLENFALLE

7.4.2 Denkfigur: Erwärmung Durch Treibhauseffekt

In der Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT ist die Erwärmung durch eine dicker werdende Schicht von Treibhausgasen verursacht, die die Sonnen- bzw. Wärmestrahlung am Verlassen der Atmosphäre hindert. Die Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT tritt in verschiedenen Ausprägungen auf, die sich in die Varianten ERWÄRMUNG DURCH SONNENSTRAHLUNG und ERWÄRMUNG DURCH WÄRMESTRAHLUNG ordnen lassen.

Geordnete Aussagen

Variante: ERWÄRMUNG DURCH SONNENSTRAHLUNG

Jürgen (20-30, 135-195): Die Sonnenstrahlung wird nicht komplett an der Erdoberfläche absorbiert, 90 % werden reflektiert. Die CO₂-Moleküle reflektieren oder absorbieren die Lichtstrahlen. So kommt es zu einer globalen Erwärmung. Die CO₂-Moleküle sorgen dafür, dass die Lichtstrahlen, die auf die Erde treffen, nicht so einfach wieder abprallen können, sondern immer weiter reflektiert würden, und dadurch kommt es zu einer globalen Erwärmung. Gäbe es nur eine gewisse Konzentration an CO₂ und auch Methan, wäre es ausgeglichen, aber weil es mehr CO₂ wird, erwärmt es sich.

Olaf (9-28, 62-68): Die Sonnenstrahlen treffen auf die Erde, werden dann reflektiert und durch das CO₂ werden sie wieder zur Erde zurück reflektiert und dadurch wird es dann wärmer. Das ist wie so ein großes Dach und die Wärme kann nicht weg und es heizt sich immer mehr auf. Die Strahlen kommen wieder raus aus der Atmosphäre, aber ein Teil wird halt reflektiert, der normalerweise wieder weggehen würde, aber durch diese Schicht gehen halt nicht mehr alle weg, sondern bleiben noch welche da, und dadurch wird das dann halt wärmer.

Horst (29-61): Das CO₂ bleibt in der Luft und es wird um die Erde eine Schicht gebildet, sodass die Strahlen, die von der Sonne ankommen, von der Erde gegen diese Schicht von CO₂ reflektiert werden, wo die Strahlen wieder zur Erde kommen.

Antonia (38-40, 45-55, 86-100): Die Schicht wird dicker, reflektiert und es geht immer weniger raus. Die Sonnenstrahlen gehen zwar rein, aber kommen eben nicht mehr so gut raus, sondern werden immer zurück reflektiert.

Nina (41-44, 56-85): Irgendwer hatte mal so eine Zeichnung mit einer dicken Schicht. Da gingen die Sonnenstrahlen [in die Atmosphäre] rein, wurden größtenteils wieder zurück reflektiert und ein Teil ging aber wieder raus. Aber das Meiste bleibt drin.

Egon (40-55): Das CO₂ und die anderen giftigen Stoffe lagern sich oben ab, sodass die reflektierenden Strahlen, die dann sozusagen von der Erde abprallen, dann oben nicht mehr ins Weltall nach oben gehen, sondern da wieder zurück prallen und dass die Wärme auf der Erde bleibt und es bei uns wärmer wird.

Raphael (1-14, 47-57): Die Erwärmung wird verursacht durch die Sonne und das CO₂. Die Abgase sammeln sich oben in der Troposphäre. Das bedeutet, es entsteht so eine Art Schicht vor der Atmosphäre. Das Wichtige ist, dass die Sonnenstrahlen durch die Schicht durch können, wenn sie zur Erde gelangen, aber nicht vollständig wieder zurück entweichen können. Ein Teil davon, vielleicht zehn Prozent, werden zurück reflektiert auf die Erde und dadurch entsteht dieser Treibhauseffekt.

Ann-Katrin (25-30, 66-89): Durch den CO₂-Ausstoß verdichtet sich eine hohe Atmosphärenschicht. Die Sonnenstrahlen treffen auf die Erde und werden zurück reflektiert. Die Sonnenstrahlen treffen auf diese Schicht, können da nicht durchdringen und kommen wieder zurück auf die Erde. Dadurch heizt sich diese natürlich auf, da die Sonnenstrahlen nicht wieder zurückgegeben werden können in das All. Nur ein geringer Teil geht wieder durch die Schicht raus.

Variante: ERWÄRMUNG DURCH WÄRMESTRAHLEN

Jakob (90-106, 110-130, 199-240): In der Atmosphäre gibt es eine Schicht von verschiedenen Treibhausgasen (CO₂, CH₄). Durch den zusätzlichen Treibhauseffekt wird diese Schicht immer dicker, denn das, was wir Menschen hier unten ausstoßen, sammelt sich in dieser Schicht an. Die Sonnenstrahlen werden auf der Erde in Wärmeenergie umgewandelt, teilweise von der Erdoberfläche ins Weltall reflektiert und zu einem großen Teil von dieser Treibhausgasschicht in der Atmosphäre wieder zurückgeworfen. Die Treibhausgasschicht wirkt nicht wie eine Decke, sondern wie ein löchriger Spiegel dessen Löcher gestopft werden.

Claudia (35-50, 135-195): Der natürliche Treibhauseffekt sorgt dafür, dass die Erde warm ist. Durch den anthropogenen Treibhauseffekt wird die Erde immer wärmer, weil diese Strahlung eben immer mehr reflektiert wird und durch diese Schichten nicht mehr durch kann. Die kurzwelligeren UV-Strahlen treffen auf die Erde und werden langwellig. Die Lichtstrahlen werden von der Erde absorbiert und in Form von Wärme wieder abgegeben. Durch diese Schicht von Gasen, die immer größer wird, kann die Wärme nicht ins Weltall.

Explikation

Die Lerner beschreiben in der Vorstellung eine durch den Treibhausgasausstoß dicker werdende Schicht von Treibhausgasen als ursächlich für die globale Erwärmung. Sie stellen sich die Zusammensetzung der Treibhausgasschicht unterschiedlich vor. Ihre Äußerungen reichen von einer unspezifischen Verschmutzung der Atmosphäre durch Abgase und giftige Stoffe bis zur Nennung einzelner Treibhausgase wie CO₂:

Das CO ₂ verdichtet sich zu einer Schicht	(Ann-Katrin)
CO ₂ bleibt in der Luft und bildet eine Schicht	(Raphael, Horst)
Die CO ₂ -Schicht wird dicker, größer	(Jakob, Claudia, Antonia, Nina)
Die Treibhausgasschicht ist wie ein Dach	(Olaf)
Die Treibhausgasschicht ist wie ein löchriger Spiegel	(Jakob)

Allen Konzepten liegt dabei das metaphorische Konzept *Treibhausgase Bilden Schicht* zugrunde. Diese Schicht kann dabei in verschiedenen Qualitäten gedacht werden, die Schicht kann dabei *dichter* (z. B. Ann-Katrin) oder *dicker* (z. B. Jakob) werden. Die Beschreibung der Treibhausgasschicht mit einer bestimmten Qualität lässt jedoch keine Auswirkungen auf die weiteren Vorstellungen erkennen, sodass die Vorstellungen hierzu in *Mehr CO₂ macht Treibhausgasschicht dicker* verallgemeinert werden kann. Eine weitere Explizierung findet das Bild *Treibhausgase Bilden Schicht* in den Metaphern *Treibhausgase Sind Spiegel* und *Treibhausgase Bilden Dach*.

Jakob führt die Metapher *Treibhausgase Sind Spiegel* weiter aus, indem er die Eigenschaften der Treibhausgasschicht als „*einen löchrigen Spiegel, dessen Löcher gestopft werden*“ beschreibt. Ähnlich wie in einem Sieb werden die Löcher durch das CO₂ nach und nach geschlossen, sodass die Strahlung nicht mehr hindurchdringen kann. Die Metapher der Decke wird von ihm zugunsten des Spiegels klar abgelehnt, was darauf hindeutet, dass er sich die Schicht als etwas Solides, Kompaktes vorstellt.

In der Metapher des Daches schließt die Treibhausgasschicht die Atmosphäre als *Haus, in dem wir leben* nach oben ab. Dieses Dach hat dämmende Eigenschaften, da es die Wärme auf der Erde nicht wieder ins Weltall entweichen lässt. Beide Bilder zeichnen sich durch eine makroskopische Sichtweise aus, bei denen die Schicht auf Stoff- und nicht auf Teilchenebene betrachtet wird.

Die Nutzung des Konzeptes *Treibhausgase Bilden Schicht*, ist mit der Beschreibung ihrer Eigenschaften in makroskopischer Skalierung auf zwei Ebenen erklärbar. Zum einen sind durch unser Leben im Mesokosmos makroskopische Vorgänge einfacher vorstellbar als Vorgänge auf submikroskopischer Teilchenebene. Zum anderen legt der medial wie schulisch (vgl. Bickel et al. 2006) vermittelte Vergleich des CO₂ mit den massiven Glaswänden eines Treibhauses eine massive, klar umrissene Treibhausgasschicht nahe.

Die Unterschiede in den Varianten der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT zeichnen sich durch Verschiedenheiten in den Vorstellungen zu den Eigenschaften der Treibhausgase und der Strahlung aus.

Variante: Erwärmung durch Sonnenstrahlen

In der Variante ERWÄRMUNG DURCH SONNENSTRAHLEN ist eine *Einseitige Durchlässigkeit der Treibhausgasschicht* verantwortlich für die Erwärmung, wie aus folgenden Konzepten hervorgeht:

Die Treibhausgasschicht lässt Lichtstrahlen zur Erde, aber nicht wieder ins Weltall	(Jürgen)
Teile der Strahlen kommen durch die Schicht nicht wieder raus aus der Atmosphäre	(Nina)
Die Sonnenstrahlen gehen rein, kommen aber nicht mehr so gut raus und werden reflektiert	(Antonia, Olaf, Ann-Katrin)

Die dieser Variante zugrunde liegenden Konzepte beschreiben eine durch die Treibhausgasschicht eindringende Strahlung, die die Erde anschließend nicht mehr verlassen kann. Sinngebender Kern dieser Variante der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT ist dabei die Art der Strahlung, die zur Erwärmung führt. Die Konzepte

Die Lichtstrahlung wird an der Erde reflektiert	(Jürgen)
Die Sonnenstrahlung prallt von der Erde ab	(Olaf, Nina)

machen deutlich, dass die Lerner, die von der Sonne kommende Strahlung und die von der Erde „reflektierte“ Strahlung in ihren Eigenschaften gleichsetzen. Die Begriffe *Sonnenstrahlung*, *Lichtstrahlung*, *Strahlung* werden synonym genutzt und gleichermaßen auf die Einstrahlung zur Erde und die Abstrahlung von der Erde angewandt. Diese Variante basiert somit verallgemeinert auf der Idee einer *Einseitigen Durchlässigkeit der Treibhausgasschicht für Sonnenstrahlung und Sammlung von Sonnenstrahlung in der Atmosphäre erwärmt Erde*: Die Sonnenstrahlen können die Treibhausgasschicht von Außen durchdringen und treffen auf die Erdoberfläche auf. Dort werden sie von der Schicht am Entweichen ins Weltall gehindert und sammeln sich schließlich unter der Treibhausgasschicht. Dabei wird von den Lernern nicht erklärt, warum die Sonnenstrahlung in der einen Richtung (*von Außen nach Innen*) die Schicht durchdringen kann, in der anderen Richtung (*von Innen nach Außen*) aber am Durchdringen gehindert wird.

Die Begriffe Licht- und Wärmestrahlung verwenden die Lerner in dieser Vorstellungsvariante synonym. Hier bestätigen sich die Ergebnisse Boyes und Stanisstreets (1998), dass Lerner meist nicht zwischen verschiedenen Strahlungsarten differenzieren, wie es beispielsweise in der Vorstellung *Erwärmung durch Wärmestrahlung* (s. u.) geschieht. So ist es die Sonnenstrahlung, die auf die Erde auftrifft, reflektiert wird und dann gehindert durch die Treibhausgase nicht wieder ins Weltall entweichen kann. Die Erwärmung erfolgt hier im Gegensatz zur Erwärmung in der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH nicht, weil mehr Sonnenstrahlung direkt zur Erde durchdringt, sondern diese unter der Treibhausgasschicht gefangen und am Entweichen gehindert wird, ähnlich wie in der Variante ERWÄRMUNG DURCH STRAHLENFALLE.

Variante: Erwärmung durch Wärmestrahlen

Die Variante ERWÄRMUNG DURCH WÄRMESTRAHLEN der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT ist geprägt von der Vorstellung eines Wärmestaus unterhalb einer Schicht von Treibhausgasen. Dabei wird zwischen Sonnenstrahlung und Wärmestrahlung unterschieden. Die Konzepte

Sonnenstrahlen werden auf der Erde in Wärme umgewandelt und wieder abgegeben	(Jakob)
Die kurzwelligen UV-Strahlen treffen auf die Erde und werden langwellig	(Claudia)
Lichtstrahlen werden von der Erde absorbiert und als Wärme wieder abgegeben	(Claudia)

machen deutlich, dass diese Lerner zwischen unterschiedlichen Strahlungsarten differenzieren und auch die Umwandlung von Sonnenstrahlung in Wärmestrahlung eine Rolle in ihrem Denken

spielt. Die Konzepte lassen sich in folgender Logik verallgemeinern: *Die Sonne strahlt Sonnenstrahlung zur Erde, Die Erde nimmt Sonnenstrahlung auf und Die Erde gibt Wärmestrahlung ab.* Die Aufnahme von Sonnenstrahlung und die Abgabe von Wärmestrahlung durch die Erde wird dabei als *Umwandlung von Sonnenstrahlung in Wärmestrahlung auf der Erde* gedacht.

Der Grund für die Erwärmung der Atmosphäre liegt schließlich in den Eigenschaften der Treibhausgase bedingt:

Sonnenstrahlung dringt durch die Schicht, Wärmestrahlung wird zum Großteil reflektiert. (Jakob)

Die Wärmestrahlung kann nicht durch die Schicht durch. (Claudia)

Die Treibhausgasschicht wird somit als halbdurchlässig beschrieben: *CO₂ ist durchlässig für Sonnenstrahlung* und *CO₂ ist undurchlässig für Wärmestrahlung*. Es kommt somit zu einer *Sammlung von Wärmestrahlung in der Atmosphäre*, die diese erwärmt.

In Claudias Beschreibung der Umwandlung von Licht- in Wärmestrahlung wird deutlich, dass sie Sonnenstrahlung und Wärmestrahlung nicht als unterschiedliche Entitäten, sondern als unterschiedliche Ausprägungen derselben Entität begreift. In den Konzepten zeigt sich somit, dass die Lerner zwischen den Qualitäten Sonnen- und Wärmestrahlung unterscheiden, dies aber nur teilweise durch die Spektren elektromagnetischer Strahlung erklären können.

Verallgemeinerung

Die Varianten der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT unterscheiden sich in der Beschreibung und Nutzung der ihnen zugrunde liegenden Konzepte zu a) den Eigenschaften der zur Erwärmung führenden Strahlung und b) den Eigenschaften der Treibhausgasschicht.

Die Varianten der Denkfigur können wie folgt verallgemeinert werden:

Denkfigur: Erwärmung Durch Treibhauseffekt, Var. Sonnenstrahlung

CO₂ bildet eine Schicht, die durch mehr CO₂ dicker wird. Die CO₂-Schicht ist durchlässig für die von der Sonne kommende Strahlung. Die Sonnenstrahlen werden an der Erde reflektiert, werden aber unter der CO₂-Schicht gefangen und erwärmen so die Atmosphäre.

- + **Die Sonne strahlt Sonnenenergie zur Erde.** Die Sonne sendet Strahlung zur Erde aus.
- + **Treibhausgase Bilden atmosphärische Schicht.** Die Treibhausgase sammeln sich in der Atmosphäre und bilden eine Schicht.
- + **Mehr CO₂ macht die Treibhausgasschicht dicker.** Je mehr Treibhausgase ausgestoßen werden und sich in der Atmosphäre ansammeln, desto dicker wird die Treibhausgasschicht.
- + **Die Treibhausgasschicht ist einseitig durchlässig.** Die Treibhausgasschicht ist für die von der Sonne kommende Strahlung durchlässig, für die von der Erde kommende Strahlung undurchlässig.
- + **Die Erde reflektiert Sonnenstrahlung.** An der Erdoberfläche wird die von der Sonne kommende Strahlung reflektiert.
- + **Die Sammlung von Sonnenstrahlung erwärmt die Erde.** Die von der Erde kommende Strahlung sammelt sich in der Atmosphäre und erwärmt sie.

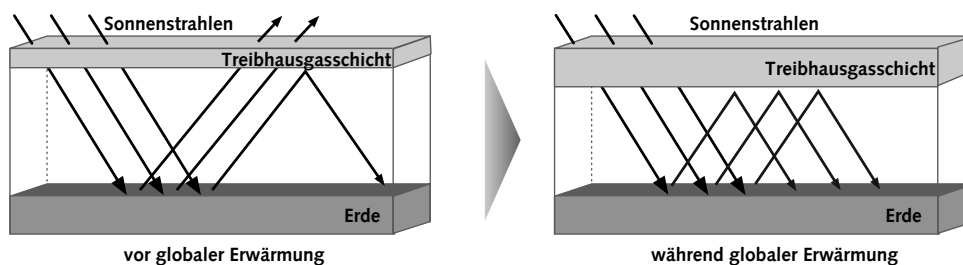


Tabelle 7.20: Variante ERWÄRMUNG DURCH SONNENSTRAHLUNG

Denkfigur: Erwärmung Durch Treibhauseffekt, Var. Wärmestrahlung

CO₂ bildet eine Schicht, die durch mehr CO₂ dicker wird. Die CO₂-Schicht ist durchlässig für Sonnenstrahlung. Die Sonnenstrahlen werden auf der Erde in Wärmestrahlung umgewandelt. Die CO₂-Schicht ist undurchlässig für Wärmestrahlung. Die Wärmestrahlung erwärmt die Atmosphäre.

- + **Die Sonne strahlt Sonnenenergie zur Erde.** Die Sonne sendet Strahlung zur Erde aus.
- + **Treibhausgase Bilden atmosphärische Schicht.** Die Treibhausgase sammeln sich in der Atmosphäre und bilden eine Schicht.
- + **Mehr CO₂ macht die Treibhausgasschicht dicker.** Je mehr Treibhausgase ausgestoßen werden und sich in der Atmosphäre ansammeln, desto dicker wird die Treibhausgasschicht.
- + **Die Treibhausgasschicht ist durchlässig für Sonnenstrahlung.** Die Treibhausgasschicht ist für die von der Sonne kommende Strahlung durchlässig.
- + **Die Erde wandelt Sonnenstrahlung in Wärmestrahlung um.** An der Erdoberfläche wird die von der Sonne kommende Strahlung aufgenommen und als Wärmestrahlung wieder abgegeben.
- + **Die Treibhausgasschicht ist undurchlässig für Wärmestrahlung.** Die Treibhausgasschicht ist für die von der Erde kommende Wärmestrahlung undurchlässig.
- + **Die Sammlung von Wärmestrahlung erwärmt die Erde.** Die von der Erde kommende Strahlung sammelt sich in der Atmosphäre und erwärmt sie.

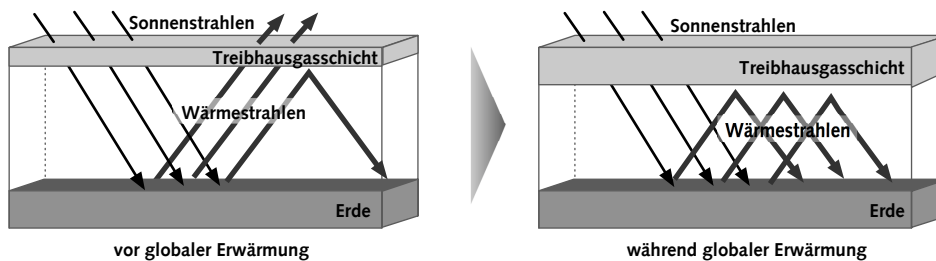


Tabelle 7.21: Variante ERWÄRMUNG DURCH WÄRMESTRAHLUNG

Die Lerner erklären die zur Erwärmung führenden Prozesse ähnlich der in Medien und Fachliteratur beschriebenen Metapher des »Treibhauseffekts«. In der Vorstellung *Erwärmung durch Sonnenstrahlung* wird dabei auf einige Konzepte verzichtet. Ursache der Erwärmung ist in beiden Varianten die Bildung einer Treibhausgasschicht in der Atmosphäre, die für eingehende Sonnenstrahlung durchlässig ist, für abgehende Strahlung hingegen nicht.

7.4.3 Quellbereiche der Vorstellungen

Die Vorstellungen zu den Mechanismen der globalen Erwärmung sind auf den ersten Blick häufig Hybride zwischen den wissenschaftlichen Denkfiguren »Ozonloch« und »Treibhauseffekt«. Da weder der Treibhauseffekt noch das Ozonloch direkt erfahrbar sind, können die Lerner nicht auf direkte Erfahrungen zur Konstruktion ihrer Konzepte zurückgreifen. Bei beiden Phänomenen handelt es sich um wissenschaftsorientierte Vorstellungen, bei denen auf wissenschaftliche Konzepte (*Einstrahlung, Reflektion, Zersetzung der Ozonschicht, Absorptionsprozesse* etc.) zurückgegriffen wird. Es handelt sich hier somit nicht um Alltagsvorstellungen im eigentlichen Sinne, da weder die Ausdünnung atmosphärischen Ozons, noch der Treibhauseffekt im Alltag erfahrbar sind. Jedoch greifen die Lerner auf Erfahrungen zurück, in denen ihre wissenschaftsorientierten – wenn auch fachlich nicht angemessen konzeptualisierten – Vorstellungen gründen.

Das Speicher-Fluss-Schema

Eine Analyse, der von den Lernern verwendeten Metaphern zeigt, dass die Vorstellungen zu den Vorgängen bei der globalen Erwärmung alle auf das aus lebensweltlichen Zusammenhängen vertraute Behälterschema zurückgreifen, das sie zu einem Speicher-Fluss-Schema erweitern:

„Durch das Ozonloch, das immer größer wird [...] dringt mehr Strahlung ein.“	Nanni (11-12)
„Das CO ₂ [...] frisst sich in die Atmosphäre rein und macht dann Ozonlöcher. [...] Die Sonnenstrahlen gehen dann richtig durch [...] mit dem Loch geht mehr Sonnenstrahlung zur Erde durch.“	Emma (175-179, 382-400)
„Das ist wie ein großes Dach und die Wärme kann nicht weg. Alles, was nach oben wieder abstrahlt, wird wieder reflektiert“	Olaf (9-28, 155-160)
„Das Ozonloch wird größer und die Sonneneinstrahlung stärker.“	Dirk (59-80)
„Die Wärme wird unter der Ozonschicht verteilt und kommt nicht wieder raus.“	Detlef (128-130)

Die von den Lernern verwendeten Begriffe wie „durch ein Loch hindurch“, „unter der Schicht drunter“ etc. deuten darauf hin, dass sie sich die Erde mitsamt der Atmosphäre als Inhalt eines Behälters vorstellen. Die Begrenzung des Behälters zu seiner Umgebung Weltraum wird entweder von der Ozonschicht oder der Treibhausgasschicht gebildet.

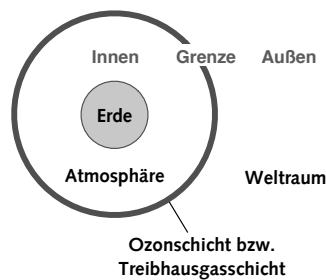


Abbildung 7.1: Atmosphäre als Behälter

Von den Lernern wird somit ein metaphorisches Konzept *Die Erde ist ein Behälter* generiert, bei dem aus dem durch frühkindliche Erfahrungen geprägten Quellbereich Behälterschema eine Übertragung auf den Zielbereich der globalen Erwärmung stattfindet.

Die Ursache der Erwärmung wird im Behälterschema durch Energieflüsse zwischen Behälter (Atmosphäre) und Umgebung (Weltraum) beschrieben, wie sich aus Wendungen wie „mehr Einstrahlung“ (Dirk), „weniger Abstrahlung“ (Olaf), „raus aus der Atmosphäre“ (Detlef) zeigt.

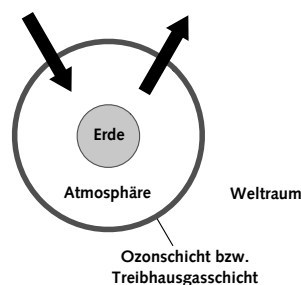


Abbildung 7.2: Atmosphäre als Speicher-Fluss-Schema

Aus Perspektive des Behälterschemas lassen sich somit zwei im Grundsatz sehr unterschiedliche Konzepte zu den Vorgängen bei der globalen Erwärmung finden:

- (A) Das CO₂ zerstört die Ozonschicht und dadurch nimmt die Sonneneinstrahlung zu.
= **Erwärmung durch mehr Einstrahlung**
- (B) Durch eine immer größer werdende Schicht von Gasen kann die Wärme nicht ins Weltall zurück.
= **Erwärmung durch weniger Abstrahlung**

Diese unterscheiden sich nicht nur durch die Richtung ihrer Strahlungsflüsse, sondern auch im Grad ihrer Komplexität:

Erwärmung durch mehr Einstrahlung

Die Behälterwand schützt den Inhalt des Behälters vor zu viel Einstrahlung. Dadurch, dass die Wand des Behälters (Treibhausgase) durch bestimmte Prozesse angegriffen wird, entsteht ein Loch (Ozonloch), durch das mehr Strahlung (Sonnenstrahlung) eindringt. Die Erwärmung aufgrund eines größer werdenden Ozonlochs ist auf der Ebene des Behälterschemas mit z. B. einem Dach gleichzusetzen, das vor Regen schützt. Gerät aus irgendeinem Grund ein Loch in das Dach, strömt wenig Regen durch das Dach und Wasser sammelt sich z. B. im Haus. Wird das Loch größer, nimmt auch die Regenmenge zu, die durch das Loch gelangen kann.

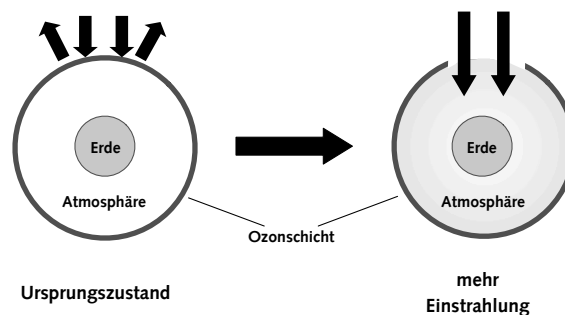


Abbildung 7.3: Erwärmung durch mehr Einstrahlung

Die Vorstellung *Es wird wärmer, weil mehr Wärme zugeführt wird* ist eine sehr prägnante Vorstellung, die im täglichen Leben vielfach präsent ist, z. B. bei der Erwärmung von Speisen auf einer Herdplatte, dem Aufdrehen der Heizung zum Wärmen der Wohnung oder auch beim Einlassen warmen Wassers in eine Badewanne.

Erwärmung durch weniger Abstrahlung

Auch die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT lässt sich auf das Behälterschema zurückführen. So wird dem Behälter *Erde* von der Sonne eine konstante Menge an Energie zugeführt. Die Behälterwand ist für die eingestrahlte Energie durchlässig, sodass der Behälter mit der Sonnenenergie aufgefüllt wird. Die Energie wird im Ursprungszustand aus dem Behälter größtenteils wieder an seine Umgebung abgegeben, sodass sich der Energiefluss in einem Gleichgewicht befindet. Wird die Behälterwand jedoch in eine Richtung (und zwar nach außen hin) für die Strahlung undurchlässiger, sammelt sich die Energie im Behälter an, da die Einstrahlung konstant, die Abstrahlung hingegen verringert ist. Die Situation ist ähnlich einer Badewanne bei aufgedrehtem Wasserhahn: Ist der Abfluss offen, kann das einströmende Wasser wieder abfließen. Dreht man den Abfluss jedoch mehr und mehr zu, bis weniger Wasser ab- als zufließt, füllt sich die Wanne mit Wasser. Ähnlich ist es bei einem Fenster: Schließt man es, hindert man die Wärme im Raum am Entweichen in die Umgebung.

Der Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH WENIGER ABSTRAHLUNG folgend, wird es auf der Erde somit wärmer, weil die Erde eine konstante Energiemenge von der Sonne erreicht, diese jedoch aufgrund der dicker werdenden Treibhausgasschicht nicht wieder vollständig abgestrahlt wird (vgl. Abbildung 7.4).

Die Vorstellung *Es wird wärmer, weil weniger Wärme raus geht* tritt lebensweltlich beispielsweise in der Isolierung von Thermoskannen und Töpfen oder auch dem Zudecken mit einer Bettdecke auf.

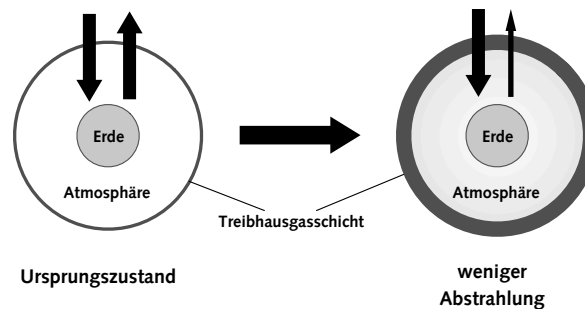


Abbildung 7.4: Erwärmung durch weniger Abstrahlung

Ungleichgewicht im Strahlungshaushalt

Die Vorstellungen ERWÄRMUNG DURCH MEHR EINSTRAHLUNG und ERWÄRMUNG DURCH WENIGER ABSTRAHLUNG basieren auf der Nutzung des Gleichgewichtsschemas. In der Logik der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH kommt im Ursprungszustand Strahlung gar nicht erst in die Atmosphäre hinein, sodass ein konstantes Strahlungsgleichgewicht besteht. In der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT sind Ein- und Abstrahlung im Ursprungszustand gleich groß und es findet keine Erwärmung statt.

Durch die vermehrte Ein- bzw. verringerte Abstrahlung kommt es zu einem Ungleichgewicht im Strahlungshaushalt und somit zu einer Erwärmung. Dabei ist die Vorstellung der Lerner, die eines *kontinuierlichen Strahlungsungleichgewichts*: Solange ein Loch in der Ozonschicht ist, gelangt mehr Strahlung in die Atmosphäre bzw. solange die Treibhausgasschicht dicker ist als im Ausgangszustand, wird mehr Strahlung eingefangen. Die Variante Strahlenfalle der Denkfigur Erwärmung durch Ozonloch greift dabei auf eine Erwärmung durch sowohl mehr Einstrahlung als auch weniger Abstrahlung zurück.

Personifizierungen

Die Lerner greifen wiederholt auf anthropomorphe Vorstellungen zurück, um die Vorgänge bei der globalen Erwärmung zu erklären:

<i>CO₂ frisst ein Loch in die Ozonschicht</i>	(Emma)
<i>CO₂ zerstört die Ozonschicht</i>	(Nina)
<i>CO₂ greift die Ozonschicht an</i>	(Max)

Das CO₂ wird personifiziert und mit Eigenschaften wie *fressen*, *angreifen*, *zerstören* versehen, um die submikroskopischen, chemischen Vorgänge bei der globalen Erwärmung zu erklären. Auch Dirk versucht, sich den Vorgang der Erwärmung mit einer Anthropomorphisierung der Ozonschicht vorzustellen („Die Ozonschicht will nicht, dass die Wärme wieder raus geht.“). Er versucht somit in seiner Erklärung der Vorgänge bei der globalen Erwärmung über eine bloße Beschreibung der Vorgänge (*Reflexion von Strahlung an der Ozonschicht*) hinauszugehen und zu erklären, *warum* die Strahlung die Atmosphäre nicht wieder verlassen kann.

In abstrakte Prozesse, wie dem Klimawandel, werden erfahrungsbasierte, lebensweltliche Vorstellungen hineingetragen. Sowohl die Ursachen als auch die Mechanismen der Erwärmung sind für die Lerner lebensweltlich aufgrund ihrer Unsichtbarkeit und ihrer gleichzeitig submikroskopischen wie globalen Dimension unerklärlich und werden zur Erklärung personifiziert. Die Veranschaulichung des Unsichtbaren und Abstrakten scheint nötig zu sein, um sich die Sachverhalte verständlich zu machen.

Ozonloch und Treibhauseffekt aktivieren die gleichen Frames

Kern der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH ist die Vorstellung einer Schutzschicht, die die Erde vor zu viel Strahlung schützt. Wird diese Schicht beschädigt, entstehen Löcher, durch die Strahlung eindringen kann. Die Metapher eines Lochs in einer Schicht wird von Wissenschaftlern auch zur Beschreibung der Ausdünnung von atmosphärischem Ozon durch halogenierte Kohlenwasserstoffe genutzt, was zu einer vermehrten UV-Strahlung auf der Erde führt: „halocarbons released by human activities destroy ozone in the stratosphere and have caused the ozone hole over Antarctica“ (IPCC: 135, 8).

Die Erklärung der globalen Erwärmung durch ein Ozonloch lässt sich somit u. a. auf Parallelen in den verwendeten Schemata zwischen dem Treibhauseffekt und dem Ozonloch zurückführen. Gängige Abbildungen, wie sie in Schulbüchern (Beyer et al. 2008; Bickel et al. 2006; Jütte & Kähler 2007) und auch Hochschulbüchern (Campbell et al. 2006) üblich sind, stellen bei beiden Phänomenen die Atmosphäre als Behälter dar, in den Sonnenstrahlen eindringt. Sowohl das stratosphärische Ozon als auch die Treibhausgase werden dabei meist als atmosphärische Schicht dargestellt. Beide Phänomene werden auf Veränderungen in der Atmosphäre, die mit der einfallenden Sonnenstrahlung zusammenhängen und auf Emissionen aus Industrie und Haushalten, zurückgeführt.

Es werden somit über die gleichen Schemata hinaus auch gleiche Ursachenkategorien zur Erklärung der verschiedenen Phänomene herangezogen. Somit bildet sich – auch aus fachlicher Perspektive – ein Frame *Störung der Atmosphäre*, der von den Lernern nicht selten ähnlich als Zerstörung der Atmosphäre oder Zerstörung einer atmosphärischen Schicht bezeichnet wird. Beide Phänomene stehen somit in der Vorstellungswelt eng nebeneinander und sind, wie die Lernervorstellungen zeigen, häufig verknüpft. Dabei ist die Idee eines Lochs in einer Schicht einfacher strukturiert und somit einfacher zu denken als die Idee einer dämmenden Schicht. Erfahrungen, dass mehr Sonnenbestrahlung zu einer stärkeren Erwärmung führt, hat jedes Kind. Erfahrungen, dass es durch eine Wärmedämmung wärmer wird, sind uns weniger zugänglich und auch die entsprechenden Vorstellungen dazu komplexer strukturiert.

Mit der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH werden die Grundlagen der Ausdünnung atmosphärischen Ozons auf die globale Erwärmung übertragen. Dabei sind körperliche und kulturelle Quellen der Vorstellung beschreibbar: Assoziationen mit einem Schutzschild ergeben sich bereits aus körperlichen Erfahrungen, in denen die Haut als Grenzbarriere und Schutzschild das Innere unseres Körpers vor Schädigungen schützt. Ist die Haut defekt, weil man sich geschnitten oder eine Schürfwunde aufgrund eines Sturzes erlitten hat, können Krankheitserreger durch das Loch im Schutzschild Haut eindringen und es kommt zu einer – meist schmerzhaften – Infektion. Gegenständliche Erfahrungen mit Grenzbarrieren als Schutzschilden machen Kinder auch im Versteckspiel, wo eine Wand als Schutz vor dem Gesehenwerden durch den Suchenden und somit vor dem Verlieren des Spiels dient und ein Loch in der Wand schließlich verrät.

Ungar (2000) führt die Vorstellung *Erwärmung Durch Ozonloch* auf eine Verknüpfung des Klimawandels mit der Rezeption von Videospiele und Hollywood-Filmen zurück: „Raumschiffe“ und Heldenfiguren in Videospiele werden häufig von Schutzschilden geschützt. Verletzungen bzw. Beschädigungen treten erst dann auf, wenn der Schutzschild defekt ist. In einer stark medial geprägten Alltagswelt wäre dieser Erklärungsansatz mit den Annahmen der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens konform.

7.4.4 Vergleich der Vorstellungen

Im Folgenden sind die Lernervorstellungen zum Treibhauseffekt gegenübergestellt. Dabei wird deutlich, dass die Denkfiguren anhand ihrer Konzepte zwar voneinander abgrenzbar sind, es aber Übergänge zwischen ihnen gibt (vgl. Tabelle 7.22).

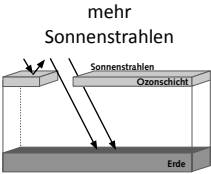
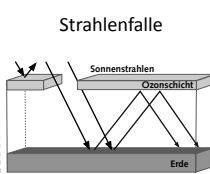
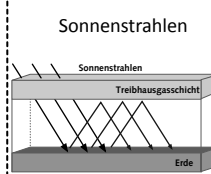
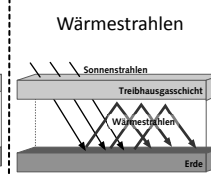
	ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH		ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT	
Variante				
Speicher-Fluss-Schema	Behältergrenze Ozon ist Behälterwand		Behältergrenze CO ₂ ist Behälterwand	
	Eigenschaften der Behältergrenze CO ₂ zerstört Behälterwand		Durchlässigkeit von CO ₂ ist abhängig von Strahlungsrichtung	Durchlässigkeit von CO ₂ ist abhängig von Strahlungsart
	beteiligte Strahlung Verhalten der Strahlung		beteiligte Strahlung Verhalten der Strahlung	
Gleichgewichtsschema	Erwärmung durch mehr Einstrahlung		Erwärmung durch weniger Abstrahlung	

Tabelle 7.22: Denkfiguren zu den Mechanismen der globalen Erwärmung

Die Denkfiguren unterscheiden sich in den beteiligten Strukturen: Während es bei der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH die Ozonschicht ist, deren Perforation für den Klimawandel sorgt, ist es in der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT eine sich verdickende Treibhausgasschicht. Dem CO₂ werden dabei auch unterschiedliche Eigenschaften beigemessen: Bei der ersten Denkfigur hat es destruktive, in der zweiten Denkfigur dämmende Eigenschaften.

Die Varianten ERWÄRMUNG DURCH STRAHLENFALLE und ERWÄRMUNG DURCH SONNENSTRAHLEN ähneln sich in der Art der Erwärmung: Bei beiden Varianten ist es die Sonnenstrahlung, die die Erwärmung verursacht, bei beiden wird die Sonnenstrahlung von der Erde reflektiert und bei beiden wird die Sonnenstrahlung in der Atmosphäre gesammelt.

Die Variante ERWÄRMUNG DURCH WÄRMESTRAHLUNG der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT ist die komplexeste Denkfigur, da hier eine Umwandlung der Sonnenstrahlung in Wärmestrahlung und die selektive Durchlässigkeit der Treibhausgasschicht für Sonnenstrahlung den Kern der Vorstellung bildet. Diese der wissenschaftlichen Vorstellung am nächsten kommende Variante wird, wie Tabelle 7.23 zeigt, nur von sehr wenigen Lernern zur Erklärung der Mechanismen der globalen Erwärmung herangezogen.

Die Denkfiguren lassen sich in den beteiligten Strukturen des metaphorischen Behälters Atmosphäre (*Ozonschicht vs. Treibhausgasschicht*) über die Art der Strahlung (*Sonnenstrahlung vs. Wärmestrahlung*) bis hin zum Verhalten der Strahlung in der Atmosphäre (*Reflektion vs. Umwandlung*) unterscheiden. Es wird auch deutlich, dass Konzepte in mehr als einer Denkfigur genutzt werden. Denkfiguren über die Mechanismen der globalen Erwärmung sind somit nicht unbedingt alternativ zu denken, sondern auch als Kontinuum vorstellbar.

Dass ein Lerner über mehrere Vorstellungen parallel verfügen kann, zeigt Tabelle 7.23. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass Lerneffekte auch in den Interviews nicht auszuschließend sind. Es könnte jedoch auch ein Zeichen dafür sein, dass wissenschaftsorientierte Vorstellungen in der Regel wesentlich weniger internalisiert sind, als Alltagsvorstellungen. Insofern können sie auch leichter als parallele Vorstellungen gedacht werden.

	Erwärmung durch mehr Einstrahlung		Erwärmung durch weniger Abstrahlung		
	Erwärmung durch mehr Sonnenstrahlen	Erwärmung durch Strahlenfalle	Erwärmung durch Sonnenstrahlen	Erwärmung durch Wärmestrahlen	
Interviewstudie	Ina	•			
	Dirk		•		
	Detlef		•		
	Hanni	•			
	Nanni	•			
	Jürgen			•	
	Claudia				•
	Felix		•		
	Jakob				•
	Emma	•			
	Daniel	•			
	Horst	•		•	
Interventionsstudie	Olaf		•		
	Raphael	•		•	
	Siegbert		•		
	Ann-Katrin			•	
	Lukas		•		
	Max	•			
	Antonia			•	
	Nina			•	
	Freddi	•			
	Egon	•		•	

Tabelle 7.23: Zuordnung der Denkfiguren zu den Lernern
Die Lerner eines Gruppeninterviews bzw. Vermittlungsexperiments sind farblich zusammengefasst.

8 Didaktische Strukturierung

Ziel der Didaktischen Strukturierung ist es, die Ergebnisse aus den Analysen der Wissenschaftlervorstellungen und der Lernervorstellungen zum Klimawandel zusammenzuführen, um daraus theoriegeleitete und evidenzbasierte Leitlinien zur Vermittlung des Klimawandels zu formulieren und in konkreten Lernangeboten zu operationalisieren. Gegenstand der Untersuchung sind dabei die erfassten wissenschaftlichen Vorstellungen und die identifizierten Lernervorstellungen. In einem wechselseitigen Vergleich (Gropengießer 2001, S. 199) werden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Vorstellungen herausgearbeitet. Dabei sollen die Charakteristika beider Denkstrukturen verdeutlicht und lernförderliche Korrespondenzen sowie voraussehbare Lernschwierigkeiten identifiziert werden.

8.1 Fragestellungen des Kapitels

Der Vergleich der wissenschaftlichen Vorstellungen und der Lernervorstellungen zum Klimawandel soll folgende Fragestellungen beantworten:

- Welche Korrespondenzen, d. h. Unterschiede, Gemeinsamkeiten und Berührungspunkte werden zwischen den wissenschaftlichen Konzepten und den Vorstellungen der Lerner deutlich?
- Welche dieser Korrespondenzen können bei der Vermittlung des Klimawandels lernförderlich sein und welche Lernschwierigkeiten sind voraussehbar?
- Welche didaktisch begründeten Leitlinien zur Vermittlung des Klimawandels lassen sich aus den Korrespondenzen für Vermittlungssituationen zum Klimawandel ableiten?
- In welchen Lernangeboten lassen sich die Leitlinien zur Vermittlung des Klimawandels umsetzen?

8.2 Methodisches Vorgehen

Basierend auf dem theoretischen Rahmen dieser Untersuchung (vgl. Kapitel 2) wird den Denkstrukturen der Wissenschaftler und der Lerner in Bezug auf den wechselseitigen Vergleich die gleiche Berechtigung gegeben. Beide Perspektiven sind auf Ebene von Konzepten und Denkfiguren erfasst und können miteinander verglichen werden. Der Vergleich wird in Anlehnung an Gropengießer (2001, S. 200) durch folgende Kategorien strukturiert:

- **Gemeinsamkeiten:** Vorstellungen von einem bestimmten Themenbereich, die in beiden Perspektiven gleichgerichtet oder ähnlich sind.
- **Verschiedenheiten:** Vorstellungen von einem bestimmten Themenbereich, die zwischen den beiden Denkstrukturen verschiedener oder gegensätzlicher Natur sind.
- **Eigenheiten:** Vorstellungen von einem bestimmten Themenbereich, die charakteristisch für die Wissenschaftler oder die Lerner sind.

Die von Gropengießer (2001) vorgeschlagene Herausarbeitung von Begrenztheiten der Vorstellungen der Wissenschaftler erfolgt anhand der Analyse der von ihnen genutzten Metaphern:

- **Metaphern:** Herausarbeitung verständnisförderlicher und -hinderlicher Aspekte der von Wissenschaftlern verwendeten Metaphern auf Grundlage der Lernervorstellungen.

8.3 Vergleich der Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf

Gemeinsamkeiten: Aus Perspektive der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens ist das Verständnis des Klimawandels aufgrund seiner nicht erfahrbaren Dimensionen auf Imagination angewiesen, da es – außer zu den in dieser Studie nicht diskutierten Folgen des Klimawandels – keine lebensweltlichen Erfahrungen in diesem Bereich gibt. Dementsprechend ist es wenig verwunderlich, dass sowohl Wissenschaftler als auch Lerner auf ein metaphorisches Verständnis vom Kohlenstoffkreislauf zurückgreifen, um Vorstellungen zum Klimawandel zu entwickeln. So greifen beide untersuchten Gruppen zur Beschreibung der CO₂-Emission auf das Speicher-Fluss-Schema zurück. Allen gemeinsam ist dabei die Nutzung der Speicher *fossile Energieträger* und *Atmosphäre* sowie des Kohlenstoffflusses aus der *Verbrennung fossiler Energieträger* in der Beschreibung der Grundlagen des Klimawandels. Die Hinzunahme weiterer Speicher und damit auch der dazugehörigen Flüsse ist abhängig von den jeweiligen Denkfiguren.

Sowohl die untersuchten Wissenschaftler als auch die, die Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT nutzenden Lerner, greifen auf das Gleichgewichtsschema zurück, um die Ursachen des Klimawandels zu erläutern. Das dem natürlichen Kohlenstoffkreislauf unterstellte Gleichgewicht vermittelt dabei ein statisches Naturbild, in dem Veränderungen oberhalb bestimmter Schwankungsbreiten natürlicherweise nicht möglich sind. So werden menschliche Aktivitäten, die dieses Gleichgewicht verändern sowohl von Lernern als auch von Wissenschaftlern als Störung beschrieben. Die komplexer zu denkende Vorstellung eines dynamischen Gleichgewichts der Wissenschaftler, in dem Kohlenstoffflüsse nicht direkt, sondern im Mittel ausgeglichen sind, entzieht sich den lebensweltlichen Erfahrungen der Lerner.

In der Analyse der Vorstellungen wird darüber hinaus deutlich, dass alle untersuchten Wissenschaftler, aber auch alle untersuchten Lerner die Ursachen der globalen Erwärmung auf den Menschen zurückführen. Die so genannten Klimaskeptiker (vgl. Kappas 2009, S. 303) scheinen auf die befragten Lerner keinen Einfluss zu haben. Darüber hinaus greifen alle untersuchten Quellen auf Personifizierungen zurück, um den Klimawandel zu erklären. Wissenschaftler nutzen Finalisierungen vor allem in Bezug auf das Gleichgewichtsschema. Der in fossilen Sedimenten gespeicherte Kohlenstoff wird in beiden untersuchten Gruppen anthropozentrisch als *fossiler Energieträger* bezeichnet.

Verschiedenheiten: Unterschiede in den Denkstrukturen der untersuchten Gruppen ergeben sich vor allem durch einen unterschiedlichen Einsatz der verwendeten Schemata zur Erklärung des Kohlenstoffkreislaufs. Während die Wissenschaftler die einzelnen Metaphern nur für einzelne Aspekte des Kohlenstoffkreislaufs nutzen, wenden die Lerner das metaphorische Verständnis weitreichender und unspezifischer an. Wissenschaftler und Lerner wählen nicht selten den gleichen Quellbereich, übertragen diesen jedoch imaginativ auf unterschiedliche oder unterschiedlich weit gefasste Zielbereiche: Während Wissenschaftler das Natürlich-Künstlich-Schema auf die Quellen der Kohlenstoffflüsse anwenden, wenden die Lerner in der Denkfigur KÜNSTLICHES UND NATÜRLICHES CO₂ das Schema auf den fließenden Stoff, das CO₂ an. Der vom Menschen verursachte (anthropogene) und damit künstliche CO₂-Ausstoß wird so zu künstlichem CO₂ mit künstlichen Eigenschaften.

Darüber hinaus wird in den Denkfiguren KÜNSTLICHES CO₂, NATÜRLICHES UND KÜNSTLICHES CO₂ wie auch PFLANZENNAHES UND -FERNES CO₂ die Kohlenstoffansammlung in der Atmosphäre nicht über ein Ungleichgewicht im Kohlenstoffkreislauf, sondern über die Position bzw. Quali-

tät des CO₂ argumentiert: Die Analyse der Wissenschaftlervorstellungen zum Treibhauseffekt zeigt hingegen das Konzept einer durchmischten Atmosphäre, was zu einer gleichmäßigen Verteilung von CO₂ führt. In der Denkfigur PFLANZENNAHES UND -FERNES CO₂ hingegen sammelt sich das CO₂ in der pflanzenfernen Atmosphäre und wird nicht weiter durchmischt. Sowohl die Wissenschaftler als auch die Lerner nutzen also zur Erklärung des Kohlenstoffkreislaufs im Rahmen des Klimawandels das Speicher-Fluss-Schema. Die Wissenschaftler ziehen aber zusätzlich das Gleichgewichtsschema heran und argumentieren auf der Ebene der Kohlenstoffflüsse, während die Lerner sich auf das Speicher-Fluss-Schema beschränken und auf Ebene der Qualität des CO₂ bzw. seiner Position im Speicher *Atmosphäre* argumentieren.

Unterschiedliche Nutzungen des Speicher-Fluss-Schemas zeigen sich auch in den übrigen von den Lernern genutzten Denkfiguren zum Kohlenstoffkreislauf: In der Denkfigur KÜNSTLICHES CO₂ werden die Landlebewesen als Kohlenstoffspeicher gar nicht erwähnt oder sogar abgelehnt und in der Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT wird – wie in allen anderen Denkfiguren der Lerner auch – der Ozean nicht als Kohlenstoffspeicher genannt. Das Speicher-Fluss-Schema wird somit nicht nur unterschiedlich genutzt, sondern ist auch verschieden ausgeprägt differenziert.

In der Denkfigur NATÜRLICHES UND KÜNSTLICHES CO₂ der Lerner und UNTERSCHIEDLICHES CO₂ der Wissenschaftler werden dem CO₂ aus der Verbrennung andere Qualitäten als dem vor der Industrialisierung schon in der Atmosphäre vorhandenen CO₂ zugeschrieben. Während die Lerner dabei mit dem Natürlich-Künstlich-Schema argumentieren, unterscheiden Wissenschaftler zwischen verschiedenen Kohlenstoffisotopen. Unterschiede zeigen sich in den Eigenschaften des durch Verbrennung freigesetzten CO₂: Während es in den Vorstellungen der Lerner nicht durch Photosynthese gebunden werden kann, kann es in den Vorstellungen der Wissenschaftler besser gebunden werden als die übrigen Isotope.

Unterschiede in der Perspektive auf die Kohlenstoffflüsse zeigen sich in der Nutzung der Metaphern: Während Wissenschaftler meist die Metapher *Verbrennen Ist Freisetzen* nutzen und auf den Ort des Kohlenstoffvorkommens fokussieren, nutzen Lerner häufig die Metapher *Verbrennen Ist Entstehen* und betrachten die Entstehung von CO₂.

Eigenheiten: Die Anwendung des Gleichgewichtsschemas im Konzept *Dynamisches Gleichgewicht* konnte nur bei Wissenschaftlern und nicht bei Lernern gefunden werden.

Das Speicher-Fluss-Schema wird von den Wissenschaftlern nicht nur differenzierter, sondern auch mit mehr Speichern genutzt: Die Sedimente als Kohlenstoffspeicher sind ausschließlich in den Vorstellungen der Wissenschaftler zu finden, ebenso die Ozeane. Die Bedeutung der Sedimente als Kohlenstoffspeicher wird von Wissenschaftlern im Rahmen des Klimawandels als nachrangig eingeschätzt. Die Ozeane spielen jedoch in einer anderen Eigenheit der Wissenschaftlervorstellungen eine besondere Rolle: Die Pufferung des zusätzlichen Kohlenstoffs in der Atmosphäre durch die Aufnahme in die Ozeane ist für die Wissenschaftler eine wichtige Reaktion im Klimasystem.

Im Gegensatz zu den Lernern beschreiben die Wissenschaftler auch die Größen der jeweiligen Speicher, die weniger als absolute, mehr aber in ihren relativen Größen zueinander von Bedeutung sind. Die gespeicherten Kohlenstoffmassen und Flussraten werden dabei von den Wissenschaftlern auf Ebene des Kohlenstoffs und nicht des CO₂ beschrieben, was eine Fokussierung auf die Kohlenstoffvorkommen gegenüber den Kohlenstoffverbindungen ermöglicht.

Von einigen der Wissenschaftler werden die Kohlenstoffflüsse explizit auch auf der Modellebene analysiert und die systemische Bedeutung der verschiedenen Elemente des Speicher-Fluss-Schemas hervorgehoben. Damit zeigt sich eine reflektierte Anwendung des Speicher-Fluss-Schemas auf den Kohlenstoffkreislauf, während Lerner diese Reflektion nicht vornehmen. Ähnliches zeigt sich auch in der Nutzung anderer Metaphern. Insbesondere der IPCC hebt wiederholt die Nutzung des Natürlich-Künstlich-Schemas, wie auch der Treibhausmetapher als metaphorisches Konstrukt durch Anführungszeichen hervor.

Die Denkfigur ERDGESCHICHTLICHES UNGLEICHGEWICHT, und damit die geologisch-historische Einordnung der Verbrennung *fossiler Energieträger*, ist ebenfalls nur bei Wissenschaftlern zu finden. Von den untersuchten Quellen der Ökologen (Smith & Smith 2006) wurden die Kohlenstoffflüsse mit den Energieflüssen in Systemen als untrennbar verknüpft betrachtet. Aus seiner ursprünglich physiologischen Anwendung herausgelöst, wenden sie das Konzept auch auf die industriellen Kohlenstoffflüsse an.

Ein Spezifikum der Lerner, die die Denkfiguren KÜNSTLICHES CO₂ und KÜNSTLICHES UND NATÜRLICHES CO₂ nutzen, ist die Bewertung und Benennung von (künstlichem) CO₂ als Schadstoff.

Metaphern des Kohlenstoffkreislaufs: Nach der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens sind abstrakte Zielbereiche wie der Kohlenstoffkreislauf nicht ohne Metaphern vorstellbar. Im Folgenden sind die lernförderlichen und -hinderlichen Aspekte der von den Wissenschaftlern verwendeten Metaphern dargestellt.

Fossiler Kohlenstoff Ist Brennstoff

Quellbereich: Personenschema (Anthropozentrismen)

Zielbereich: Fossile Kohlenstoffvorräte sind energiereiche Kohlenstoffverbindungen.

Die Benennung des in fossilen Sedimenten in Form von Kohle, Erdöl und Erdgas gebundenen Kohlenstoffs als *fossiler Brennstoff* ist eine von Wissenschaftlern wie auch Lernern gebrauchte, in der Alltags- wie auch Fachsprache sehr häufig anzufindende Bezeichnung. Dabei handelt es sich um einen Anthropozentrismus, der die Perspektive des Menschen auf den in fossilen Sedimenten gespeicherten Kohlenstoff deutlich macht: Die fossilen Kohlenstoffvorräte werden über ihre Verwendung als Brennstoffe für den menschlichen Gebrauch definiert.

Durch diese kulturell stark konventionalisierte Bezeichnung wird die Ursache des Klimawandels über die Zweckbestimmung des fossilen Kohlenstoffs determiniert: Wenn wir nicht anders können als fossilen Kohlenstoff als Energiequelle zu denken und ihn damit über die Verbrennung zu einer CO₂-Quelle zu machen, wird über die Verwendung der Metapher das Denken einer Lebensweise ohne die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs schwer möglich.

Die Metapher *Fossiler Kohlenstoff Ist Brennstoff* gibt somit den Rahmen (frame) für die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs vor: Die zu verbrennenden *Brennstoffe* enthalten als *Energieträger* Energie um die Wirtschaft anzutreiben. Aus Perspektive der Metapher ist es selbstverständlich, die *fossilen Vorräte* und die *Energieressourcen* als *Kraftstoffe* zu nutzen.

Der frame *Fossile Energieträger* setzt somit einen engen Rahmen für das Denken über fossilen Kohlenstoff. Sowohl aus fachdidaktischer Perspektive als auch aus Perspektive der Bildung für Nachhaltige Entwicklung wäre somit für den in fossilen Sedimenten gespeicherten Kohlenstoff ein neutralerer und weniger anthropozentrischer Terminus sinnvoller, wie z. B. *Fossiler Kohlenstoff*.

Kohlenstoffflüsse Sind Kreislauf

Quellbereich: Kreislaufschema

Zielbereich: Der Kohlenstoffkreislauf ist ein geschlossenes System in dem Kohlenstoff zwischen Speichern ausgetauscht wird.

Die Kreislaufmetapher beschreibt die Verbindungen zwischen verschiedenen Kohlenstoffspeichern als Aufnahme und Abgabe von Stoffen. Die Kreislaufmetapher betrachtet Organismen und Systeme auf stofflicher Ebene, wobei Kohlenstoffflüsse anhand ihrer Zu- und Abflüsse verschiedener Systemkomponenten beschrieben werden. Hervorgehoben wird in der Metapher die Idee eines geschlossenen Systems, in dem der Kohlenstoff zwischen verschiedenen Speichern zirkuliert. Dabei geht der Kohlenstoff nicht verloren, sondern wechselt nur seinen Aufenthaltsort.

Der Kreislauf ist in der Metapher *Kohlenstoffflüsse Sind Kreislauf* sehr abstrakt, da nur modellhaft immer wieder gleiche Orte passiert oder die gleichen Zustände eingenommen werden können (vgl. Tabelle 2.2). Die für Kreisläufe und auch Zyklen charakteristische Sequenz immer gleicher Stadien oder Orte ist ebenfalls bei den Kohlenstoffflüssen nur modellhaft gegeben. Fachlich nicht angemessene Interpretationen der Kreislaufmetapher können aus einer zu starken Fokussierung auf das Kreislaufschema entstehen, die Vorstellungen zur Folge haben, in denen Kohlenstoff immer den gleichen Weg nimmt oder in Teilkreisläufen (z. B. Ozean/Atmosphäre) gefangen ist (vgl. Kapitel 6.3.1.).

Energiefluss Ist Kohlenstofffluss**Quellbereich:** Speicher-Fluss-Schema**Zielbereich:** In der Nahrungskette wird Energie in Form von Kohlenstoffverbindungen entlang der Trophiestufen transportiert.

Die der Ökologie entstammende Metapher *Energiefluss Ist Kohlenstofffluss* rekurriert auf das Speicher-Fluss-Schema. Dabei werden Organismen und Systeme auf stofflicher und gleichzeitig energetischer Ebene betrachtet, wobei die Kohlenstoff- und Energieflüsse anhand ihres In- und Outputs in Systemkomponenten beschrieben werden.

Diese ursprünglich der Ökologie entlehnte Metapher wird auch auf die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs übertragen. Hervorgehoben wird dabei, dass die der Energiegewinnung dienende Verbrennung fossiler Sedimente auch immer Kohlenstoffverbindungen freisetzt. Verdeckt wird in der Metaphorik die Möglichkeit einer kohlenstofffreien Energiegewinnung z. B. im Rahmen der Chemosynthese in der Ökologie und der Nutzbarmachung von Energie durch Erneuerbare Energieträger in der Energiewirtschaft.

Verbrennung Ist Künstlich**Quellbereich:** Natürlich-Künstlich-Schema**Zielbereich:** Das CO₂ aus der Verbrennung fossiler Energieträger und der Abholzung ist durch den Menschen verursacht.

Die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs durch den Menschen wird häufig als künstlicher Prozess bezeichnet und damit den natürlichen Prozessen der Atmung und des Gasaustauschs gegenübergestellt. Die Metapher *Verbrennung Ist Künstlich* greift somit auf die durch das Natürlich-Künstlich-Schema beschriebene Unterscheidung zwischen menschlichen und nicht-menschlichen Ursachen verschiedener Kohlenstoffflüsse zurück.

Sie hebt somit durch die sehr eingängige Bezeichnung „künstlich“ die Ursache eines Kohlenstoffflusses hervor. Dabei kann in einer unreflektierten Nutzung des Natürlich-Künstlich-Schemas als Quellbereich doch auch eine Übertragung von der Ursache der Kohlenstoffflüsse auf die Eigenschaften der Moleküle erfolgen. Diese Übertragung ist eines der Merkmale der Denkfiguren KÜNSTLICHES CO₂ und KÜNSTLICHES UND NATÜRLICHES CO₂.

CO₂ Aus Verbrennung Ist Künstlich**Quellbereich:** Natürlich-Künstlich-Schema**Zielbereich:** Das CO₂ aus der Verbrennung fossiler Energieträger und der Abholzung ist durch den Menschen verursacht.

Das Metaphernkonzept *CO₂ aus Verbrennung Ist Künstlich* greift auf die durch das Natürlich-Künstlich-Schema beschriebene Unterscheidung zwischen durch menschliches und nicht-menschliches Zutun entstandenes Kohlenstoffdioxid zurück. Dabei ist in dieser Stelle nicht die Ursache des Kohlenstoffflusses, sondern die Existenz des CO₂ *künstlich* oder *natürlich*.

Bei einer unreflektierten Nutzung des Natürlich-Künstlich-Schemas *als Quellbereich* kann auch hier eine Übertragung von der Ursache der Kohlenstoffflüsse auf die Eigenschaften der Moleküle erfolgen und die Denkfiguren KÜNSTLICHES CO₂ und KÜNSTLICHES UND NATÜRLICHES CO₂ bedingen.

Anthropogenes CO₂**Quellbereich:** Personenschema**Zielbereich:** Das CO₂ aus der Verbrennung fossiler Energieträger und der Abholzung ist durch den Menschen verursacht.

Der Terminus *Anthropogenes CO₂* greift auf das Personenschema zurück, um die Herkunft des aus der Verbrennung und Abholzung stammenden Kohlenstoffdioxids zu beschreiben. Das Wort anthropogen leitet sich von griechisch *ánthropos* „Mensch“ und dem Verbalstamm *gen-* „entstehen“ ab. Anthropogenes CO₂ bezeichnet somit das durch den Menschen entstandene, verursachte oder hergestellte CO₂.

So sich die Definition auf eine vom Menschen herbeigeführte Abholzung oder Verbrennung bezieht, kann die Metapher der fachlich angemessenen Bezeichnung des durch den Menschen zusätzlich in die Atmosphäre freigesetzten CO₂ dienen. Jedoch ist auch das durch die Zellatmung des Menschen freigesetzte CO₂ in letzter Konsequenz anthropogen, also vom Menschen verursacht bzw. ausgestoßen. Die Metapher wird jedoch nicht in diesem Zusammenhang konzeptualisiert. Bei einer fachlich nicht angemessenen Deutung des Terminus *anthropogen* kann es bei Lernern zu einer Synonymisierung von anthropogen mit „künstlich“ und damit zu den Denkfiguren KÜNSTLICHES CO₂ und KÜNSTLICHES UND NATÜRLICHES CO₂ kommen.

Kohlenstoffkreislauf Ist Im Gleichgewicht**Quellbereich:** Gleichgewichtsschema**Zielbereich:** Ausgeglichene Kohlenstoffflüsse

Die Anwendung des Gleichgewichtsschemas auf den Kohlenstoffkreislauf wurde in Kapitel 6.3.4 ausführlich diskutiert. Die Metapher wird angewandt, um zwischen ausgeglichenen und unausgeglichenen Zuständen zu unterscheiden. Aufgrund ihrer stark lebensweltlichen Verankerung hat sie einen großen subjektiven Erklärungswert für Lerner und Wissenschaftler.

Die Gleichgewichtsmetapher wird häufig nicht nur theoriebildend zur Erklärung ausgeglichener Zustände herangezogen. Vielmehr wird das natürliche Gleichgewicht – der Gaia-Hypothese (Lovelock 1989) folgend – zum Idealbild und Ziel natürlicher Prozesse stilisiert. In der häufig auftretenden Kombination mit dem Natürlich-Künstlich-Schema bekommt die Gleichgewichtsmetapher zusätzlich wertende Eigenschaften, indem ein Gleichgewicht als *gut* bewertet wird. Pearce (2001) hingegen beschreibt dieses Gleichgewicht unter einer anderen Perspektive: Der Kohlenstoffkreislauf sei durch einen evolutionären Wettlauf zwischen autotrophen und heterotrophen Organismen geprägt, der den CO₂-Gehalt der Atmosphäre auf langen Zeitskalen stark schwanken lässt.

Die Metapher hebt vorübergehend stabile Zustände hervor, blendet indes die Naturgeschichtlichkeit des Kohlenstoffkreislaufs aus und verdeckt die im Laufe der Naturgeschichte immer wieder aufgetretenen Ungleichgewichte, die u. a. zu einem Aufbau der fossilen Sedimente geführt haben. Lernförderlicher als das Bild eines Gleichgewichts im Kohlenstoffkreislauf wäre z. B. die von Kattmann (2005) vorgeschlagene Serie von Ungleichgewichten, die sich ausgleichend zu einem vorübergehend stabilen Zustand führen.

Verbrennen Ist Stören / Abholzen Ist Stören**Quellbereich:** Gleichgewichtsschema**Zielbereich:** Veränderung der Kohlenstoffflüsse und Kohlenstoffspeicher durch Verbrennung und Abholzungen.

In der *Verbrennen/Abholzen Ist Stören* Metaphorik werden die Vorstellungen der Gleichgewichtsmetaphern durch Wertungen erweitert. Die als negativ empfundenen Störungen werden dabei auf Ungleichgewichte übertragen, die vom Menschen über die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs und die Abholzung von Wäldern herbeigeführt werden. Vom Menschen unberührte Systeme werden dabei als im Gleichgewicht befindlich imaginiert. Dies deckt sich mit den dem Gleichgewichtsschema zugrunde liegenden Erfahrungen und auch dem naturhistorischen Ökologieverständnis (vgl. Kapitel 6.3.5). Aus ökologischer Perspektive kann jedoch nicht begründet werden, warum ein bestimmtes Gleichgewicht aufrechterhalten werden sollte und damit erstrebenswert ist (vgl. Janich & Weingarten 1999, S. 172).

Die Metapher *Verbrennen Ist Stören* hebt die Beeinflussung vermeintlich stabiler und ausgeglichener Zustände durch den Menschen hervor, verdeckt aber gleichzeitig die natürlichen Schwankungen im Kohlenstoffkreislauf und bewertet die Aktivitäten des Menschen.

Verbrennen Ist Freisetzen**Quellbereich:** Behälterschema, Gefangenschaft vs. Freiheit**Zielbereich:** Kohlenstoff wird durch Oxidationsprozesse in die Atmosphäre emittiert.

Die Metapher *Verbrennen Ist Freisetzen* hebt den Kohlenstofffluss von einem Behälter in einen anderen hervor. Die Nutzung des Konzeptes *Verbrennen ist Freisetzen* ist in seiner Struktur eng mit der Vorstellung einer Kohlenstoffbilanz (vgl. Kapitel 6.3.1) verknüpft. Die Atmosphäre wird in der Metapher als Ort der Freiheit imaginiert, während die übrigen Behälter Gefangenschaft bedeuten: Kohlenstoff wird in die Atmosphäre freigesetzt und von der Vegetation gebunden oder eingefangen.

Verdeckt werden in der Metapher die unterschiedlichen energetischen Stufen verschiedener Kohlenstoffverbindungen und auch seine Reaktionen. Eine Fokussierung auf das Kohlenstoffbudget verhindert unter Umständen das Erkennen der unterschiedlichen Erscheinungsformen des Kohlenstoffs.

8.4 Leitlinien zur Vermittlung des Kohlenstoffkreislaufs

Die Ergebnisse des Vergleichs geben Hinweise darauf, wie die Ursachen und Mechanismen des Klimawandels effektiv und fruchtbar vermittelt werden können. Im Folgenden

werden Leitlinien zur Strukturierung von Vermittlungssituationen vorgeschlagen, mit denen eine Rekonstruktion von Vorstellungen ausgehend von den jeweiligen Alltagsvorstellungen der Lerner erreicht werden sollen. Aufbauend auf diesen Leitlinien werden Interventionen für Vermittlungssituationen beschrieben, die ein Lernen des Klimawandels erleichtern. Ausgehend von den erfassten Vorstellungen werden somit Leitlinien und Lernangebote entwickelt, die schließlich in Vermittlungsexperimenten auf ihre Lernwirksamkeit hin überprüft werden. Die Lernangebote sind dabei auf einen modularen Einsatz im Unterricht konzipiert, d. h. sie sollen unabhängig voneinander und zielgenau auf die vermuteten oder analysierten Alltagsvorstellungen hin einsetzbar sein. Die in der Arbeit evaluierten Lernangebote sind in Kapitel 9 ausführlich dargestellt.

8.4.1 Kohlenstoff als natürlichen Bestandteil der Atmosphäre begreifen

Lerner, die über die KÜNSTLICHES KOHLENSTOFFDIOXID verfügen, betrachten CO₂ als einen nicht-natürlichen Bestandteil der Atmosphäre. Auch in der Denkfigur NATÜRLICHES UND KÜNSTLICHES KOHLENSTOFFDIOXID wird das CO₂ aus der Verbrennung als künstlicher Bestandteil der Atmosphäre betrachtet, der nicht in den natürlichen Kohlenstoffkreislauf eingebunden werden kann. Ziel von Lernangeboten zum Kohlenstoffkreislauf muss es somit sein, Kohlenstoff bzw. Kohlenstoffdioxid als natürlichen Bestandteil der Atmosphäre zu begreifen.

Anhand der Leitlinie wurden folgende Interventionen entwickelt:

Erdgeschichtliche CO₂-Konzentration	Anhand einer Kurve mit der CO ₂ -Konzentration der letzten 550 Millionen Jahre wird deutlich gemacht, dass es CO ₂ schon lange vor der Industrialisierung gab.
Geschichte eines Kohlenstoffteilchens	Anhand einer Narration über den Kohlenstoffkreislauf wird ein fiktives Kohlenstoffteilchen verfolgt und so a) die vorindustrielle Präsenz von CO ₂ und b) die fotosynthetische Fixierung von CO ₂ aus der Verbrennung verdeutlicht.

8.4.2 Den Kohlenstoffkreislauf als Speicher-Fluss-Schema erkennen

Ein Vergleich der Vorstellungen zum Klimawandel zeigt, dass sowohl Lerner als auch Wissenschaftler auf ein Speicher-Fluss-Schema zurückgreifen, um die anthropogenen Einflüsse auf den Kohlenstoffkreislauf als Ursache der globalen Erwärmung zu beschreiben. Das Speicher-Fluss-Schema ist dabei eine Verknüpfung des Behälterschemas mit dem Start-Weg-Ziel-Schema, die beide zur Erklärung des Kohlenstoffkreislaufs genutzt werden.

Die Lerner verwenden die Schemata unspezifischer als die Wissenschaftler, sodass Vorstellungen entwickelt werden, die nicht der fachwissenschaftlichen Perspektive entsprechen. Vor dem Hintergrund des erfahrungsbasierten Verstehens kann dies damit erklärt werden, dass die Lerner keine direkten Erfahrungen mit dem Kohlenstoffkreislauf haben und dadurch verkörperte Vorstellungen in diesem Bereich fehlen. Aus diesem Grund ist kein direktes Verständnis möglich, weshalb Lerner auf imaginatives Verständnis angewiesen sind. Auch Wissenschaftler nutzen diese Art des Verständnisses, verfügen jedoch über korrespondierende wissenschaftliche Erfahrungen, wodurch ihnen die Begrenztheiten des imaginativen Verständnisses deutlich werden.

Durch die Reflexion der verwandten Schemata und der gleichzeitigen Vermittlung einer wissenschaftlichen Perspektive können Lerner ihre verkörperten Vorstellungen rekonstruieren, wodurch ein wissenschaftsorientiertes Verständnis ermöglicht wird. Um den Kohlenstoffkreislauf

als Speicher-Fluss-Schema zu erkennen, muss das Schema mit Hilfe eines Modells expliziert und reflektiert werden. Zu der Leitlinie wurden folgende Lernangebote entwickelt:

KOHLENstoffe	Verschiedene Kohlenstoff enthaltende Gegenstände werden systematisiert und nach ihrem räumlichen Vorkommen auf der Erde kategorisiert.
Geschichte und Speicher-Fluss-Modell	Die Geschichte eines Kohlenstoffteilchens wird mithilfe eines Speicher-Fluss-Modells verfolgt.
Kohlenstoffkreislauf im Speicher-Fluss-Modell	Das Speicher-Fluss-Schema wird anhand seiner Bestandteile von den Lernern in seiner Anwendung auf den Kohlenstoffkreislauf reflektiert.
Klimawandel und Speicher-Fluss-Modell	Die Lerner diskutieren anhand des Speicher-Fluss-Modells die Vorgänge beim Klimawandel.

8.4.3 Reflexion des Natürlich-Künstlich-Schemas im Speicher-Fluss-Modell

Aus der Analyse der Lernervorstellungen wird deutlich, dass der Gegensatz künstlich-natürlich mit dem Konzept *Natürlich ist gut – künstlich ist schlecht* zur Beschreibung von Kohlenstoffflüssen herangezogen wird. Dabei werden dem CO₂ aus der Verbrennung Attribute wie *künstlich, chemisch, radioaktiv etc.* und damit auch andere Eigenschaften als dem *natürlichen* CO₂ aus physiologischen Prozessen zugeordnet. Wie der wechselseitige Vergleich der Vorstellungen zeigt, nutzen nicht nur Lerner diesen Gegensatz, sondern auch die Wissenschaftler. Letztere verwenden den Gegensatz aber in einem verkürzten Sinne, um die Herkunft des CO₂ zum Ausdruck zu bringen. *Künstliches CO₂* wird von Wissenschaftlern als Kurzform für „auf künstlichem Wege emittiertes CO₂“ verwandt. Während Wissenschaftler das Natürlich-Künstlich-Schema somit auf den Prozess „Verbrennung“ oder die Ursache „durch den Menschen“ anwenden, wenden es manche Lerner auf den Stoff an. Ziel von Lernangeboten muss also der Wechsel der ontologischen Perspektive sein: vom Stoff auf den Prozess.

In Vermittlungssituationen gilt es, die Nutzung der Termini mit den Lernern zu reflektieren und einen kontextbezogenen Umgang damit zu üben. Dabei kann die Reflexion der von Wissenschaftlern häufig alternativ genutzten Wendung *anthropogenes CO₂* (gr. *ánthrōpos* = Mensch, gr. *genes* = verursachen) hilfreich sein.

Zu der Leitlinie wurden folgende Lernangebote entwickelt:

Elemente des Speicher-Fluss-Modells	Anhand der Diskussion verschiedener Elemente des Speicher-Fluss-Modells (Behälter, Fluss, Inhalt) wird geklärt, welches der Elemente vom Menschen beeinflusst wird.
Natürlich - künstlich	Die Termini natürlich-künstlich werden den Elementen des Speicher-Fluss-Modells zugeordnet.
Reflexion des Terminus „anthropogen“	Die Lerner reflektieren den Terminus <i>anthropogen</i> .

8.4.4 Den Klimawandel auf veränderte Kohlenstoffflüsse zurückführen

Ziel der Lernangebote zum Kohlenstoffkreislauf ist die Beschreibung der Ursachen der globalen Erwärmung aufgrund des vom Menschen veränderten Kohlenstoffbudgets der Atmosphäre. Ursache hierfür sind veränderte Kohlenstoffflüsse und damit die Verlagerung von Kohlenstoff zwischen verschiedenen Speichern. Auch hier hilft das Speicher-Fluss-Modell, um die Veränderungen im Kohlenstoffkreislauf erfahrbar zu machen.

Zu der Leitlinie wurden folgende Lernangebote entwickelt:

Vergleich der gespeicherten Kohlenstoffmengen	Lerner schätzen die Massen des in den verschiedenen Reservoirs gespeicherten Kohlenstoffs, ordnen sie anhand eines Informationstextes zu und diskutieren die Abweichungen ihrer Schätzungen.
Vorindustrielle Kohlenstoffflüsse im Speicher-Fluss-Modell	Anhand eines Informationstextes werden die vorindustriellen Kohlenstoffflüsse im Speicher-Fluss-Modell nachgestellt.
Industrielle Kohlenstoffflüsse im Speicher-Fluss-Modell	Anhand eines Informationstextes werden die industriellen Einflüsse auf die Kohlenstoffflüsse im Speicher-Fluss-Modell nachgestellt.
Reagierender Kohlenstoffkreislauf	Anhand eines Informationstextes werden die veränderten Kohlenstoffflüsse durch die Pufferung des zusätzlichen Kohlenstoffs in der Atmosphäre dargestellt.
Kohlenstoffbudget verschiedener Ökosysteme	Anhand eines Informationstextes werden die Ökosysteme Regenwald und Kulturland auf ihre Speicher- und Flusskapazitäten für Kohlenstoff verglichen.

8.5 Vergleich der Vorstellungen zum Treibhauseffekt

Gemeinsamkeiten: Auch in der Beschreibung des Treibhauseffekts greifen sowohl Lerner als auch Wissenschaftler auf das Behälterschema zurück. Dabei werden Erde und Atmosphäre als Behälter gedacht und der Weltraum als Umgebung. In allen Vorstellungen nimmt die Energie der Atmosphäre während der globalen Erwärmung zu. Unterschiede zeigen sich aber in der Kontinuität der Zunahme.

Gemeinsam ist auch allen, dass sie den Treibhauseffekt für die Erwärmung verantwortlich machen, wobei die Lerner meist einen anderen Begriff vom Treibhauseffekt haben als die Wissenschaftler. Lerner, die über die Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT verfügen, greifen ähnlich den Wissenschaftlern auf die erfahrungsbasierte Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH WENIGER ABSTRAHLUNG zurück. Dabei konzeptualisieren sie die Treibhausgase in einer atmosphärischen Schicht ähnlich der Variante Treibhausgasschicht in der Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT, die von den Wissenschaftlern genutzt wird.

Verschiedenheiten: Anders als die Wissenschaftler führen die Lerner in der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH den Klimawandel nicht auf eine dämmende, sondern eine zerstörende Wirkung der Treibhausgase zurück. Dabei wird die Ozonschicht vom CO₂ angegriffen. Die grundlegende erfahrungsbasierte Denkfigur ist somit auch nicht Erwärmung durch weniger Abstrahlung, sondern Erwärmung durch mehr Einstrahlung. Die Variante SCHLIEßENDE FENSTER in den Wissenschaftlervorstellungen besitzt eine konzeptuelle Nähe zu der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH: Bei beiden werden die Treibhausgase in einer Treibhausgasschicht gedacht und Löcher in dieser Schicht mit der globalen Erwärmung in Verbindung gebracht. Während sich

bei den Wissenschaftlern diese Löcher schließen, vergrößern sie sich bei den Lernern. Hier wird somit nicht nur auf das gleiche Schema (Behälterschema), sondern auch auf das gleiche Konzept (*Strahlungsfluss durch Loch in einer Schicht*) Bezug genommen, jedoch mit unterschiedlichen Zielbereichen. Interessanterweise führt das Ozonloch aus fachlicher Perspektive aufgrund komplexer atmosphärischer Prozesse eher zu einer Abkühlung der Atmosphäre, wie der IPCC im Konzept *Abkühlung durch Ozonloch* beschreibt.

Eigenheiten: Die Besonderheiten der einzelnen Vorstellungen ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Erfahrungshintergründe der Untersuchungsgruppen. In der Beschreibung des Treibhauseffekts ist den Wissenschaftlern die Beschreibung eines dynamischen Gleichgewichts, in dem ein mittelfristiger Ausgleich der Strahlungsbilanz erfolgt, eigen. Da dynamische Gleichgewichte in erster Linie ein wissenschaftliches Denkmodell sind, das keine direkt erschließbare lebensweltliche Verankerung besitzt, wird von den Lernern und auch immer wieder von Wissenschaftlern die Vorstellung eines absoluten Gleichgewichts genutzt.

Während für die Lerner durch die höhere CO₂-Konzentration ein fortwährendes Ungleichgewicht entsteht, führt für die Wissenschaftler nur eine Zu- oder Abnahme der CO₂-Konzentration zu einem Ungleichgewicht. Hier stehen somit die Konzepte *Kontinuierliches Ungleichgewicht* und *Vorübergehende Serie von Ungleichgewichten* gegenüber. Dies ist neben den unterschiedlichen Erfahrungshorizonten auch auf verschiedene Reflexionsniveaus der Lerner und Wissenschaftler zurückzuführen. Das Denkmodell der Lerner, dem zufolge durch den Treibhauseffekt alle von der Sonne eingestrahlte Energie kontinuierlich in der Atmosphäre gefangen wird, ist aus wissenschaftlicher Perspektive inkonsistent, da es zu einer unendlichen Temperaturerhöhung kommen müsste. Dieses Problem wird von den Lernern hingegen nicht aufgeworfen.

Eigen ist den Wissenschaftlern darüber hinaus die Vorstellung einer Treibhausatmosphäre, also den in der Atmosphäre gleich verteilten Treibhausgasen und die Idee, dass sich die Atmosphäre in verschiedene Sphären aufteilen lässt, in denen unterschiedliche Strahlungsgleichgewichte herrschen. Vorstellungen zur Abkühlung der oberen Atmosphärenschichten sind eine Besonderheit in den Wissenschaftlervorstellungen.

Die Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Strahlungsarten (z. B. Sonnen- bzw. Lichtstrahlung und Wärmestrahlung) ist eine Eigenheit differenzierter Denkfiguren, wie ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT (Var. WÄRMESTRAHLUNG). Dies ist auf die unreflektiertere Erfahrungsbasis der Lerner zurückzuführen: So wird Sonnenstrahlung oft als direkt wärmend empfunden. Diese Empfindung ist jedoch auf die Absorption von Lichtenergie zurückzuführen, da die Sonne nur wenig Energie in thermisch aktiven Wellenlängen zur Erde sendet und diese von der Atmosphäre absorbiert werden (vgl. Kapitel 6.4). Die Wärmeempfindungen sind auf die Absorption von kurzen Wellenlängen und die Emission von Wärmeenergie zurückzuführen. Damit hängen auch die Vorstellungen der Absorption und Emission von Wärmeenergie durch die Treibhausgase bzw. die Erdoberfläche zusammen. Ohne diese Prozesse und ohne die damit zusammenhängende Umwandlung kurzwelliger in langwellige Strahlung, beschränken sich die Vorstellungen zum Einfluss der Erdoberfläche bzw. der Treibhausschicht auf eine Reflexion von Strahlung.

Die Finalisierung atmosphärischer Strahlungsflüsse auf das Ziel hin, in ein Gleichgewicht zurückzukehren ist eine Spezifität der Wissenschaftler, die das Gleichgewichtsschema zur grundlegenden Theorie der atmosphärischen Strahlungsflüsse erheben.

Metaphern des Treibhauseffekts: Im Zusammenhang mit dem Verständnis zum Treibhauseffekt werden von Wissenschaftlern verschiedene Konzepte verwendet, die metaphorischen Ursprungs sind. Im Folgenden sind zentrale von Wissenschaftlern genutzte metaphorische Konzepte zur Beschreibung verschiedener Aspekte des Treibhauseffekts dargestellt und die ihnen innewohnenden Begrenztheiten aufgeführt.

Atmosphäre Ist Treibhaus**Quellbereich:** Erwärmung in Glashäusern**Zielbereich:** Die Atmosphäre erwärmt sich durch die selektive Absorption von Wärmestrahlung durch klimaaktive Gase.

In der stark konventionalisierten Metapher des Treibhauseffekts wird die Atmosphäre mit einem Gewächshaus verglichen. Dabei werden zwei in ihren Mechanismen unterschiedliche Phänomene analogisiert (vgl. Kapitel 6.4.4): So beruht die Erwärmung im Treibhaus hauptsächlich auf einer Unterbindung der Luftzirkulation (Konvektion) und erst in zweiter Linie auf der Durchlässigkeit der Glaswände für Licht und Undurchlässigkeit für Wärme. Die Prozesse beim so genannten Treibhauseffekt hingegen beruhen auf einer selektiven Absorption von langwelliger Strahlung durch Treibhausgase. Diese fachlich nicht korrekte Übertragung wird von den Lernern nicht erkannt, und von den Wissenschaftlern in der Regel nicht thematisiert.

Die Treibhausmetapher und damit der Treibhauseffekt wird von Lernern somit aus fachlicher Sicht auf die Auswirkungen und nicht auf die Mechanismen verstanden: Die Erwärmung im Inneren z. B. eines Wintergartens, unter einem Glasdach oder hinter einer großen Glasscheibe ist eine Erfahrung, die vielen Menschen zugänglich ist. Diese Erfahrung wird auf die Atmosphäre übertragen. Warum es sich in einem Glashaus erwärmt, wird jedoch nicht verstanden: Kein Lerner beschreibt die Unterbindung der Konvektion im Glashaus als Ursache der dortigen Erwärmung.

Die selektive Durchlässigkeit der Atmosphäre für Wärmestrahlung wird hingegen von einigen Lernern beschrieben. Die Metapher des Treibhauseffekts wird somit von den Lernern nur verstanden, weil sie die Vorgänge im Treibhaus nicht verstehen. Genaugenommen eignet sich die Treibhausmetapher für die Lerner somit zur Beschreibung, dass es in der Atmosphäre wärmer wird, aber nicht zur Erklärung, warum es dort wärmer wird.

Atmosphäre Ist Behälter**Quellbereich:** Behälterschema**Zielbereich:** Die Atmosphäre ist ein Raum, an dessen Grenzen Strahlungsflüsse errechnet werden können.

Die Atmosphäre ist ohne das Behälterschema nicht imaginierbar. Besonders deshalb sollten die Begrenzungen des Quellbereichs in der Übertragung auf die Atmosphäre reflektiert werden. In der Regel wird die Behältergrenze dabei fachlich unangemessen als solide Schicht oder Grenze gedacht. In der Verwendung der Metapher sollte deutlich gemacht werden, dass die klare Abgrenzung der Atmosphäre vom Weltraum oder auch verschiedener Schichten innerhalb der Atmosphäre modellhaft zur Berechnung von Strahlungsflüssen imaginiert werden kann. Gleichzeitig sollte jedoch die Modellhaftigkeit herausgearbeitet werden, um deutlich zu machen, dass die Atmosphäre keine soliden Grenzen hat.

Erwärmung Durch Treibhauseffekt**Quellbereich:** Erwärmung in Treibhäusern**Zielbereich:** Die Konzentrationszunahme klimaaktiver Gase führt zur Erwärmung der Atmosphäre.

Die Metapher *Erwärmung Durch Treibhauseffekt* wird häufig herangezogen, um die zur globalen Erwärmung führenden Prozesse zu erklären. Dabei ist die Reichweite des Konzepts unklar: Die Klimawissenschaft beschreibt einen *natürlichen Treibhauseffekt*, der die globale Durchschnittstemperatur von -18 °C auf $+15\text{ °C}$ hebt und einen *verstärkten Treibhauseffekt*, der zur globalen Erwärmung führt. Bei der Verwendung der Metapher *Erwärmung Durch Treibhauseffekt* bleibt somit unklar, ob der natürliche und der verstärkte Treibhauseffekt oder nur der natürliche Treibhauseffekt gemeint ist. Zur Vermeidung von Missverständnissen bietet sich somit die Nutzung der Termini *natürlicher Treibhauseffekt* und *zusätzlicher bzw. verstärkter Treibhauseffekt* an.

Erwärmung Durch Anthropogenen Treibhauseffekt**Quellbereich:** Personenschema**Zielbereich:** Die Konzentrationszunahme klimaaktiver Gase führt zur Erwärmung der Atmosphäre.

Die Metapher des *Anthropogenen Treibhauseffekts* kann die Vorstellung eines grundsätzlich vom Menschen verursachten Treibhauseffekts evozieren, wie sie auch bei einigen Lernern zu finden ist. Eindeutiger wäre die Bezeichnung „*Verstärkter Treibhauseffekt*“ um deutlich zu machen, dass es sich weder um ein grundsätzlich vom Menschen verursachtes Phänomen, noch um ein anderes Phänomen als beim natürlichen Treibhauseffekt handelt.

Atmosphäre Im Strahlungsgleichgewicht**Quellbereich:** Gleichgewichtsschema**Zielbereich:** Eingestrahlte und abgestrahlte Energie sind mittelfristig ausgeglichen.

In der Metapher *Atmosphäre Im Strahlungsgleichgewicht* werden die Strahlungsflüsse zwischen der in die Atmosphäre eingestrahnten Sonnenenergie und der abgestrahlten Wärmeenergie erfasst. Dabei ist ein Strahlungsgleichgewicht, ähnlich wie die Metapher des Gleichgewichts im Kohlenstoffkreislauf, ein nicht erreichter Modellzustand (vgl. Kapitel 6.4.2). Die diese Metapher nutzenden Wissenschaftler tendieren z. T. zu Finalisierungen und beschreiben das Gleichgewicht als Ziel- oder Idealzustand. In der Vermittlung der atmosphärischen Strahlungsflüsse sollte daher der modellhafte Charakter der Metapher deutlich gemacht werden.

(Verstärkter) Treibhauseffekt Ist Störung**Quellbereich:** Gleichgewichtsschema**Zielbereich:** Durch den Treibhauseffekt nimmt der Energiegehalt der Atmosphäre zu.

In der Metapher *Treibhauseffekt Ist Störung* werden die Vorstellungen der Gleichgewichtsmetaphern durch Wertungen erweitert. Die Metapher hebt die Beeinflussung vermeintlich stabiler und ausgeglichener Zustände durch den Menschen hervor, verdeckt aber gleichzeitig die natürlichen Schwankungen der Strahlungsflüsse im Tages- und Jahresgang und bewertet die Aktivitäten des Menschen als negativ. Die Metapher fokussiert auf einen vermeintlich „normalen Energiegehalt der Atmosphäre“, der vom Menschen verändert wird. Fachlich angemessener wären beispielsweise die Bezeichnungen „Verschiebung des Strahlungsgleichgewichts“ oder „Zunahme des atmosphärischen Energiegehaltes“.

Erwärmung Durch Treibhausgase**Quellbereich:** Treibhäuser**Zielbereich:** Klimaaktive Gase in der Atmosphäre sind selektive Strahlungsabsorber.

Die Bezeichnung *Treibhausgas* für die die globale Erwärmung verursachenden Gase (z. B. CO₂, CH₄, O₃, FCKW) hat eine große sprachliche Nähe zu den für die Ausdünnung stratosphärischen Ozons verantwortlich gemachten *Treibgase* (z. B. FCKW). Da die beiden atmosphärischen Phänomene von Lernern häufig verwechselt werden, wäre eine alternative Benennung der für die globale Erwärmung verantwortlichen Gase z. B. als klimaaktive Gase weniger fehlleitend.

Treibhausgase Sind Decke**Quellbereich:** Wärmende (Bett-)Decke**Zielbereich:** Klimaaktive Gase in der Atmosphäre sind selektive Strahlungsabsorber.

Die Metapher *Treibhausgase Sind Decke* wird genutzt, um die wärmenden Eigenschaften der Treibhausgase vorstellbar werden zu lassen. Der Quellbereich einer Bettdecke, die die vom Körper abgestrahlte Wärme unter der Decke dämmt und es wohliger warm werden lässt, dient der Erklärung des Phänomens der Erwärmung der Atmosphäre durch Treibhausgase. Dabei ist lebensweltlich nachvollziehbar, dass mehr Treibhausgase zu einer stärkeren Erwärmung der Atmosphäre führen, da auch eine dickere Decke, z. B. mit mehr Daunenfedern, stärker wärmt als eine dünne Decke.

Die Metapher hat – ähnlich der des Treibhauseffekts – fachliche Begrenzungen, da die Erwärmung unter der Bettdecke auf einer Unterdrückung der Konvektion und somit der Dämmung der Wärme unter der Bettdecke führt. Sie hebt jedoch gleichzeitig die dämmenden Eigenschaften der Treibhausgase hervor und kann dabei bei der Abgrenzung von der Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH helfen, in der den Treibhausgasen aggressive Eigenschaften zugeschrieben werden. Die Metapher *Treibhausgase Sind Decke* kann das Bild einer Treibhausgasschicht in der Atmosphäre evozieren. Weniger missverständlich wäre die Metapher *Atmosphäre Ist (wärmende) Decke*, in der die Eigenschaften auf die ganze Atmosphäre übertragen werden.

Treibhausgase Bilden Schicht**Quellbereich:** Behälterschema**Zielbereich:** Klimaaktive Gase in der Atmosphäre sind selektive Strahlungsabsorber.

Die Metapher *Treibhausgase Bilden Schicht* ist an die Metapher *Atmosphäre Ist Behälter* angelehnt. In der Metapher werden die – aus fachlicher Sicht in der Atmosphäre überall in nahezu gleicher Konzentration vorhandenen – klimaaktiven Gase als in einer atmosphärischen Schicht befindlich imaginiert. Diese Metapher führt zu einer konzeptuellen Nähe der Vorstellungen des Treibhauseffekts zum Ozonloch (vgl. Kapitel 7.3.5). Da die Metapher sowohl fachlich unangemessen als auch lernhinderlich ist, ist sie für die Vermittlung des Klimawandels inadäquat.

Atmosphäre Hat Fenster**Quellbereich:** Behälterschema, Fenster**Zielbereich:** Klimaaktive Gase in der Atmosphäre sind selektive Strahlungsabsorber.

Mit der Metapher *Atmosphäre Hat Fenster* erklären Wissenschaftler die selektive Durchlässigkeit von klimaaktiven Gasen für bestimmte Wellenlängen elektromagnetischer Strahlung auf molekularer Ebene: Je mehr Treibhausgase sich in der Atmosphäre befinden, die in den bisher durchlässigen Spektralbereichen absorbieren, desto kleiner werden die atmosphärischen Fenster und desto wärmer wird es in der Atmosphäre.

Die Metapher kann hilfreich sein, um die Zunahme des atmosphärischen Energiegehalts anhand sich schließender Fenster zu verstehen, da es in einem Raum (im Winter) auch wärmer wird, wenn die Fenster geschlossen werden. Jedoch hat auch diese Metapher eine konzeptuelle Nähe zu der Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH und greift in einer makroskopischen Deutung auf die Vorstellung einer Treibhausgasschicht zurück. Somit sollte die Metapher entsprechend vorsichtig und reflektiert genutzt werden.

Treibhausgase Fangen Wärme**Quellbereich:** Behälterschema**Zielbereich:** Klimaaktive Gase in der Atmosphäre sind selektive Strahlungsabsorber.

Der Treibhauseffekt wird von Wissenschaftlern z. T. auf ein Einfangen von Wärme durch Treibhausgase zurückgeführt. Damit werden Treibhausgase als Behälter konzeptualisiert, die etwas aufnehmen (einfangen) oder abgeben (freisetzen) können. Aus fachlicher Perspektive fangen Treibhausgase Wärmestrahlung nicht nur über eine Absorption ein, sondern emittieren die Wärmestrahlung auch wieder. Das Metaphernkonzept *Treibhausgase Fangen Wärme* fokussiert indes ausschließlich auf das Einfangen. Diese Vorstellung führt bei Lerner zu dem Missverständnis, dass kontinuierlich mehr Wärme in der Atmosphäre gefangen und nicht wieder abgegeben wird. Der Logik dieser Vorstellung folgend, müsste sich immer mehr Wärme in der Atmosphäre ansammeln und zu einer unendlichen Aufheizung der Atmosphäre kommen.

Weniger Missverständnisse würde die Verknüpfung „Einfangen und Freisetzen“ oder die „vorübergehende Speicherung“ von Wärme durch die Treibhausgase transportieren.

Deutlich wird, dass manche von Wissenschaftlern verwendeten metaphorischen Redewendungen beim Verstehen der veränderten Strahlungsflüsse helfen können. Jedoch sind metaphorische Konzepte immer auch begrenzt: Jeder Quellbereich kann immer nur gewisse Anteile des Zielbereichs beschreiben und lässt andere Aspekte außen vor.

8.6 Leitlinien zur Vermittlung des Treibhauseffekts

8.6.1 CO₂ als Ursache der globalen Erwärmung begreifen

Einige Lerner erklären eine Verschmutzung der Atmosphäre zur Ursache der globalen Erwärmung. Ansatzpunkt der Vermittlung des Klimawandels sollte es sein, einen durch die Emission von klimaaktiven Gasen verstärkten Treibhauseffekt als Ursache der globalen Erwärmung zu sehen und gegebenenfalls andere Ursachen auszuschließen. Zu der Leitlinie wurden folgende Lernangebote entwickelt:

Skeptikerargument

Die Lerner diskutieren anhand des Arguments „Die Erde erwärmt sich durch eine aktivere Sonne“ mögliche Ursachen der globalen Erwärmung.

Strahlungsantriebe

Die Lerner diskutieren anhand einer Grafik der Strahlungsantriebe des Klimasystems die Einflüsse der Sonne und der Treibhausgase auf das Klima.

8.6.2 Ozonloch und Treibhauseffekt unterscheiden

Die Didaktische Strukturierung zeigt, dass neben einer Verwechslung häufig auch eine Hybridisierung des Treibhauseffekts und des Ozonlochs vorkommt. Kernelement von Vermittlungsstrategien zum Klimawandel sollte somit die konzeptuelle Unterscheidung zwischen den beiden erwähnten atmosphärischen Phänomenen sein. Die Differenzierung der Phänomene kann dabei anhand der Prognosen, der atmosphärischen Region, der zugrunde liegenden Effekte oder auch dem Ort der Auswirkungen erfolgen:

- Während klimaaktive Gase gleichförmig in der Atmosphäre verteilt sind, gibt es eine relativ dünne stratosphärische Schicht mit einer hohen Ozonkonzentration in etwa 35 km Höhe, die so genannte Ozonschicht.
- Aufgrund des Montreal-Protokolls und der daraufhin abnehmenden atmosphärischen Konzentration an halogenierten Kohlenwasserstoffen (FCKW) wird ein Rückgang des Ozonlochs bis 2100 unterhalb der Werte von 1980 prognostiziert (Randeniya et al. 2002; Staehelin et al. 2001). Die globale Erwärmung hingegen soll bis 2100 zunehmen.
- Die Ozonschicht schützt die Erde vor ultravioletter Strahlung. Diese Strahlung wirkt als Mutagen erbgutverändernd und hat deshalb u. a. krebsauslösende Eigenschaften.
- Das größte Ausmaß haben die Ozonlöcher über der Arktis und der Antarktis inklusive Südastralien und Tasmanien. Der verstärkte Treibhauseffekt hingegen hat globale Auswirkungen.

Durch die Differenzierung der beiden atmosphärischen Phänomene soll bei den Lernern eine Unzufriedenheit mit den verfügbaren Vorstellungen entstehen und dadurch eine grundlegende Voraussetzung zur Vorstellungsrekonstruktion geschaffen werden. Auf eine Thematisierung der atmosphärischen Abkühlung durch das Ozonloch wird zur Komplexitätsreduktion verzichtet.

Zu der Leitlinie wurden folgende Lernangebote entwickelt:

Unterschiedliche Prognosen	Anhand der Prognosen zum Verlauf des Ozonlochs und des Treibhauseffekts diskutieren die Lerner die Zusammenhänge zwischen den beiden Phänomenen.
Räumliche Trennung	Anhand einer Abbildung diskutieren die Lerner die an unterschiedlichen Stellen in der Atmosphäre lokalisierten Prozesse der Ozonschicht und des Treibhauseffekts.
Weniger Ausstrahlung statt Mehr Einstrahlung	Das Behälterschema wird auf die globale Erwärmung angewandt und zwischen <i>Weniger Ausstrahlung</i> (Treibhauseffekt) und <i>Mehr Einstrahlung</i> (Ozonloch) unterschieden.

8.6.3 CO₂ speichert Wärme

Die Verwechslung von Ozonloch und Treibhauseffekt führt zu einer Unklarheit über die Rolle des CO₂ bei der globalen Erwärmung. In der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH führen aggressive Eigenschaften des CO₂ zu einem Loch in der Ozonschicht und damit zu einer verstärkten Einstrahlung. In der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT hingegen kommen CO₂ über die Absorption langwelliger elektromagnetischer Strahlung dämmende Eigenschaften zu, die ein Entweichen der Wärme in den Weltraum verhindern. Das die Atmosphäre vergegenständlichende Behälterschema soll von den Lerner reflektiert und der Einfluss des Behälterinhalts (CO₂) auf die Behälterwand (Atmosphäre) geklärt werden.

Zu der Leitlinie wurden folgende Lernangebote entwickelt:

CO₂ Ist Daunenfeder	Lerner sollen CO ₂ mit einer Daunenfeder vergleichen und die dämmenden Eigenschaften der klimaaktiven Gase diskutieren.
---------------------------------------	--

Treibhausexperiment (CO₂ vs. Luft)	Die Lerner sollen anhand eines mit CO ₂ und eines mit Luft gefüllten, angestrahlten Behälters erfahren, dass die Temperatur im CO ₂ -gefüllten Behälter höher ist.
Behälterwand untersuchen	Die Lerner sollen die Behälter des Treibhausexperimentes untersuchen und feststellen, dass die Wände auch nach der Erwärmung unverändert sind bzw. der oben unbedeckte Behälter gar keine solide Wand hat, die zerstört werden kann.

8.6.4 Aus Sonnenstrahlung wird Wärmestrahlung

Aus den Lernervorstellungen geht hervor, dass Lerner häufig nicht zwischen unterschiedlichen Strahlungsarten unterscheiden; so werden die Bezeichnungen *ultraviolette Strahlung*, *Sonnenstrahlung*, *Wärmestrahlung* und *Lichtstrahlung* häufig synonym genutzt. Dies führt zu einer Konfusion verschiedener atmosphärischer Phänomene, die auf unterschiedliche Strahlungsanteile zurückzuführen sind.

Dass die Unterscheidung zwischen Sonnenstrahlung in Wärmestrahlung nicht unbedingt notwendig ist, um Erwärmungsprozesse zu im Alltag zu erklären, zeigen Alltagserfahrungen mit der Sonnenstrahlung: Scheint die Sonne im Sommer, wird sie als wärmend empfunden, ohne dass die Absorption der Lichtstrahlung und die damit verbundene Umwandlung in Wärme erfahren wird.

Ziel muss es somit sein, die verschiedenen Strahlungen zu differenzieren. Dabei sollten folgende Konzepte berücksichtigt werden: (1) Die Sonne sendet (hauptsächlich) kurzwellige Strahlung zur Erde. (2) Die Erde strahlt Wärmestrahlung ins Weltall ab. (3) UV-Strahlen werden von der Ozonschicht absorbiert.

Durch die nicht vorhandene Unterscheidung zwischen den unterschiedlichen Strahlungsspektren sind für die Lerner auch Absorptions- und Emissionsprozesse als Prozesse der Umwandlung langwelliger in kurzwellige Strahlung in ihren Denkfiguren nicht notwendig. Die Umwandlung von kurzwelliger, sichtbarer Strahlung in langwellige Wärmestrahlung ist hingegen ein für den Treibhauseffekt grundlegender Prozess bei der globalen Erwärmung. Die Umwandlung kurzwelliger elektromagnetischer Strahlung in langwellige Strahlung durch Absorptions- und Emissionsprozesse ist ein wichtiger Bestandteil des Strahlungshaushalt der Erde.

Zu der Leitlinie wurden folgende Lernangebote entwickelt:

Strahlungsspektrum	Anhand eines Strahlungsspektrums werden verschiedenen Wellenlängen elektromagnetischer Strahlung unterschiedliche Eigenschaften zugeordnet.
Strahlungsspektren von Erde & Sonne	Die Lerner erkennen anhand der Strahlungsspektren von Erde und Sonne, dass die Sonne hauptsächlich Licht- und die Erde hauptsächlich Wärmestrahlung emittiert.
Treibhausexperiment (Alufolie vs. Pappe)	Die Lerner diskutieren anhand zweier mit CO ₂ gefüllter, angestrahlter Behälter, die sich durch den Bodenbelag (schwarze Pappe und Alufolie) unterscheiden, die Bedeutung der Reflexion und Absorption.
Lichtabsorption	Lerner sollen diskutieren, warum weiße Autos in der Sonne eine geringere Temperatur haben als schwarze Autos und wenden ihre Erkenntnisse auf den Klimawandel an.
Wärmeemission	Lerner erklären die nächtliche Abkühlung z. B. schwarzer Autos.

8.6.5 CO₂ ist durchlässig für Licht- und undurchlässig für Wärmestrahlung

Verschiedene atmosphärische Gase absorbieren elektromagnetische Strahlung unterschiedlicher Wellenlängen. Während die klimaaktiven Gase größtenteils transparent sind für Strahlung im sichtbaren Spektrum, absorbieren sie in unterschiedlichen Teilen des infraroten Spektrums. Zu der Leitlinie wurde folgendes Lernangebot entwickelt:

(Un)durchlässiges CO₂ Lerner erkennen anhand eines Luft- und eines CO₂-gefüllten Luftballons, dass CO₂ zwar durchlässig für Licht-, aber nicht für Wärmestrahlung ist.

8.6.6 Die Atmosphäre als Kontinuum begreifen

Die Lerner beschreiben eine atmosphärische Schicht als bedeutendes Element in der Entstehung der globalen Erwärmung. Dies lässt sich auf verschiedene Faktoren zurückführen: Zum einen werden auch in vielen wissenschaftlichen und populärwissenschaftlichen Medien sowie auch Schulbüchern die atmosphärischen Strahlungsgleichgewichte mit einem Glashauss verglichen, wobei die Wände des Glashauses mit einer atmosphärischen Treibhausgasschicht analogisiert werden. Zum anderen wird das häufig mit der globalen Erwärmung konfundierte Ozonloch auch von Wissenschaftlern als Ausdünnung einer stratosphärischen Ozonschicht verstanden. Darüber hinaus ist eine klar abgegrenzte Behälterwand, die Innen und Außen voneinander trennt, ein elementarer Bestandteil des zur Erklärung herangezogenen Behälterschemas.

Aufgabe von Lernangeboten zum Treibhauseffekt muss es somit sein, die gleichmäßige Verteilung von CO₂ in der Atmosphäre zu diskutieren und eine konzeptuelle Entwicklung von einer Treibhausgasschicht zu einer Treibhausatmosphäre zu initiieren.

Zu der Leitlinie wurden folgende Lernangebote entwickelt:

Wir leben im Himmel Anhand des Zitats »Wir leben nicht unter dem Himmel, sondern im Himmel« wird die Ausdehnung der Atmosphäre und damit der Treibhausgase diskutiert (Tyndall, 1860: zitiert nach Walker 2007) .

Vertikale CO₂-Konzentration in der Atmosphäre Anhand einer Abbildung der gleichmäßigen vertikalen Verteilung des CO₂ in der Atmosphäre werden die Konzepte Treibhausgasschicht und Treibhausatmosphäre diskutiert.

8.6.7 Den Strahlungshaushalt als Gleichgewicht begreifen

Sowohl in der populärwissenschaftlichen Darstellung des Treibhauseffekts als auch in der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT der Lerner, wird Wärmestrahlung in der Atmosphäre gefangen und am Entweichen in den Weltraum gehindert. Aus wissenschaftlicher Perspektive hingegen führt im Gleichgewicht auch die zusätzliche Absorption der Wärmestrahlung zu einer verstärkten Emission an Strahlung in den Weltraum. Das atmosphärische Strahlungsgleichgewicht verschiebt sich somit auf ein höheres Niveau. Ziel muss es also sein, eine konzeptuelle Rekonstruktion der Vorstellungen ERWÄRMUNG DURCH MEHR EINSTRAHLUNG oder ERWÄRMUNG DURCH WENIGER ABSTRAHLUNG zu ERWÄRMUNG DURCH VERSCHIEBUNG DES GLEICHGEWICHTS zu initiieren. Zu der Leitlinie wurden folgende Lernangebote entwickelt:

**Gleichgewicht im
Becherglas**

Anhand der Zu- und Abflüsse eines Becherglases, in das kontinuierlich Wasser einfließt und abfließt, wird die wissenschaftliche Vorstellung eines Fließgleichgewichts erfahrbar gemacht.

Neues Gleichgewicht

Durch Veränderung der Ausrichtung des Becherglases werden Ungleichgewichte und Gleichgewichtsverschiebungen erfahrbar gemacht. Dabei wird der Wasserstand mit der Wärme in der Atmosphäre analogisiert.

9 Evaluation der Lernangebote und Beschreibung individueller Denkpfade

Im Folgenden soll untersucht werden, welchen Einfluss die didaktisch rekonstruierten Lernangebote auf die Vorstellungen der Lerner haben. Hierzu werden Denkpfade der Lerner aus den Vermittlungsexperimenten nachgezeichnet und auf Grundlage des theoretischen Rahmens interpretativ erschlossen. Weiterhin wird geklärt, welchen Nutzen Lerner aus den Lernangeboten ziehen können. Es wird folglich auch eine Bewertung der Lernangebote vorgenommen.

9.1 Fragestellung

Die Analyse der Vermittlungsexperimente ist von folgenden Fragestellungen geleitet:

- Welche Vorstellungsentwicklungen zeigen Lerner, wenn sie mit didaktisch rekonstruierten Lernangeboten zu zentralen Aspekten des Klimawandels konfrontiert werden?
- Welche Lernangebote fördern ein fachlich angemessenes Verständnis und welche nicht?

9.2 Methodisches Vorgehen

9.2.1 Das Vermittlungsexperiment als Forschungsmethode

Um Vorstellungsveränderungen im Rahmen eines Lernangebots oder einer Sequenz von Lernangeboten zu erfassen, liegen eine Vielzahl von Methoden vor, die sich zum Großteil an Pretest-Treatment-Posttest-Designs orientieren (Bortz & Döring 2006; Fetterman 1988). Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, über das beschreibende „Ob“ einer Vorstellungsveränderung hinausgehen und Erklärungen über das „Wie“ und womöglich auch das „Warum“ zu treffen. Dafür sind Forschungsmethoden erforderlich, die den Lernprozess und nicht nur den Lernerfolg in den Blick nehmen. Ausgehend von dieser Zielstellung erscheint das Vermittlungsexperiment als adäquates Erhebungsverfahren. Das Vorgehen orientiert sich an den teaching experiments wie sie Steffe (1996) für die Untersuchung von Lernprozessen in die Mathematikdidaktik eingeführt hat und Lunetta et al. (1993) sowie Riemeier (2005) für die naturwissenschaftsdidaktische Forschung adaptiert haben. Das Vermittlungsexperiment besteht dabei aus einem Wechsel von Interviewphasen und Interventionsphasen. Die an das klinische Interview Piagets angelehnten Interviewphasen dienen der Erhebung von Vorstellungen (Ault 1983; Piaget 1930), während die Interventionsphasen auf eine Veränderung von Vorstellungen abzielen. Dazu werden die Lerner mit erklärungsbedürftigen Experimenten und Phänomenen konfrontiert. Dies ermöglicht auf der einen Seite das Erfassen von Lernervorstellungen sowie auf der anderen Seite die Evaluation der didaktisch rekonstruierten Lernangebote. Damit ist das Vermittlungsexperiment Komorek und Duit (2004) zufolge eine geeignete Untersuchungsmethode für empirische Erhebungen im Rahmen des Modells der Didaktischen Rekonstruktion. Von Glasersfeld (2008) bezeichnet das Vermittlungsexperiment darüber hinaus als die konsequente Anwendung der Erkenntnisse des Konstruktivismus in der fachdidaktischen Forschung.

Neben didaktisch rekonstruierten Lernangeboten kommen im Vermittlungsexperiment auch spontane Interventionen durch den Versuchsleiter zum Tragen. Der Versuchsleiter ist somit gleichzeitig „Interviewer und Lehrer“ (Wilbers & Duit 2001). Während der Versuchsleiter als Interviewer die individuellen Lernervorstellungen zu erfassen versucht, muss er in der Rolle des Lehrers die Lernervorstellungen deuten und der Lerngruppe ihren Vorstellungen entsprechend adäquate Lernangebote präsentieren. Dies ist dem Anspruch geschuldet, im Vermittlungsexperiment eine möglichst große Unterrichtsnähe und damit eine mögliche Übertragbarkeit der Ergebnisse in den Schulunterricht zu realisieren. Durch den Wechsel zwischen geplanten und spontanen, der Situation angemessenen Interventionen können entwickelte Ideen, Erklärungsansätze oder Verständnisschwierigkeiten der Lerner vertieft werden (Riemeier 2005, S. 147). Im Vermittlungsexperiment wird damit eine Balance zwischen einer Unterrichts- und Laborsituation angestrebt, in der der Versuchsleiter nur an den Stellen eingreift, in denen Arbeitsaufträge formuliert oder vertiefend nach Lernervorstellungen oder Verständnisschwierigkeiten gefragt werden müssen (Riemeier 2005, S. 148).

In der vorliegenden Untersuchung wurden für die Vermittlungsexperimente Gruppendesigns mit zwei bis drei Lernern gewählt. Die dadurch ermöglichten Interaktionen zwischen den Lernern schaffen eine Lernsituation, in der sich der Versuchsleiter stärker zurücknehmen kann und ihnen damit Raum zur Konstruktion von Vorstellungen eröffnet. Das Kleingruppendesign ermöglicht so im Gegensatz zur Klassensituation überschaubare Kommunikationswege: Die Interaktionen zwischen den Probanden bleiben aufgrund der geringen Anzahl der Kommunikationspartner nachvollziehbar und damit für die Datenauswertung zugänglich und ermöglichen trotzdem ein unterrichtsnahes Setting (Komorek & Duit 2004). Obwohl die Auswertung der Vermittlungsexperimente auf eine Rekonstruktion individueller Vorstellungen abzielt, schränken die Gruppensettings die Auswertbarkeit nicht ein: Auch wenn Lernen in der Regel in sozialen Kontexten stattfindet und Bedeutungen sozial ausgehandelt werden (vgl. Gerstenmeier & Mandl 1995), ist die Entwicklung von Vorstellungen in letzter Konsequenz ein individueller Prozess (vgl. Kapitel 2.1).

In den Vermittlungsexperimenten werden somit neben didaktisch rekonstruierten Lernangeboten auch spontane Interventionen des Versuchsleiters und der Gruppenmitglieder analysiert. Die Lernangebote sind unterschiedlich komplex und können von einer einfachen Aufforderung zur Reflexion einer Vorstellung bis hin zu einem mehrteiligen Experiment reichen. Die spontanen Interventionen der Lerner bzw. des Versuchsleiters sind in der Regel einfacher strukturiert, wie z. B. Aufforderungen seitens des Versuchsleiters etwas zu beschreiben oder Äußerungen der Lerner untereinander, wie „*Nein, so kann das nicht sein*“. Die Vermittlungsexperimente in der vorliegenden Studie bestanden aus einer einmaligen Sitzung von ca. 75 bis 110 Minuten.

9.2.2 Durchführung der Vermittlungsexperimente

Die Vermittlungsexperimente wurden in Räumen der Leibniz Universität Hannover durchgeführt und videographiert. In einem Begrüßungsgespräch in informeller Atmosphäre wurde ein Überblick über die Auswertung und Verwendung der Daten und der Anonymisierung gegeben. Darüber hinaus erhielten die Lerner die Gelegenheit Alias-Namen für die Anonymisierung zu wählen. Das Mikrofon und die Videokamera wurden überprüft und aktiviert. So sollte schon vor Beginn des eigentlichen Vermittlungsexperiments eine Gewöhnung an die Situation ermöglicht werden. Anschließend wurden die Lerner noch einmal über den Verlauf des Vermittlungsexperiments, ihre Rolle und die des Versuchsleiters sowie das Ziel der Studie informiert. Es wurde deutlich gemacht, dass es in dem Vermittlungsexperiment um die Erhebung der Vorstellungen der Lerner gehe und es dabei kein „richtig“ oder „falsch“ gäbe, die Lerner sich somit frei äußern könnten. Darüber hinaus wurde verdeutlicht, dass der Versuchsleiter nur in das Gespräch eingreifen würde, um Äußerungen vertiefend zu verstehen oder weitere Lernangebote in die Gruppe einzubringen.

Die Lernangebote wurden jeweils in Form von Infokarten, Diagrammen etc. in die Lernergruppen gereicht. Lernangebote in Form von Experimenten wurden durch den Versuchsleiter vorbereitet und die Lerner vor Start des Experiments aufgefordert den Aufbau zu beschreiben. Alle Lernangebote waren mit schriftlichen Arbeitsaufträgen versehen. Dadurch konnte einerseits eine Standardisierung des Vermittlungsexperiments und damit eine für die Forschungsfrage notwendige Vergleichbarkeit erreicht werden. Andererseits konnte die für eine Unterrichtssituation notwendige offene Gesprächssituation geschaffen werden.

Während der Vermittlungsexperimente wurde den Lernern die Möglichkeit gegeben, ihre Vorstellungen offen und uneingeschränkt zu äußern. Wenn die Lerner dabei vom eigentlichen Untersuchungsgegenstand abwichen, wurden die Diskussionen eine Zeit lang laufen gelassen und schließlich durch Interventionen des Versuchsleiters oder weitere Lernangebote auf den Untersuchungsgegenstand zurückgeführt.

Das Vermittlungsexperiment bietet über die Analyse der Lernfortschritte hinaus die Möglichkeit einer prozessorientierten Weiterentwicklung der Lernangebote: So wurden Lernangebote, die nicht die erwartete Vorstellungsveränderung initiierten, modifiziert oder aber um spontane Interventionen des Versuchsleiters ergänzt. Die Ergänzungen bzw. Modifikationen werden in der Auswertung der Lernangebote dargestellt und auf ihre Wirkung hin analysiert. Stärke und Ziel des Vermittlungsexperiments aus konstruktivistischer Perspektive ist der Einsatz von Lernangeboten, die zu den individuell geäußerten Lernervorstellungen passen. Insofern richtete sich der Einsatz und die Reihenfolge der Lernangebote nach den von den Lernern geäußerten Vorstellungen – d. h. nicht in jedem Vermittlungsexperiment wurden alle Lernangebote eingesetzt. Die Vermittlungsexperimente waren somit flexibel auf die Lerner und ihre Vorstellungen angepasst und gaben keine feste Zeiteinteilung bzw. keine feste Abfolge vor.

Die Vermittlungsexperimente wurden mithilfe einer Videokamera digital aufgezeichnet. Die Datenaufnahme mit Videoaufzeichnung hat gegenüber einer reinen Tonaufnahme den Vorteil der eindeutigen Sprecheridentifizierung in Gruppensituationen. Darüber hinaus können die Handlungen der Lerner in der Arbeit mit Modellen und Experimenten im Bild besser nachvollzogen werden. Zur ergänzenden Interpretation uneindeutiger Textpassagen, bietet das Bildmaterial die Möglichkeit, nonverbale Kommunikationselemente wie Haltung, Gestik und Mimik zu berücksichtigen. Die Videokamera wurde an einer unaufdringlichen Stelle positioniert. Der Bildausschnitt erfasste die Lerner und den vor ihnen stehenden Tisch mit den Experimenten und Modellen während des Vermittlungsexperiments.

9.2.3 Phasen des Vermittlungsexperiments

Die Vermittlungsexperimente in dieser Studie bestanden aus einem Wechsel von Interview- und Interventionsphasen. Alle Vermittlungsexperimente begannen mit einem standardisierten Einstiegsimpuls: *„In den Medien liest man in letzter Zeit immer vom Klimawandel. Beschreibt einmal, was euch dazu einfällt.“* Dieser Impuls diente der Eröffnung und animierte die Lerner zu breit gefächerten Antworten. Durch die Gruppensituation gerieten die Lerner untereinander in eine Diskussionssituation. So hatte der Versuchsleiter die Möglichkeit, sich einen Überblick über die Vorstellungen der Lerner zu verschaffen. Dabei wurden gegebenenfalls weitere, tentative Impulse gesetzt (*„Du hast gesagt... Beschreib doch mal, was du damit meinst.“*). Dies diente der späteren Analyse der Lernervorstellungen zu Beginn des Vermittlungsexperiments (Auswertung in Kapitel 9).

Abhängig von den im Anfangsinterview genannten Vorstellungen wurden schließlich Lernangebote zu den Ursachen des Klimawandels (Kohlenstoffkreislauf) oder den Mechanismen des Klimawandels (Treibhauseffekt) präsentiert. Der Einsatz der Lernangebote orientierte sich an den von den Lernern präsentierten Vorstellungen. Dabei waren die Lerner in jedem Lernangebot zur Beschreibung und Erklärung der Beobachtungen bzw. ihrer Modellierungen aufgefordert. So

konnte die Rekonstruktion der Vorstellungen mitverfolgt und weitere, den neu entwickelten Vorstellungen oder kognitiven Konflikten angemessene Lernangebote eingesetzt werden. Am Ende des Vermittlungsexperiments wurden die Lerner aufgefordert, die im Vermittlungsexperiment entwickelten Vorstellungen gegenüber ihrer Eingangsvorstellung zu reflektieren.

9.2.4 Auswertung der Vermittlungsexperimente

Die Lernangebote wurden in der vorliegenden Interventionsstudie erprobt und mittels der qualitativen Inhaltsanalyse und der Metaphernanalyse (vgl. Kapitel 6.2 und 7.2) ausgewertet. Die Vorstellungsentwicklungen, die sich mit diesen Lernangeboten ergaben, werden zu individuellen Denkpfaden zusammengefasst (vgl. Riemeier 2005), wodurch letztlich Aussagen zur Wirkung der Lernangebote getroffen werden können. Die Denkpfade der Lerner können dabei die Grundlage einer evidenzbasierten Entwicklung von learning trajectories bilden. Learning trajectories sind eine der Mathematikdidaktik entstammende Methode, mit der der Lernweg von aktuellen, tatsächlichen Vorstellungen und Fertigkeiten eines Lerners oder einer Lerngruppe zum angestrebten Lernziel beschrieben wird (Lamberg & Middleton 2009; Mousley et al. 2004). Sie stellen somit vom Lehrenden geplante und antizipierte Lernwege dar.

Die Denkpfade in dieser Studie beschreiben individuelle Veränderungen von Vorstellungen während einzelner Lernangebote oder auch über den Zeitraum des gesamten Vermittlungsexperiments hinweg. Die Konzepte der Lerner sind dabei als Stationen auf diesem Denkpfad dargestellt. Die Vorstellungsentwicklungen von einem Konzept zu einem anderen, stellen einzelne Etappen dar, wobei die Lernangebote und spontanen Interventionen, die zu diesen Vorstellungsentwicklungen führen, dokumentiert sind. Die Vorstellungen vor dem Einsatz der Lernangebote stellen den Start und diejenigen nach dem Einsatz das Ende der beobachteten Vorstellungsentwicklung dar.

Innerhalb der Vermittlungsexperimente zeigt sich, dass verschiedene Lerner nicht selten gleiche oder ähnliche Vorstellungen entwickeln. In dieser Studie werden die Entwicklungen ausgewählter Fallbeispiele dargestellt. Die Auswahl der Beispiele orientiert sich am Prinzip der Maximierung der Varianz. Es werden somit möglichst unterschiedliche Denkpfade aufgezeigt. Zur Dokumentation wird auf die redigierten Aussagen der Lerner zurückgegriffen. Aufgenommen werden dabei zentrale Aussagen. Wiederholungen und Redundanzen werden ausgelassen, ebenso wie spontane Interventionen der Gruppenmitglieder, die nicht zu einer Vorstellungsentwicklung führen.

Die Erarbeitung der Denkpfade zum Treibhauseffekt und Kohlenstoffkreislauf unterscheidet sich, da die einzelnen Lernangebote zum Kohlenstoffkreislauf für sich allein stehen können, während die Lernangebote zum Treibhauseffekt aufeinander aufbauen.

9.3 Lernangebote zum Kohlenstoffkreislauf

Lerner wie Wissenschaftler greifen zur Erklärung des abstrakten Zielbereichs *Kohlenstoffkreislauf* auf die gleichen Quellbereiche (z. B. Speicher-Fluss-Schema, Natürlich-Künstlich-Schema, Gleichgewichtsschema) zurück. Verschiedenheiten zeigen sich dabei in der meist weniger differenzierten Übertragung der Schemata auf den Zielbereich Kohlenstoffkreislauf durch die Lerner (vgl. Kapitel 8.3). Ziel der Lernangebote zum Kohlenstoffkreislauf ist es somit nicht unbedingt, den Lernern neue Quellbereiche als Grundlage zum Verstehen des Kohlenstoffkreislaufs anzubieten. Vielmehr könnte auch durch eine Reflexion der genutzten Schemata eine fachlich angemessene Vorstellung erreicht werden. Entsprechend liegt der Schwerpunkt in der Analyse der Denkpfade zum Kohlenstoffkreislauf auf den dem Verstehen zugrunde liegenden Schemata.

Die Denkpfade sind in zwei Dimensionen aufgelöst: Zum einen ist die Konzeptentwicklung im Verlauf der Vermittlungsexperimente, also nach relativer Zeit, dargestellt. Es erfolgt keine Auflösung nach absoluten Zeiteinheiten, da dies keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn verspricht. Zusätzlich sind die Vorstellungen von den Lernern nach ihrer fachlichen Angemessenheit aufgelöst. Auch dabei handelt es sich um eine relative Zuordnung. Ist ein Konzept höher angeordnet als ein voriges, bedeutet dies, dass es als fachlich angemessener bewertet wird. Im Gegensatz zu Riemeier, die die Vorstellungen nach den Kategorien »lebensweltlich« und »wissenschaftlich« auflöst, findet hier eine Einordnung nach »fachlicher Angemessenheit« statt, da es sich auch bei den weniger angemessenen Vorstellungen nicht um lebensweltliche Vorstellungen handelt, sondern um wissenschaftlich nicht angemessenen Vorstellungen.

Den analysierten Lernangeboten vorausgegangen ist das vorbereitende Lernangebot „KOHLENstoffe“ (vgl. Kapitel 8.4.2), in dem die Lerner verschiedene Kohlenstoff enthaltende Gegenstände nach ihrem räumlichen Vorkommen auf der Erde kategorisierten und bezeichneten (z. B. Atmosphäre, Lebewesen etc.). Die Kategorien wurden schließlich explizit als *Kohlenstoffspeicher* bezeichnet. Damit wurde das von den Lernern implizit genutzte Speicher-Fluss-Schema (vgl. Kapitel 7.3.5) explizit gemacht.

9.3.1 Der Kohlenstoffkreislauf im Speicher-Fluss-Modell

Im Folgenden soll untersucht werden, welche Vorstellungsentwicklungen bei Lernern durch die Explikation des Behälterschemas und die Arbeit mit einem Speicher-Fluss-Modell stattfinden. Die Zitate sind dabei den Interviewphasen zu Beginn der Vermittlungsexperimente und den Interventionsphasen während der Arbeit mit dem Speicher-Fluss-Modell entnommen.

Das Lernangebot bestand aus einer Kombination verschiedener Interventionen, die den Lernern ein fachlich angemessenes Verständnis der Vorgänge beim Klimawandel ermöglichen sollen. Dabei haben sich die Lerner anhand einer Infokarte zu den globalen Kohlenstoffflüssen (Kasten 9.1) ohne und mit Einfluss des Menschen auseinandergesetzt und die Flüsse in einem Speicher-Fluss-Modell umgesetzt. Die diesen Abschnitt leitenden Forschungsfragen lauten:

- Mit welchen Kohlenstoffspeichern und -flüssen argumentieren die Lerner den Klimawandel vor und nach der Arbeit mit dem Speicher-Fluss-Modell?

Infokarte Kohlenstoffkreislauf

(1) In den Speichern vorhandener Kohlenstoff

Landlebewesen	Atmosphäre	Ozeane	Fossile Sedimente	
2.500 Gt	750 Gt	38.000 Gt	10.000 Gt	1 Gigatonne (Gt) = 10 ¹⁵ g

(2) Der natürliche Kohlenstoffkreislauf

Etwa 90 Gt Kohlenstoff werden jedes Jahr aus dem Ozean in die Atmosphäre freigesetzt und die gleiche Menge wieder gebunden. Die Kohlenstoffaufnahme der Landökosysteme ist geleitet durch die Fotosynthese: Etwa 120 Gt Kohlenstoff werden jedes Jahr aus der Atmosphäre aufgenommen und in der Vegetation gespeichert. Davon werden ca. 60 Gt wieder durch Atmung freigesetzt, während 60 Gt in Organismen gespeichert werden. Sterben diese Organismen ab, werden sie von den Zersettern abgebaut und die in ihnen gespeicherten 60 Gt Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre freigesetzt.

(3) Der veränderte Kohlenstoffkreislauf

Durch die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs werden jedes Jahr etwa 6,5 Gt in die Atmosphäre freigesetzt. Durch eine Veränderung in der Nutzung von Land, z. B. durch die Abholzung von Wäldern werden weitere 1,6 Gt Kohlenstoff aus der Vegetation in die Atmosphäre freigesetzt.

Die Lerner bekamen Text (1) und (2) zu lesen. Außerdem bekamen sie ein Speicher-Fluss-Modell aus verschiedenen Behältern und Styroporkugeln (siehe Abbildung 9.1). Anschließend wurden die Lerner aufgefordert, die Beträge des gespeicherten Kohlenstoffs und die Flussraten am Modell nachzustellen. Nach der Arbeit am Modell bekamen die Lerner Text (3), der ebenfalls von den Lernern im Modell nachgestellt werden sollte.



Im Anschluss an die Modellierungen wurden die Lerner aufgefordert, die Ursache des Klimawandels am Modell zu erläutern. Erwartet wurde die Erklärung des Klimawandels auf Grundlage veränderter Kohlenstoffflüsse, die zu einer Verlagerung von Kohlenstoff aus den Behältern *Fossile Energieträger* und *Landlebewesen* in den Behälter *Atmosphäre* führen. Die Flussraten zwischen *Ozeanen* und *Atmosphäre* sollen als ausgeglichen erkannt werden. Damit sollte deutlich werden, dass nicht die Größe, sondern die Bilanz der Kohlenstoffflüsse entscheidend ist. Es werden die Vorstellungen *Natürlicher Kohlenstoffkreislauf ist ausgeglichen* und *Ungleichgewicht durch Verbrennung und Abholzung angestrebt*.

Kasten 9.1: Infokarte Kohlenstoffkreislauf

Beispiel I: Von Künstlichem CO₂ zu Anthropogenes Ungleichgewicht

Interview zu Beginn des Vermittlungsexperiments (Z. 24-46; 71-73; 145-159)

Tina: „Den CO₂-Ausstoß kann man nicht auf Null reduzieren. So ein bisschen schon, aber ich glaube nicht, dass alle da irgendwie so umstellen können, mit so viel Industrialisierung. Wenn man komplett auf erneuerbare Energien umstellen würde, würde es gehen.“

Marie: „Aber es gab doch schon immer CO₂, auch schon vor den Menschen.“

Tina: „Stimmt. Man kann es immer nur verringern und nicht ganz abstellen. Das natürliche bleibt doch und macht den natürlichen Treibhauseffekt. Aber das anthropogene CO₂ würde dann weg sein. [...] Das künstliche CO₂ kann man verringern, aber es ist schlimmer und hat mehr Wirkung als das natürliche.“

Während der Arbeit am Modell (Z. 1056-1064, 1080-1175)

Laura: „Größtenteils kommt der Kohlenstoff aus dem Ozean.“

Tina: „Wenn der Ozean verantwortlich ist, dürften die Abholzung und die Verbrennung nicht so große Auswirkungen haben. [...] Im Ozean geht das raus in die Atmosphäre, aber auch wieder rein in den Ozean, obwohl da viel drin ist.“ [...]

Interviewer: „Stellt die Kohlenstoffflüsse im Modell nach.“

Tina: „Der Kohlenstoff aus den Lebewesen kommt mit der Atmung raus in die Atmosphäre. Eigentlich gibt es einen normalen, ausgeglichenen Ablauf, der immer konstant ist, wenn man Abholzung und Verbrennung weglässt. Durch die Abholzung gelangt mehr CO₂ in die Atmosphäre. Durch die Abholzung gibt es weniger Bäume, weniger Fotosynthese. Und das, was dann runterkommt, ist weniger, also nur ein Kohlenstoffteilchen anstatt zwei und das kommt da wieder rein. Es geht mehr Kohlenstoff nach oben als durch die Fotosynthese nach unten. Der Kohlenstoff von der Abholzung bleibt dann oben, weil er nicht mehr nach unten kann. Und das ist bei der Verbrennung fossilen Kohlenstoffs auch so.“

Tina äußert zu Beginn die Denkfigur KÜNSTLICHES CO₂, in der CO₂ ausschließlich durch die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs entsteht und mit einer Nutzung von erneuerbaren Energien der CO₂-Ausstoß auf Null reduziert werden kann. Doch schon eine spontane Intervention Maries lässt Tina von der Vorstellung Abstand nehmen und die Denkfigur KÜNSTLICHES UND NATÜRLICHES CO₂ formulieren.

Nach dem Lesen der Infokarte zum Kohlenstoffkreislauf entgegnet sie ihrer Interviewpartnerin Laura, dass zwischen Ozean und Atmosphäre ein ausgeglichener Fluss bestehe und trotz des großen Speichers und des großen Flusses die Kohlenstoffmenge im Ozean gleich bleibe. In ihrer Vorstellung sind also die Flussraten und nicht die gespeicherten Kohlenstoffmassen für den Klimawandel entscheidend.

Sie greift auf Informationen aus der Infokarte zurück und erklärt die *Abholzung* und die *Verbrennung* als Ursachen des zusätzlichen atmosphärischen Kohlenstoffs.

Nach der Arbeit mit dem Speicher-Fluss-Modell beschreibt Tina den Kohlenstoffkreislauf mithilfe des Speicher-Fluss-Schemas: Die Flüsse von den *Lebewesen* durch die *Landnutzung* und vom *Fossilen Kohlenstoff* durch die *Verbrennung* in die *Atmosphäre* werden als Ursache des Klimawandels beschrieben. Das Speicher-Fluss-Modell hilft ihr bei der Beschreibung des zum Klimawandel führenden Ungleichgewichts im Kohlenstoffkreislauf. In Bezug auf die *Abholzung* beschreibt sie nicht nur einen *verstärkten Fluss* von den *Lebewesen* in die *Atmosphäre*, sondern auch einen *verringerten Rückfluss* durch weniger Pflanzen.

Abschließend äußert Tina eine auf der Argumentation mit dem Gleichgewichtsschema basierende, fachlich angemessene Vorstellung zu den Ursachen des Klimawandels: Die Behälter *Lebewesen* und *Fossiler Kohlenstoff* verlieren Kohlenstoff an die *Atmosphäre*, während die *Ozeane* konstant gefüllt bleiben. Um den Klimawandel zu verhindern, bedarf es ihrer Vorstellung nach der Stoppung der zusätzlichen Kohlenstoffflüsse und der Rückführung des Kohlenstoffs in seine ursprünglichen Speicher, also eine Rückkehr zum vorindustriellen Kohlenstoffkreislauf.

Tina wechselt in ihrer Beschreibung des Kohlenstoffkreislaufs wiederholt von der Modellebene auf die Wirklichkeitsebene: Im Lernangebot stehen die Kohlenstoffbehälter nebeneinander auf dem Tisch. Trotzdem spricht Tina von „*CO₂ geht hoch in die Atmosphäre*“ oder „*CO₂ kommt durch die Fotosynthese nach unten*“. Sie überträgt die Oben-Unten-Relation der Wirklichkeit auf die Modellsituation in der Ebene des Tisches.

Zusammenfassend zeigt sich bei Tina eine konzeptuelle Entwicklung von der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH KÜNSTLICHES CO₂ hin zu ERWÄRMUNG DURCH UNGLEICHGEWICHT. Dabei entwickelt sie im Laufe des Lernangebots eine reflektierte Gleichgewichtsvorstellung, indem sie einzelne Flüsse aus Perspektive des Gleichgewichts betrachtet.

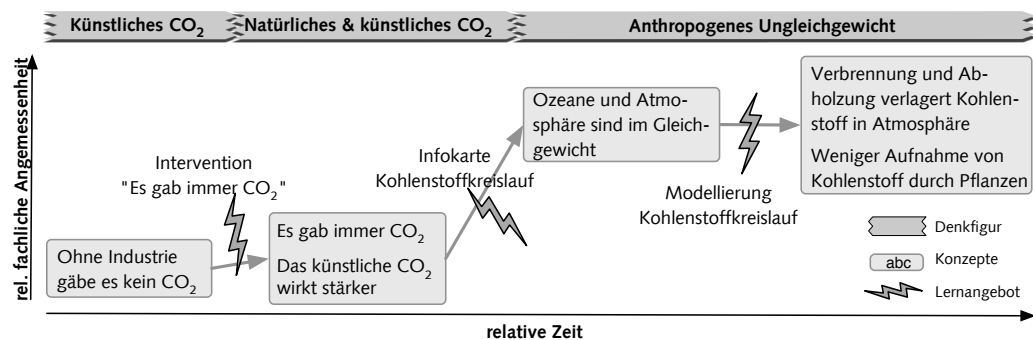


Abbildung 9.2: Tinas Denkpfad zum Speicher-Fluss-Modell im Kohlenstoffkreislauf

Beispiel II: Von Natürliches & Künstliches CO₂ zu Anthropogenes Ungleichgewicht

Interview zu Beginn des Vermittlungsexperiments (Z. 172-173, 201-206)

Fritz: „Es gibt einen Unterschied zwischen dem CO₂ aus der Verbrennung von Öl und aus der Atmung. [...] Vielleicht ist das eine radioaktiv? ¹⁴C-Atome und ¹⁶C-Atome sind auch unterschiedlich.“

Darstellung der Kohlenstoffflüsse im Speicher-Fluss-Modell (Z. 804-822, 925-987)

Fritz: „Das Problem ist, dass die Kohlenstoffatome aus dem fossilen Kohlenstoff in den Behälter Atmosphäre fließen. Wenn das nicht passieren würde, gäbe es auch keinen Klimawandel. Wenn der Kohlenstoff irgendwo fest ist, gelagert ist, hat er keine Auswirkung. Aber als Gas in der Atmosphäre hat er Auswirkungen. [...]“

Interviewer: Beschreibt am Modell, welcher Teil des Kohlenstoffkreislauf im Gleichgewicht und Ungleichgewicht ist.

Fritz: [stellt Kohlenstoffflüsse im Modell dar] Der Kohlenstofffluss zwischen Atmosphäre und Ozeanen befindet sich im Gleichgewicht. Die Atmung und Fotosynthese auch. Das heißt, wir haben nur durch die Landnutzung und die Verbrennung ein Ungleichgewicht.

Fritz beschreibt zu Beginn des Vermittlungsexperiments die Ursachen des Klimawandels mithilfe der Denkfigur KÜNSTLICHES UND NATÜRLICHES KOHLENSTOFFDIOXID. Nach Lesen des Infotexts beschreibt er die Verlagerung von Kohlenstoff in die Atmosphäre als ursächlich für den Klimawandel. Dabei rekurriert er auf das Konzept *Verbrennen Ist Umwandeln* zur Beschreibung der Umwandlung eines festen in einen gasförmigen Stoff als Ursache des Klimawandels. Es lassen sich dabei die Konzepte *Fester Kohlenstoff führt nicht zum Klimawandel* und *Gasförmiger Kohlenstoff führt zum Klimawandel* finden. Nach der Aufforderung zur Modellierung beschreibt er ein Gleichgewicht in den Raten der Kohlenstoffflüsse zwischen Atmosphäre und Lebewesen sowie der Atmosphäre und den Ozeanen: *Ausgeglichener Kohlenstofffluss zwischen Atmosphäre und Ozean* und *Ausgeglichener Kohlenstofffluss zwischen Atmosphäre und Lebewesen*. Ungleichgewichte im Kohlenstoffkreislauf führt er auf die *Verbrennung* und *Landnutzung* zurück.

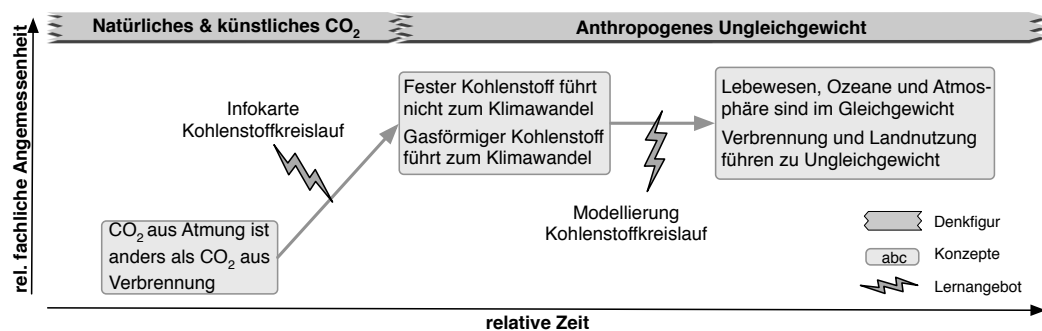


Abbildung 9.3: Fritz' Denkfad zum Speicher-Fluss-Modell im Kohlenstoffkreislauf

Beispiel III: Elaborierung der Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT**Interview zu Beginn des Vermittlungsexperiments (Z. 13-23)**

Laura: „CO₂ ist zwar nicht gut, es bringt Schaden fürs Klima. Aber ohne es würde das Klima nicht so sein, wie es ist. In Maßen braucht man CO₂. Es muss ein Kreislauf sein, in dem das CO₂ weiterverarbeitet wird. Wir können vielleicht den CO₂-Ausstoß von den Autos verringern, aber Lebewesen produzieren auch CO₂.“

Während der Arbeit am Modell (Z. 1056-1060, 1084-1136, 1212-1216, 1255-1261)

Laura: „Größtenteils kommt der Klimawandel vom Ozean und vom fossilen Kohlenstoff. Im Ozean ist viel drin und fließt viel raus.“ [...]“

Interviewer: „Stellt die Kohlenstoffflüsse im Modell nach.“

Laura: „Wenn zwei Kohlenstoffteilchen aus dem Ozean in die Atmosphäre raus gehen, gehen auch zwei wieder rein. Der Klimawandel ist also nicht vom Ozean abhängig. Bei der Verbrennung fossilen Kohlenstoffs gehen drei Kohlenstoffteilchen raus aus dem fossilen

Zusammenfassung

Zusammenfassend lassen sich folgende Befunde beschreiben:

- **Die Arbeit am Modell hilft, das Speicher-Fluss-Schema zu reflektieren.** Die Lerner greifen durchgehend auf das Speicher-Fluss-Schema zurück, um den Kohlenstoffkreislauf zu erklären. Die Explikation des Schemas am Modell hilft ihnen, die Elemente des Schemas (Speicher, Fluss, Ursache des Flusses) voneinander zu scheiden. So ist es ihnen möglich, die Ursachen des Klimawandels fachlich angemessener zu verstehen und z. B. das Gleichgewichtsschema zum Verstehen des Klimawandels in Anwendung zu bringen. Den Lernern gelingt die Unterscheidung zwischen Modell (Speicher-Fluss-Modell zum Kohlenstoffkreislauf) und Original (Planet Erde) unterschiedlich gut. Während der Arbeit mit dem Speicher-Fluss-Modell argumentieren sie meist auf Ebene des Modells, indem sie einzelne Kugeln als Kohlenstoffteilchen abzählen und zwischen den Behältern hin und her reichen. Gleichzeitig können sie dabei zum Teil Rückschlüsse auf das Original ziehen, wenn sie in ihrer Argumentation z. B. von den in einer Ebene stehenden Behältern auf das Original wechseln.
- **Das Lernangebot führt zu komplexeren Vorstellungen vom Kohlenstoffkreislauf.** Zu Beginn der Vermittlungsexperimente wurde mit den Denkfiguren KÜNSTLICHES CO₂, NATÜRLICHES UND KÜNSTLICHES CO₂ und ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT argumentiert. Dabei wurde in der Argumentation der Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT hauptsächlich die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs betrachtet. Bei der Arbeit mit dem Speicher-Fluss-Modell weitete sich die Argumentation auf weitere Flüsse und Behälter aus: Die Lerner beschreiben eine zunehmende Kohlenstoffmenge in der Atmosphäre durch die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs und eine Zunahme der Flüsse von den Lebewesen in die Atmosphäre durch die Abholzung. Tina argumentiert zusätzlich, dass auch der Rückfluss von der *Atmosphäre* in den Behälter *Lebewesen* vermindert sei, da es weniger Pflanzen gebe, wenn man sie abholzt. Durch die Lernangebote haben die Lerner ihre Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf außerdem um den Behälter *Ozeane* ausweiten können. Die Arbeit am Modell half darüber hinaus, die beim Lesen der Infokarte entstehenden Unklarheiten zu rekonstruieren.
- **Entwicklung und Rekonstruktion von fachlich nicht angemessenen Vorstellungen im Lernangebot.** Im Lernangebot konnten zwei neue Vorstellungen gefunden werden: *Großes hat große Bedeutung* und *Ausgeglichene Speicher durch ausgeglichene Flüsse*. Der große Kohlenstoffspeicher Ozean mitsamt seinen großen Flussraten in Richtung Atmosphäre und zurück führt bei einigen Lernern zu Verständnisschwierigkeiten. Bei Laura fällt auf, dass sie nach Lesen des Informationstextes den Ozean als größten Kohlenstoffspeicher für den Klimawandel verantwortlich macht, dies aber nach der Modellierung wieder ablehnt. Die Vorstellung *Ausgeglichene Speicher durch ausgeglichene Flüsse* trat nur bei einer Lernerin auf. Hier ist in weiteren Untersuchungen zu prüfen, ob diese Vorstellung mit weiteren Interventionen verändert werden kann.
- **Begrenztheit des Modells führt zu fachlich nicht angemessenen Vorstellungen.** Auch nach der Arbeit mit dem Speicher-Fluss-Modell haben mehrere Lerner Schwierigkeiten, die ausgeglichenen Raten der Kohlenstoffflüsse zwischen Atmosphäre und Ozeanen als nicht bedeutsam für den Klimawandel zu identifizieren. Laura beschreibt eine Zerstörung des Kohlenstoffspeichers Ozean als Folge des Klimawandels. Dies ist vermutlich auf eine Begrenztheit des Modells zurückzuführen: Der den Ozean symbolisierende Behälter war schon zu Beginn bis zum Rand mit Styroporkugeln gefüllt. Eine zusätzliche Füllung des Behälters hätte zu einem Überlaufen im Modell geführt. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass hier nicht stark genug zwischen Modell und Wirklichkeit unterschieden wurde. An dieser Stelle wäre eine eingehendere Modellkritik mit den Lernern notwendig.

9.3.2 Das Natürlich-Künstlich-Schema im Speicher-Fluss-Modell

Der Leitlinie Reflexion des Natürlich-Künstlich-Schemas folgend, sollen die Lerner ihre Zuschreibungen von künstlich und natürlich zu einzelnen Elementen des Kohlenstoffkreislaufs anhand des Speicher-Fluss-Modells reflektieren. Zu Beginn des Vermittlungsexperiments wurden die Lerner mit einem Zitat aus der Interviewstudie konfrontiert, um ihre Vorstellungen zu erfassen:

„Es ist das künstliche CO₂ aus der Verbrennung, das die globale Erwärmung verursacht, nicht das natürliche. Das natürliche CO₂ aus der Atmung kann wieder gebunden werden, das künstliche nicht.“

Kasten 9.2: Zitat künstliches vs. natürliches CO₂

Lerner, die dem Zitat zustimmten bekamen zusätzlich das Lernangebot „Geschichte eines Kohlenstoffteilchens“.

Geschichte eines Kohlenstoffteilchens:

Die Geschichte eines Kohlenstoffteilchens ist Primo Levi (1987) entlehnt, der in einem narrativen Kontext ein Kohlenstoffteilchen auf seinem Weg durch den Kohlenstoffkreislauf verfolgt: *„Unser Held ist ein kleines Kohlenstoffteilchen, das seit Milliarden von Jahren existiert. Es sitzt seit etwa 200 Millionen Jahren an drei Sauerstoffatome und ein Calciumatom gebunden in einer Muschelschale am Meeresboden fest...“* Die vollständige Geschichte ist in Niebert (2009a) veröffentlicht.

Die Lerner sollen die Flüsse des Kohlenstoffteilchens schließlich im Speicher-Fluss-Modell (vgl. Abbildung in Kasten 9.1) nachvollziehen. Anschließend werden die Lerner aufgefordert die Begriffe „künstlich“ und „natürlich“ anhand des Modells zu explizieren.

Das Lernangebot soll folgende Vorstellungen fördern: *Kohlenstoff ist natürlicher Bestandteil der Atmosphäre und CO₂ aus der Verbrennung und der Atmung werden gleichermaßen gebunden.* Dabei soll eine Rekonstruktion der Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas von den Teilchen („künstliches CO₂“) auf den Fluss des Kohlenstoffs („Verbrennung ist künstlich“) erfolgen.

Kasten 9.3: Kurzdarstellung der Geschichte eines Kohlenstoffteilchens

In der Analyse der Lernervorstellungen zeigt sich, dass Lerner und Wissenschaftler das Natürlich-Künstlich-Schema unterschiedlich reflektiert nutzen, um verschiedene Aspekte des Kohlenstoffkreislaufs zu beschreiben (z. B. *künstliches CO₂, künstliche CO₂-Freisetzung*). Die Fragestellung unter der die Lernangebote ausgewertet werden, lautet deshalb

- Wie wenden Lerner im Verlauf des Lernangebots das Natürlich-Künstlich-Schema auf den Kohlenstoffkreislauf an?

Beispiel I: Von künstlichem Stoff über künstliche Ursache zu künstlichem Prozess

Interview vor Einführung des Behälterschemas (Z. 187-197)

Gustav: Ich denke schon, dass es eine Tatsache ist, dass das CO₂ durch die Verbrennung strukturell verändert ist, wodurch es nicht mehr wie bei der Atmung gebunden werden kann.

Phillip: Dann wäre es doch immer noch CO₂.

Gustav: Aber es kann doch durch die Verbrennung eine andere Struktur haben.

Phillip: Das sind drei Atome, wie willst du die denn anders strukturieren?

Gustav: Doch. Ich kann das.

Umsetzung der Geschichte im Modell (Z. 693-698, 705-708, 763-768)

Gustav: Das Zitat mit dem natürlichem und künstlichen CO₂ ist Schwachsinn, weil das CO₂ in der Geschichte auch verbrannt und dann wieder gebunden wurde. Von daher, denke ich, ist das Zitat nicht richtig, wenn man der Geschichte mit dem Kohlenstoffteilchen trauen darf.

Interviewer: Was ist denn dann künstlich?

Gustav: Der Grund, warum das CO₂ ausgestoßen wird, die Verbrennung ist künstlich im Vergleich zur Atmung.

Interviewer: Beschreib mal am Modell, was künstlich und natürlich ist.

Gustav: Der Speicherinhalt ist natürlich, genauso wie der Speicher. Die Menge des Speicherinhalts und des Speicherflusses ist teilweise unnatürlich.

Gustav argumentiert eingangs mit der Denkfigur NATÜRLICHES UND KÜNSTLICHES CO₂ und macht den Unterschied – trotz einer anderslautenden Intervention Phillips – in der Struktur und somit der Qualität der CO₂-Moleküle fest.

Nach dem Lernangebot rückt er von seiner eingangs geäußerten Vorstellung ab. Bedeutsam scheint dabei die Erkenntnis, dass auch durch die Verbrennung freigesetzter Kohlenstoff wieder durch die Fotosynthese gebunden werden kann. Die Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas wird von ihm konkretisiert: *Atmung ist natürlich* und *Verbrennung ist künstlich*. Der Kohlenstoffbehälter und auch sein Inhalt werden von ihm als natürlich beschrieben. Die Vorstellungen *Kohlenstofffluss ist künstlich* und *Zu viel Kohlenstoff ist künstlich* korrespondieren miteinander in der Vorstellung *Zu großer Kohlenstofffluss ist künstlich*. Anstoß für die Vorstellungskonstruktion war bei Gustav die Geschichte eines Kohlenstoffteilchens, auf die er sich wiederholt bezieht. Gustav scheidet nicht mehr CO₂ in natürlich und künstlich, sondern die Flüsse. Er wendet damit das Natürlich-Künstlich-Schema nicht mehr auf den Stoff, sondern auf den Prozess an.

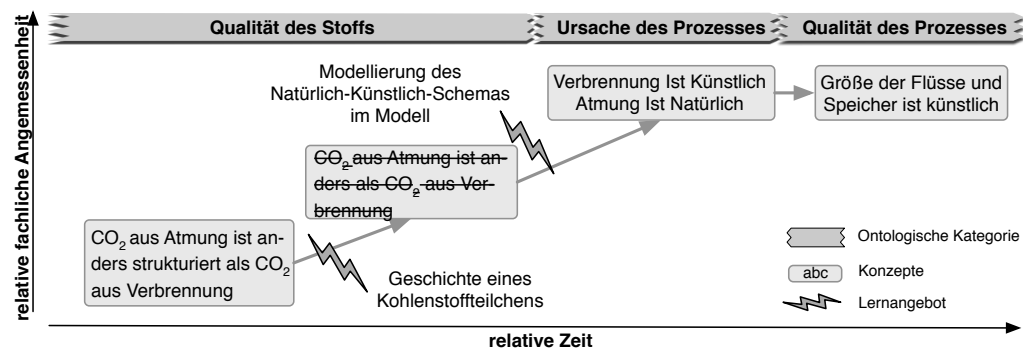


Abbildung 9.5: Gustavs Denkpfad zur Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas

Beispiel II: Von künstlicher Herkunft zu künstlichem Prozess

Interview vor Einführung des Behälterschemas (Z. 157-200)

Phillip: Das natürliche CO₂ ist aus dem Organismus. Ein Vulkan stößt künstliches CO₂ aus. Ich würde eigentlich sagen, CO₂ ist CO₂.

Umsetzung der Geschichte im Modell (Z. 690-712, 771-782)

Phillip: Wenn CO₂ in der Geschichte aus dem Vulkanausbruch rausgekommen ist und von den Lebewesen wieder gebunden wurde, ist der Vulkan entweder natürlich oder das Zitat mit dem natürlichen und künstlichen CO₂ ist Schwachsinn. Die Verbrennung ist unnormal, weil es nicht der normale Kreislauf ist. Auch CO₂ aus der Verbrennung ist in den natürlichen Kreislauf eingebunden.

Interviewer: Beschreib mal am Modell, was künstlich und natürlich ist.

Phillip: Verbrennung gab es vorher schon, die Landnutzung nicht. Künstlich ist, dass der Mensch die Kohle ausgegraben und verbrannt hat. Sonst wäre der Kohlenstoff länger gespeichert.

Phillip reagiert im Eingangsinterview auf das Zitat skeptisch und hinterfragt die Quelle des Zitats. Die Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas erfolgt bei ihm anhand der Behälter, dem das CO_2 entstammt: Organismen stoßen natürliches CO_2 aus, während nicht belebte Speicher künstliches CO_2 ausstoßen. Er argumentiert mit der Vorstellung *CO₂ ist CO₂*. Künstlich sind für ihn nicht belebte Kohlenstoffspeicher (z. B. Vulkane) und natürlich belebte Kohlenstoffspeicher (z. B. Organismen).

Durch den in der Geschichte eines Kohlenstoffteilchens dargestellten geschlossenen Kohlenstoffkreislauf wird er schließlich in seiner Vorstellung bestätigt. Erst beschreibt er die Kohlenstoffflüsse als künstlich, die nicht Teil des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs sind (*Zusätzliche Flüsse sind künstlich*). Später lehnt er die Vorstellung einer künstlichen Verbrennung ab (*Verbrennung ist künstlich*), da es Verbrennungen vorher auch schon gab. Somit bezeichnet er die Ursache des Kohlenstoffflusses als künstlich oder natürlich.

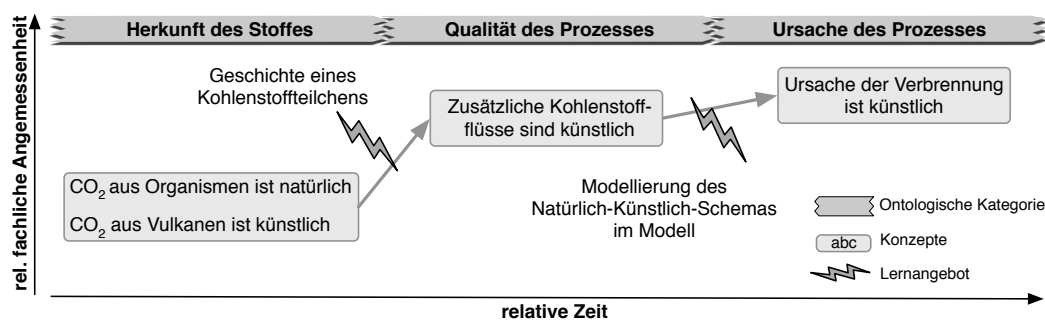


Abbildung 9.6: Phillips Denkpfad zur Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas

Beispiel III: Von künstlichem Stoff zu künstlicher Ursache des Flusses

Interview vor Einführung des Behälterschemas (Z. 145-164)

Tina: Das künstliche CO_2 kann man verringern, aber es ist auch schlimmer. Das natürliche CO_2 war schon vorhanden, ist aber nicht so schlimm wie das künstliche CO_2 . Das künstliche CO_2 hat mehr Wirkung als das natürliche. Ich würde dem Zitat mit dem natürlichen und künstlichen CO_2 zustimmen.

Umsetzung der Geschichte im Modell (Z. 1276-1309, 1332-1378)

Tina: Das natürliche CO_2 ist, wenn die Verbrennung und die Landnutzung wegfällt.

Interviewer: Beschreibe mal am Modell, was du meinst.

Tina: So viel CO_2 wie abgegeben wird, was nach oben gelangt in die Atmosphäre, kommt dann auch wieder zurück. Der Stoff ist neutral, gleich. [...]

Interviewer: [zählt Elemente des Speicher-Fluss-Modell auf]. Was ist künstlich?

Tina: Die Menge, die transportiert wird, ist künstlich.

Laura: Aber der Transport ist natürlich.

Tina: Ja. Verbrennen und Abholzen ist unnatürlich. Wenn man Kohlenstoff verbrennt, ist dieser Weg künstlich. Der Weg bei der Atmung an sich ist natürlich. Der Ablauf ist natürlich. Wenn das verbrannt wird, geht es automatisch nach oben. Der Vorgang ist natürlich, aber wie es dazu kommt, ist künstlich.

Tina unterscheidet zwischen künstlichem und natürlichem CO_2 und bezieht sich auf die Qualität des CO_2 : Die Vorstellung *Künstliches CO_2 wirkt stärker als natürliches CO_2* macht deutlich, dass

es sich hier um zwei verschiedene Moleküle mit unterschiedlichen Eigenschaften und somit um die Denkfigur NATÜRLICHES UND KÜNSTLICHES CO₂ handelt.

In der Arbeit mit dem Speicher-Fluss-Modell wechselt sie die ontologische Kategorie und wendet das Natürlich-Künstlich-Schema auf die Flussrate und damit die Qualität des Prozesses an und bezeichnet ausgeglichene Kohlenstoffflüsse als natürlich. Nach einer Intervention Lauras lehnt sie diese Vorstellung wieder ab und rekurriert auf das Konzept *Ursache des zusätzlichen Kohlenstoffflusses ist künstlich* zur Bezeichnung eines vom Menschen verursachten Kohlenstoffflusses. Dies ist auf eine Übertragung des Speicher-Fluss-Modells auf das Original zurückzuführen: Der Fluss von einem Behälter in den anderen wird dabei als Weg des Kohlenstoffs von der Kohle in die Atmosphäre („nach oben“) betrachtet. Dieser Weg wird dabei von ihr als *natürlich* beschrieben. Sowohl bei der künstlichen als auch der natürlichen Verbrennung steigt das CO₂ von unten nach oben auf. Die Ursache des Flusses ist somit entscheidend für die Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas. Tina hat durch den Vergleich des Modells mit dem Original eine reflektierte Vorstellung erlangt.

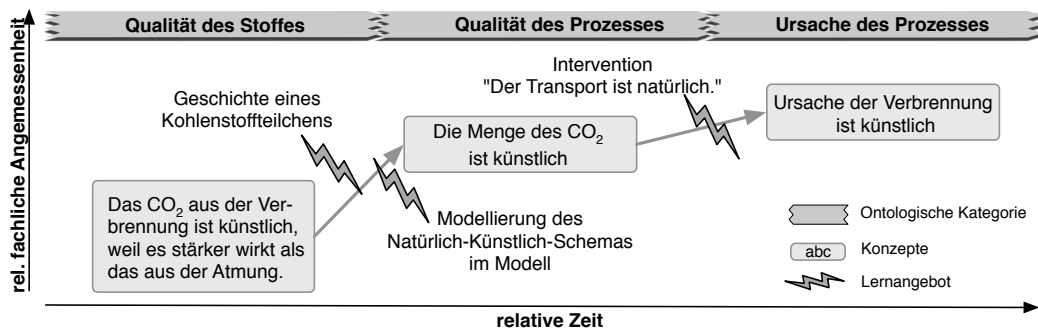


Abbildung 9.7: Tinas Denkpfad zur Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas

Beispiel IV: Von künstlicher Ursache zu künstlicher Qualität des Flusses

Interview vor Einführung des Behälterschemas (Z. 50-78)

Chantal: Ich kann mir nicht vorstellen, dass das CO₂, das wir ausatmen, andere Verbindungen eingehen kann als das CO₂, das durch Kohlekraftwerke entsteht. Ich dachte CO₂ ist CO₂. Die Pflanzen nehmen das CO₂ von uns und auch das künstliche CO₂ auf.

Reflexion des Natürlich-Künstlich-Schemas anhand des Modells (Z. 473-520)

Chantal: Wenn etwas von einer Quelle immer in einen anderen Behälter fließt, aber es kein Zurück gibt, ist es künstlich. [...] Man kann nicht sagen, dass das eine oder andere Teilchen künstlich oder natürlich ist. Natürlich ist ein Austausch, also gleiche Anzahl hin und gleiche Anzahl wieder zurück. Und wenn das nur einseitig kommt, also nur aus einer Schale der Fluss rüber kommt, dann ist es künstlich.

Chantal lehnt die Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas auf die molekularen Eigenschaften des CO₂ im Eingangsinterview zugunsten des Konzepts *CO₂ ist CO₂* ab. Die Zuschreibung *künstlich* findet bei ihr aufgrund der Ursache des Kohlenstoffflusses statt: *Atmung Ist natürlich, Verbrennung Ist künstlich*.

Da weder Chantal noch ihre Interviewpartnerin die Denkfigur NATÜRLICHES UND KÜNSTLICHES CO₂ verwendeten, kam das Lernangebot „Geschichte eines Kohlenstoffteilchens“ nicht zum Einsatz. Stattdessen wurde die Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas anhand der Elemente des Speicher-Fluss-Modells reflektiert. Bei der Reflexion macht Chantal den Gegensatz *künstlich vs. natürlich* an der Qualität der Kohlenstoffflüsse fest: Ausgeglichene Flüsse zwischen

zwei Behältern werden als natürlich beschrieben, während einseitige Flüsse künstlich seien: *Ausgeglichene Kohlenstoffflüsse sind natürlich, Unausgeglichene Kohlenstoffflüsse sind künstlich.*

Chantal bleibt in ihrer Zuordnung des Natürlich-Künstlich-Schemas in der ontologischen Kategorie „Prozess“ und äußert dort verschiedene Vorstellungen. Die erdgeschichtlichen Ungleichgewichte im Kohlenstoffkreislauf wurden im Lernangebot nicht thematisiert. Insofern ist die Zuordnung *Ungleichgewicht Ist Künstlich* im Rahmen des Klimawandels fachlich angemessen, in einer langfristigen Perspektive auf den Kohlenstoffkreislauf hingegen wäre sie zu hinterfragen.

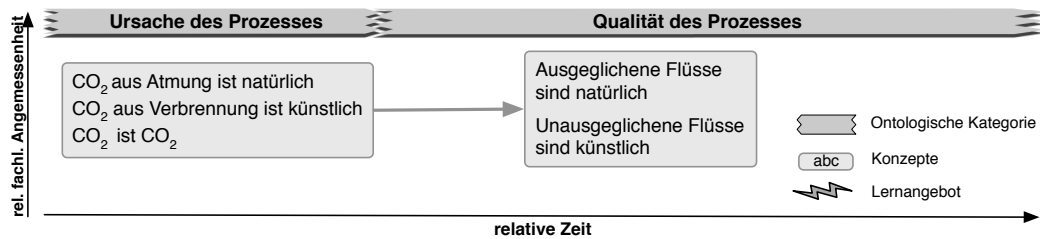


Abbildung 9.8: Chantals Denkpfad zur Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas

Zusammenfassung

Das Lernangebot »Geschichte eines Kohlenstoffteilchens« verbunden mit der Arbeit an einem »Speicher-Fluss-Modell« hilft den Lernern, ihre Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas im Rahmen des Kohlenstoffkreislaufs zu rekonstruieren.

- **Die Arbeit am Speicher-Fluss-Modell fördert einen Wechsel der ontologischen Kategorie.** Die Zuschreibung des Natürlich-Künstlich-Schemas der Lerner erfolgt zu verschiedenen Elementen des Speicher-Fluss-Schemas (*Inhalt, Behälter, Fluss, Ursache des Flusses*) und den jeweiligen Qualitäten (z. B. *groß, klein, einseitig* etc.). Durch das Lernangebot kann die Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas vom Stoff (*künstliches CO₂*) auf den Prozess (*künstliche CO₂-Freisetzung*) rekonstruiert werden. Aber auch Lerner, die die Denkfigur KÜNSTLICHES UND NATÜRLICHES CO₂ fragend diskutieren oder ablehnen, können nach der Intervention elaboriertere Vorstellungen äußern. Sie argumentieren mit dem Natürlich-Künstlich-Schema in Bezug auf die Kohlenstoffflüsse. Diese Vorstellung kann in verschiedenen Varianten gedacht werden: So wird meist zwischen *ausgeglichene* und *nicht ausgeglichene* oder *zu großen Flüssen* unterschieden. Diese Unterscheidung deutet auf die Vorstellung eines *durch den Menschen gestörten natürlichen Gleichgewichts* hin, wie sie auch von Wissenschaftlern formuliert wird.

Hinsichtlich der Wissenschaftsorientierung lassen sich auf Grundlage der durchgeführten Lernangebote Vorstellungsentwicklungen von *Künstliches und natürliches CO₂* über *Künstliche und natürliche Kohlenstoffflüsse* hin zu *Künstliche und natürliche Ursachen des Kohlenstoffflusses* und somit von der ontologischen Kategorie Stoff zur Kategorie Prozess initiieren.

- **Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas hinterfragen.** Während des Vermittlungsexperiments ist aufgefallen, dass Aussagen wie *„Es ist das künstliche CO₂, nicht das natürliche CO₂, das den Klimawandel verursacht“* nicht automatisch als eine Unterscheidung zwischen unterschiedlichen CO₂-Molekülen hindeuten. Die Nutzung der Termini künstlich und natürlich als Zuschreibung zum CO₂ kann unterschiedliche Vorstellungen ausdrücken: Bei Lernern wie Gustav zeugt sie in der Tat von der Vorstellung NATÜRLICHES UND KÜNSTLICHES CO₂ mit unterschiedlichen Molekülen. Andere Lerner, wie Tina beispielsweise drücken ihre Vorstellung *vom Menschen verursachter Kohlenstofffluss* durch den Ausdruck *künstliches CO₂* aus. Die Zuschreibung der Termini *künstlich* und *natürlich* zum Kohlenstoffdioxid

kann somit unterschiedliche Konzepte ausdrücken: *Künstliche Moleküle*, *künstliche Flussraten*, *künstliche Behälter* oder *künstliche Ursachen von Flüssen*. Dies zeigt, dass von der Nutzung bestimmter Termini nicht automatisch auf die Vorstellung geschlossen werden kann, sondern die Konzepte hinter den Termini hinterfragt werden müssen.

- **Die Geschichte eines Kohlenstoffteilchens hilft, die Vorstellung KÜNSTLICHES UND NATÜRLICHES CO₂ zu rekonstruieren.** Die Darstellung der Kohlenstoffflüsse auf Teilchenebene in einem narrativen Kontext hat den Lernern bei der Einordnung der Ursachen des Klimawandels geholfen. Durch die Darstellung der Kohlenstoffflüsse aus der Geschichte im Speicher-Fluss-Modell wurde den Lernern deutlich, dass es sich beim Klimawandel nicht um CO₂-Moleküle unterschiedlicher Qualitäten handelt.
- **Reflexion des Gleichgewichtsschemas bedarf weiterer Lernangebote.** Im Laufe des Lernangebots rekonstruieren die Lerner ihre Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schemas u. a. auf die Vorstellung eines natürlichen Gleichgewichts in den Kohlenstoffflüssen. Dabei wird die Naturgeschichtlichkeit des Kohlenstoffkreislaufs, der erdgeschichtlich von Ungleichgewichten geprägt ist, nicht berücksichtigt. Um eine Vorstellungsentwicklung in Bezug auf die Vorstellungen eines natürlichen Gleichgewichts bedarf es weiterer Lernangebote, die die Gleichgewichtsvorstellung aufgreifen und reflektieren.

9.3.3 Lernangebot: Abholzung im Speicher-Fluss-Schema

In diesem Abschnitt soll folgende Fragestellung untersucht werden: Wie argumentieren die Lerner auf Grundlage des Speicher-Fluss-Modells die Bedeutung der Rodung von Regenwäldern zur Schaffung von Ackerflächen in Zusammenhang mit dem Kohlenstoffkreislauf? Sie wurden dazu mit folgendem Lernangebot konfrontiert:

Infokarte Vergleich von Regenwald und Ackerland

Aufgabe: Welche Auswirkungen hat die Rodung des Regenwalds zugunsten von Ackerland auf das Klima? Diskutiert anhand folgender Daten (Schlesinger 1997, 142):

Ökosystem	Nettoprimärproduktion (Kohlenstofffluss in g/m ² pro Jahr)	Gespeicherte Kohlenstoffmasse (gespeicherter Kohlenstoff in g/m ²)
Tropischer Regenwald	800	15.000
Ackerland*	760	1.400

Gegebenenfalls folgte eine weitere mündliche Intervention: *Stellt die Rodung des Regenwalds zugunsten von Ackerland im Speicher-Fluss-Modell nach* (vgl. Abbildung in Kasten 9.1).

Anhand der Intervention soll untersucht werden, ob die Lerner in der Lage sind, Speicher und Flüsse in der Diskussion des Kohlenstoffkreislaufs auseinanderzuhalten und fachlich angemessen zu kontextualisieren. Die Lerner sollen erkennen, dass die Kohlenstoffflüsse im Regenwald und Ackerland nahezu gleich groß sind, während der Kohlenstoffspeicher Ackerland nur etwa 10 % der Kohlenstoffmenge des Regenwaldes enthält. Bei der Rodung von Regenwald wird somit ein Großteil des Kohlenstoffs in die Atmosphäre verlagert.

*Das Ackerland wurde zu Beginn fachlich angemessener als „Kulturland“ bezeichnet. Nach Verständnisschwierigkeiten der Lerner fand eine Umbenennung in Ackerland statt.

Kasten 9.4: Kurzdarstellung Vergleich zweier Ökosysteme

Beispiel I: Von der Flussrate zur Speichergröße

Lesen der Infokarte Vergleich von Regenwald und Ackerland (Z. 1455-1503)

Tina: Wenn der Regenwald abgeholzt wird, entstehen Äcker. Die stoßen nicht so viel CO₂ aus wie die Regenwälder. Das ist dann ein falscher Ablauf. Da geht immer die alte Menge zurück, aber sie geben nicht die gleiche Menge ab wie der Regenwald.

Interviewer: Ist die Masse des gespeicherten Kohlenstoffs oder die Flussrate entscheidend?

Laura: Die Speichergröße.

Tina: Nein, die Flussmasse. Ich komme völlig durcheinander.

Umsetzung der Kohlenstoffmassen und Flussraten im Modell (Z. 1521-1557)

Tina: Ich hab es vorhin falsch herum gesagt: Vorher war in der Vegetation mehr Kohlenstoff. Da ist jetzt aber weniger, das ist alles durch die Verbrennung nach oben gelangt. Der Regenwald enthält viel mehr Kohlenstoff als der Acker. Wenn man den Regenwald abholzt, gelangt viel mehr Kohlenstoff in die Atmosphäre und bleibt da und gelangt nicht wieder nach unten. Ackerland tauscht weniger Kohlenstoff aus, aber bleibt konstant.

Tina erklärt die Problematik der Abholzung von Regenwald mit veränderten Kohlenstoffflüssen und bestätigt diese Vorstellung auch auf Nachfrage des Interviewers und einer auf den Speicher fokussierenden Intervention von Laura. Aus ihrer Erklärung wird implizit die Nutzung des Gleichgewichtsschemas deutlich: Die Abholzung des Regenwaldes zugunsten von Ackerland führt Tinas Vorstellung nach zu einer positiven Kohlenstoff-Bilanz für den Acker: Er nimmt die ursprüngliche Kohlenstoffmenge auf, gibt aber eine geringere Menge wieder ab. Die ungleichen Kohlenstoffflüsse und damit das Ungleichgewicht in den Kohlenstoffflüssen ist für sie vor der Umsetzung im Speicher-Fluss-Modell das Problem der Rodung von Regenwald. Tina ist schließlich unzufrieden mit ihren Vorstellungen.

Nach Darstellung der gespeicherten und fließenden Kohlenstoffmassen im Speicher-Fluss-Modell rekonstruiert Tina ihre Vorstellungen: Sie beschreibt das Ackerland als kleinen Speicher und den Regenwald als großen Speicher. Das Problem der Rodung des Regenwaldes wird von ihr nicht mehr über die Kohlenstoffflüsse, sondern über die Verlagerung des Kohlenstoffs aus dem großen Speicher Regenwald in die Atmosphäre beschrieben. Während sie eingangs die Problematik der Abholzung des Regenwaldes zugunsten von Ackerflächen mit der Veränderung von Flussraten beschreibt, argumentiert sie nach Umsetzung des Problems im Speicher-Fluss-Modell mit den gespeicherten Kohlenstoffmengen. Tina hat somit auch nach der Reflexion des Speicher-Fluss-Schemas in den vorigen Lernangeboten die im Modell gemachte Erfahrung benötigt, um ihre Vorstellungen fachlich angemessen zu rekonstruieren.

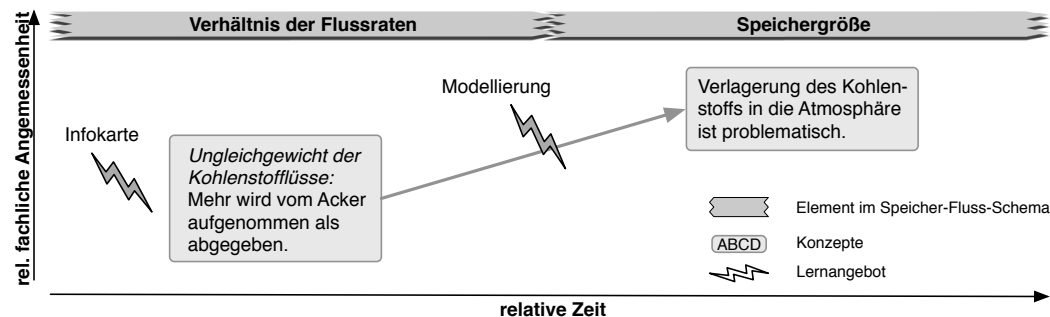


Abbildung 9.9: Tinas Denkpfad zur Unterscheidung von Speichern und Flüssen

Beispiel II: Vom schlechten Verhältnis „Fluss/Speicher“ zur Speichergröße

Lesen der Infokarte Vergleich von Regenwald und Ackerland (Z. 1124-1148)

Phillip: Ackerland hat einen kleinen Speicher, aber im Vergleich dazu einen gigantischen Fluss. Der Regenwald hat eindeutig das beste Verhältnis zwischen Speichergröße und Flussgröße: Er hat den größten Speicher und auch den höchsten Fluss, aber im Verhältnis ist das die niedrigste Korrelation.

Umsetzung der Kohlenstoffmassen und Flussraten im Modell (Z. 1150-1175)

Phillip: Der Speicher ist das Problem, nicht der Fluss. Das Kulturland kann nicht so viel speichern, das hat kaum Bäume, nur kleine Pflanzen. Kulturland ist nicht so speicherhaltig. Der ganze Kohlenstoff muss irgendwo hin. Der geht in die Luft und dann haben wir ein Problem.

Phillip beschreibt eingangs die gespeicherten und fließenden Kohlenstoffmengen gleichermaßen als Problem der Rodung des Regenwalds: So sei eine Verkleinerung der Speicher und Flüsse problematisch. Darüber hinaus äußert Phillip die Vorstellung, dass die Korrelationen zwischen gespeicherten und fließenden Kohlenstoffmassen eine entscheidende Rolle spielt: *Kleine Speicher haben kleine Flüsse* und *große Speicher haben große Flüsse* sind die seine Vorstellungen prägenden Konzepte. Die Kombination kleiner Speicher – großer Fluss ist für ihn ein ungünstiges Verhältnis. Diese Konzepte werden durch die normative Aussage „*der Regenwald hat das beste Verhältnis*“ bestärkt. Phillip wendet somit das Gleichgewichtsschema auf das Verhältnis zwischen gespeicherten und fließenden Kohlenstoffmassen an: Gleiche Größenordnungen bedeuten Gleichgewicht, unterschiedliche Größenordnungen bedeuten Ungleichgewicht. Er differenziert in seiner Argumentation somit zwischen Speichern und Flüssen, betrachtet sie jedoch als interdependent.

Nach der Arbeit mit dem Speicher-Fluss-Modell beschreibt Phillip die Mengen des gespeicherten Kohlenstoff und nicht die Flussraten als Problem des Klimawandels: Die Verkleinerung des Kohlenstoffspeichers Regenwald führt zu einer Kohlenstofffreisetzung in die Atmosphäre. Die Arbeit mit dem Speicher-Fluss-Modell setzt bei Phillip eine kognitive Entwicklung in Gang, mithilfe derer er zwischen Speichern und Flüssen unterscheidet, diese nicht mehr als abhängig betrachtet und die Problemstellungen fachlich angemessen beschreiben kann.

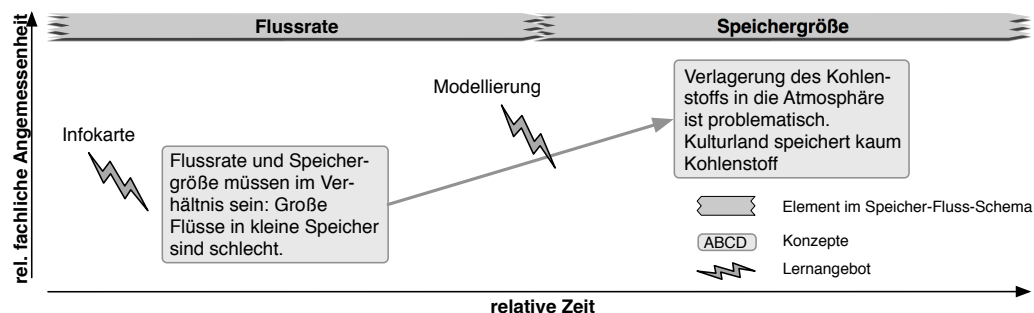


Abbildung 9.10: Phillips Denkpfad zur Unterscheidung von Speichern und Flüssen

Beispiel III: Vom unmöglichen Verhältnis „Fluss/Speicher“ zur Speichergröße

Lesen der Infokarte Vergleich von Regenwald und Ackerland (Z. 1124-1148)

Gustav: Das Problem bei der Abholzung von Regenwald zugunsten von Kulturland ist, dass du im Regenwald im Vergleich zum Kulturland einen großen Speicher hast. Beim Ackerland hast du einen Fluss von 760 bei einem kleinen Speicher. Beim Regenwald mit dem relativ großen Speicher hast du nur einen Fluss von 800. Im Vergleich ist das gigantisch. Ein hoher Fluss in einem kleinen Speicher ist schädlich.

Umsetzung der Kohlenstoffmassen und Flussraten im Modell (Z. 1150-1175)

Gustav: Der große Fluss zwischen Kulturland und Atmosphäre kann nicht geleistet werden, weil im Acker nicht so viel vorhanden ist durch den geringen Speicher.

Interviewer: Der Fluss ist in Gramm pro Jahr und der Speicher in Gramm angegeben. Was ist denn das Problem, der Speicher oder der Fluss?

Gustav: Der Speicher ist die entscheidende Größe beim Klimawandel: Kulturland hat keinen Speicher.

Gustav argumentiert ähnlich wie Phillip die Problematik der Abholzung des Regenwaldes zugunsten von Äckern mit dem Verhältnis der Massen von gespeichertem und fließendem Kohlenstoff. Das seine Argumentation bestimmende Konzept ist *Großer Fluss in kleinen Speicher ist schädlich*. Große Umsätze bei kleinen Bestandsgrößen sind für ihn offensichtlich schwer vorstellbar.

Auch nach der Arbeit mit dem Speicher-Fluss-Modell hat er Probleme, Umsatz- und Bestandsgrößen zu differenzieren und sich große Flüsse in kleinen Speichern vorzustellen. Erst nach einer Intervention des Versuchsleiters, der die Speicher- und Flussgrößen explizit differenziert, beschreibt Gustav die Größe des Kohlenstoffspeichers als entscheidenden Faktor. Gustav benötigte somit Hilfe bei der Differenzierung von Speicher- und Flussgrößen, um die Speichergröße als Problem des Klimawandels zu benennen.

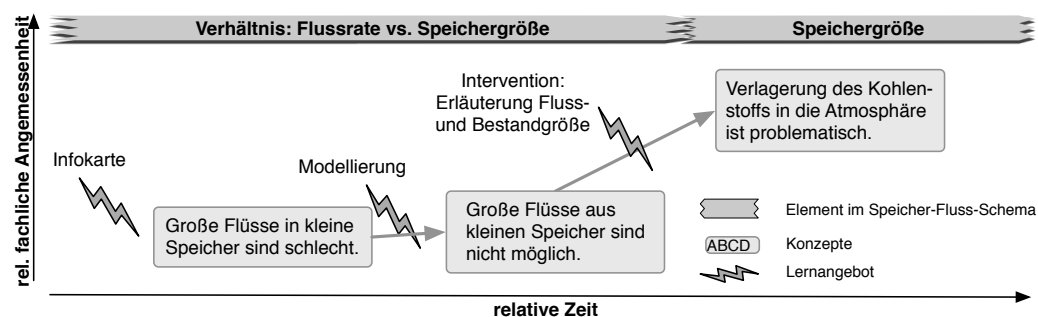


Abbildung 9.11: Gustavs Denkfad zur Unterscheidung von Speichern und Flüssen

Zusammenfassung

Das Lernangebot »Kohlenstoffspeicher Regenwald und Ackerland« zielt ab auf eine Differenzierung der Elemente des Speicher-Fluss-Schemas im Rahmen des Kohlenstoffkreislaufs. Dabei wurden den Lernern zuerst die Massen der Kohlenstoffspeicher und Kohlenstoffflüsse zweier Ökosysteme vorgegeben. Schließlich wurde das Lernangebot mit einer Aufforderung zur Darstellung der Daten im Speicher-Fluss-Modell erweitert. Zusammenfassend zeigen sich folgende Befunde:

- **Lerner haben Schwierigkeiten in der Differenzierung von Speicher- und Flussgrößen.** Der Verlauf des Lernangebots zeigt, dass Lerner Schwierigkeiten in der Differenzierung der Bedeutung von Kohlenstoffflüssen und -speichern haben. Obwohl die Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs im Speicher-Fluss-Modell dem Lernangebot voraus ging, war es den Lernern zum Teil nur mit Hilfe möglich, das Problem der Abholzung mit der Verkleinerung des Speichers Vegetation zu beschreiben.
- **Die Umsetzung im Modell hilft, das Speicher-Fluss-Schema zu reflektieren.** Hilfreich für die Entwicklung einer fachlich angemessenen Vorstellung war die erneute Darstellung der Speicher- und Flussgrößen im Modell. Offensichtlich fiel es den Lernern leichter, die Verlagerung von Kohlenstoff aus der Vegetation in die Atmosphäre anhand des Modells, als anhand der Daten zu erkennen. Die Modellierung und damit die Erfahrung des Problems konnte als wichtiger, lernförderlicher Aspekt des Lernangebots identifiziert werden. Einige Lerner benötigten auch über die Modellierung hinaus noch Interventionen zur expliziten

Differenzierung von Speichern und Flüssen durch den Versuchleiter für eine erfolgreiche Vorstellungsrekonstruktion.

- **Gleichgewichtsschema ist prominentes Erklärungsmodell.** In den Erklärungen der Lerner wird wiederholt das Gleichgewichtsschema zur Diskussion von Kohlenstoffflüssen und -speichern herangezogen. Dabei wird das Schema nicht nur zur Beschreibung der Kohlenstoffflüsse herangezogen. Vielmehr findet das Gleichgewichtsschema bei Gustav und Philip auch im Vergleich der Massen der Flussraten mit den Massen der Kohlenstoffspeicher Anwendung. Stehen diese nicht in einem bestimmten Verhältnis, kommt es zu einem als negativ bewerteten Ungleichgewicht. In der Bewertung der Daten scheinen die Lerner die Suche nach angemessenen Verhältnissen zwischen den Daten als Erklärungsstrategie zu verfolgen. Große Quotienten werden dabei entweder negativ bewertet oder gelten als nicht möglich.

Das Lernangebot zeigt, dass die Darstellung von Stoffspeichern und -flüssen im Modell eine zielführende Hilfestellung für die Entwicklung eines angemessenen Verständnisses des Kohlenstoffkreislaufs ist. Zum Teil muss das Lernangebot hierfür um weitere Hilfestellungen zur Differenzierung von Bestandsgrößen und Flussraten ergänzt werden.

9.4 Lernangebote und Denkpfade zum Treibhauseffekt

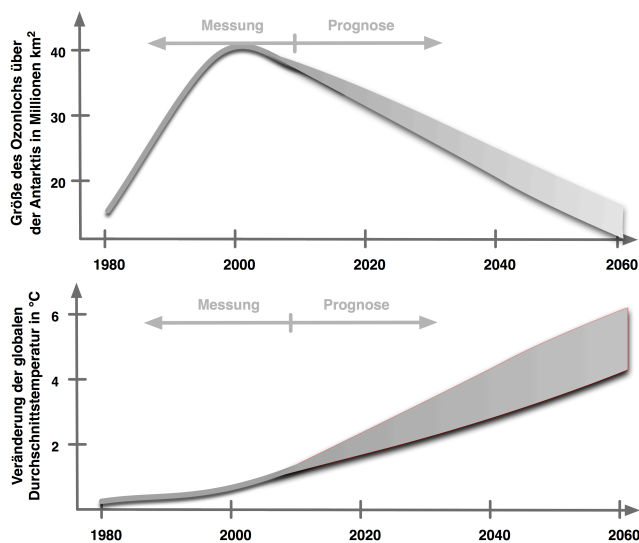
Die Lernangebote zum Treibhauseffekt bestehen aus einer Sequenz verschiedener Interventionen, die nacheinander eingesetzt werden, um den Lernern ein fachlich angemessenes Verständnis des Treibhauseffekts zu ermöglichen. Im Folgenden werden die Lernangebote zum Treibhauseffekt auf ihre Lernwirksamkeit hin untersucht. Die Lernangebote werden einzeln ausgewertet und bewertet. Anschließend werden Denkpfade einiger Lerner anhand der Veränderungen ihrer Vorstellungen zum Treibhauseffekt im Verlauf des Vermittlungsexperiments erstellt. So soll nicht nur die Wirkung eines Lernangebots, sondern die Lernwirksamkeit der gesamten Sequenz evaluiert werden.

9.4.1 Lernangebot: Globale Erwärmung und Ozonloch

Die Konfusion des Treibhauseffekts mit dem Ozonloch ist ein häufiges Lernhindernis auf dem Weg zu einem fachlich angemessenen Verstehen des Treibhauseffekts. Ziel des Lernangebots ist somit die Differenzierung der beiden Phänomene (vgl. Leitlinie 8.6.2). So soll die aus der Conceptual-Change-Forschung geforderte Unzufriedenheit mit den verfügbaren Vorstellungen entstehen. Damit wird eine grundlegende Voraussetzung zur Vorstellungsrekonstruktion im Rahmen weiterer Lernangebote geschaffen.

Die Analyse dieses Lernangebots wird geleitet von der Fragestellung:

- Welchen Einfluss hat das Lernangebot auf die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH?



Kurzbeschreibung

Das Lernangebot besteht aus einer Gegenüberstellung der prognostizierten Entwicklungen der globalen Erwärmung und der Größe des so genannten Ozonlochs anhand nebenstehender Diagramme. Die Lerner bekommen folgenden Arbeitsauftrag:

Beschreibt die Diagramme und diskutiert die Aussage „Die globale Erwärmung findet statt, weil das Ozonloch größer wird“.

Anhand des Lernangebots sollen die Lerner die Ausdünnung atmosphärischen Ozons und die globale Erwärmung als voneinander unabhängig erkennen.

Kasten 9.5: Kurzbeschreibung des Lernangebots Globale Erwärmung und Ozonloch

Beispiel I: Ungelöster kognitiver Konflikt führt zur Fragestellung

Vor dem Lernangebot Prognose Erwärmung & Ozonloch (Z. 15-23; 59-65)

Siegbert: Bei Klimawandel wird die Ozonschicht angegriffen durch die Treibhausgase. In Australien verbrennt man sich ja schon durch die Sonne. An der Ozonschicht ist ein Ozonloch, wo die Strahlen ungeschwächt auf die Erde treffen.

Während des Lernangebots Prognose Erwärmung & Ozonloch (Z. 123-131; 151-159)

Siegbert: Aus der Abbildung kann man schließen, dass das Ozonloch bis 2060 kleiner wird und die Durchschnittstemperatur zunimmt. Also ist die Aussage »Die globale Erwärmung findet statt, weil das Ozonloch größer wird« Quatsch. Es ist jetzt halt nur die Frage, warum das Ozonloch kleiner wird und die Temperatur trotzdem ansteigt.

Siegbert greift eingangs auf für die Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH spezifische Konzepte zurück (vgl. Kapitel 7.4). Das Lernangebot führt bei ihm zu einer Unzufriedenheit und schließlich zur Ablehnung der von ihm im Anfangsinterview geäußerten Vorstellung. Die Unzufriedenheit kann bei Siegbert über das Lernangebot hinaus gehalten werden, da er keine Informationen zur weiteren Erklärung der Phänomene globale Erwärmung und Ozonloch erhält.

Beispiel II: Lösung des kognitiven Konflikts durch Hinterfragen der Daten

Vor dem Lernangebot Prognose Erwärmung & Ozonloch (Z. 40-55)

Egon: Es kommt zu einer Erwärmung, weil die Ozonschicht kaputt gemacht wird und die Strahlen dann von der Sonne ungehindert durchkommen.

Während des Lernangebots Prognose Erwärmung & Ozonloch (Z. 132-133, 162-171)

Egon: Entspricht dieses Diagramm hier der Wahrheit? Kann das sein, dass die Aussage zur Entwicklung der Erwärmung von einem, die Prognosen zur Entwicklung des Ozonlochs von jemand anderem kommen? Die Aussage, dass das Ozonloch für die Erwärmung verantwortlich ist, stimmt dann nicht. Aber wir haben ja auch gesagt, dass es mehrere Faktoren gibt.

Das Lernangebot führt bei Egon zu einer Unzufriedenheit mit der eingangs von ihm formulierten Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH. Er versucht die Unzufriedenheit zuerst über ein Hinterfragen der Daten und schließlich über die Beschreibung multifaktorieller Ursachen des Klimawandels zu lösen. Insgesamt zeigt sich ein kognitiver Konflikt, der mangels neuer, weiterführender Erklärung offen bestehen bleibt.

Beispiel IV: Festhalten an Vorstellung und Bildung synthetischen Modells

Vor dem Lernangebot Prognose Erwärmung & Ozonloch (Z. 90-96)

Raphael: Bei der Erwärmung ist CO₂ ist vor allem für das Ozonloch verantwortlich.

Während des Lernangebots Prognose Erwärmung & Ozonloch (136-146, 177-185)

Siebert: Die Aussage »die globale Erwärmung findet statt, weil das Ozonloch größer wird« ist Quatsch.

Ann-Katrin: Die Aussage stimmt laut dem Diagramm irgendwie nicht.

Raphael: [stark betont] Meine Meinung steht fest. Es ist so, dass das CO₂ sich vor der Atmosphäre sammelt und die UV-Strahlung zurückhält. Das Problem des Ozonlochs ist, dass die UV-Strahlung ganz durchgeht. Das wird sich gegenseitig ergänzen. [...] Das Ozonloch ist keine so große Gefahr, wenn sich genug dieser Abgase vor der Atmosphäre sammeln und die Schicht dick genug ist. Die Gefahr des Ozonlochs ist, dass die UV-Strahlung durch kann, durch die Abgasschicht aber nicht.

Raphael greift zur Erklärung der globalen Erwärmung im Anfangsinterview auf die Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH zurück. Die beiden anderen Lerner in seiner Gruppe lehnen die Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH ab. Raphael hingegen verweigert sich einer Ablehnung der Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH. Vielmehr synthetisiert er die Vorstellungen ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT und ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH (vgl. Kapitel 7.4) zu einer auf Konzepte aus beiden Denkfiguren zurückgreifenden Erklärung. Er versucht so, eine konsistente Erklärung für die globale Erwärmung trotz des sich schließenden Ozonlochs zu finden: Die sich unter dem Ozonloch befindende Dämmschicht hält die UV-Strahlung ab, während das Ozonloch sie durchlässt. Da er andere Strahlungsarten nicht erwähnt, wird Raphael zufolge die Erwärmung durch die UV-Strahlung verursacht, die nun durch die Abgasschicht nicht mehr durch das Ozonloch gelangt. Somit dürfte es nicht zu einer Erwärmung kommen, was von Raphael jedoch nicht als Problem erkannt wird.

Raphael gibt nach der Intervention an, sich durch diese nicht verunsichern zu lassen. Dennoch versucht er die von seinen Mitschülern genannten Vorstellungen in seine Denkfigur aufzunehmen, um eine mit den Daten des Lernangebotes konsistente Erklärung für den Klimawandel zu finden. Ihm gelingt keine logisch konsistente, aber eine für ihn ausreichende Erklärung. Aus Perspektive des Conceptual-Change-Ansatzes (vgl. Kapitel 2) ist das Kriterium *Unzufriedenheit* für eine konzeptuelle Rekonstruktion in Raphaels subjektiver Wahrnehmung nicht erfüllt, objektiv betrachtet hingegen schon. Die Kriterien *Verständlichkeit* und *Plausibilität* für die neue Vorstellung sind subjektiv für ihn erfüllt, objektiv hingegen aufgrund der logischen Inkonsistenz seines neuen Ansatzes nicht. Der kognitive Konflikt führt für ihn somit in eine fachlich nicht angemessene Vorstellung, die von Vosniadou (Vosniadou 1994) als synthetische Vorstellung bezeichnet wird.

Die Lernhindernisse in der Rekonstruktion seiner Vorstellungen ergeben sich aus der mangelnden Differenzierung zwischen der Ausdünnung atmosphärischen Ozons und dem Treibhauseffekt sowie der mangelnden Differenzierung zwischen verschiedenen Wellenlängen elektromagnetischer Strahlung.

Zusammenfassung

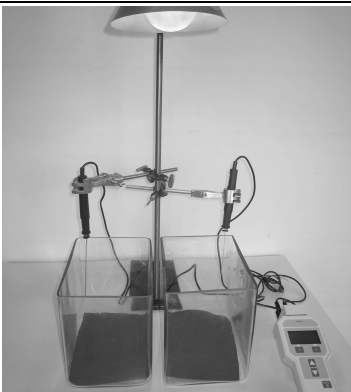
Zusammenfassend lassen sich folgende Befunde feststellen:

- **Das Lernangebot bewirkt einen kognitiven Konflikt.** Der Vergleich der Prognosen zur Entwicklung der globalen Erwärmung und der Größe des Ozonlochs führt bei allen Lernern, die eingangs die Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH formulierten zu einer Unzufriedenheit mit ihrer bisherigen Vorstellung. Dies ist Strike und Posner (1992) zufolge Voraussetzung für einer erfolgreichen Vorstellungsveränderung. Diese Unzufriedenheit wird indes verschieden aufgelöst: (1) die ursprüngliche Vorstellung wird abgelehnt (Siegbert), (2) die Daten werden abgelehnt bzw. ihre Gültigkeit hinterfragt (Egon) oder aber (3) die ursprüngliche Vorstellung wird erweitert, ohne sie abzulehnen (Raphael).
- **Das Lernangebot liefert keine Erklärungen.** Das Lernangebot führt die Lerner in einen kognitiven Konflikt, kann diesen jedoch nicht auflösen und eine zufriedenstellende alternative Erklärung bieten. Hierfür sind weitere, im Folgenden beschriebene Lernangebote notwendig.

Zusammenfassend lässt sich anhand der untersuchten Lernprozesse feststellen, dass die Differenzierung von globaler Erwärmung und Ozonloch anhand ihrer zeitlichen Prognosen eine adäquate Methode ist, um Lerner mit der Vorstellung Erwärmung Durch Ozonloch in einen kognitiven Konflikt zu führen. Zusätzlich könnte eine Differenzierung nach räumlichen und strukturellen Unterschieden erfolgen (vgl. Kapitel 8.6.2).

9.4.2 Lernangebot: Treibhausexperiment CO₂ vs. Luft

Das Lernangebot Treibhausexperiment CO₂ vs. Luft zielt auf eine Bestätigung der Vorstellung ab, dass es in einer CO₂-reichen Atmosphäre zur Erwärmung kommt. Darüber hinaus sollen die Lerner angeregt werden, ihre Beobachtungen zu erklären.



Kurzbeschreibung

Das Lernangebot besteht aus zwei nach oben geöffneten Behältern, von denen einer mit Luft und der andere mit CO₂ gefüllt ist. Beide Behälter haben einen schwarzen Boden und werden von oben mit einer 200 Watt-Lampe bestrahlt. Die Temperatur in den Behältern wird mit frei hängenden Thermometern gemessen. Im Experiment kann im CO₂-gefüllten Behälter eine um 1-2 Grad höhere Temperatur gemessen werden.

Die Lerner werden aufgefordert, die beobachteten Phänomene anhand ihrer Vorstellungen zu erklären. Dabei soll die Erwärmung des CO₂-gefüllten Behälters erkannt werden. Zusätzlich soll erkannt werden, dass es keine Ozonschicht im Behälter gibt, die vom CO₂ zerstört wird.

Kasten 9.6: Treibhausexperiment CO₂ vs. Luft

Es soll somit die Frage untersucht werden:

- Wie erklären Lerner die Phänomene im Treibhausexperiment CO₂ vs. Luft?

Beispiel I: Bestätigung der Vorstellung, Aufdeckung von Lernbedarf

Vor dem Lernangebot Treibhausexperiment: CO₂ vs. Luft (Z. 45-53)

Egon: CO₂ und die anderen giftigen Stoffe lagern sich oben ab und reflektieren Strahlen, sodass sie nicht mehr ins Weltall gehen. Dann wird es bei uns hier zu Hause wärmer.

Während des Lernangebots Treibhausexperiment: CO₂ vs. Luft (316-333)

Egon: Laut dem theoretischen Denken, was wir auch in der Schule hatten, würde ich sagen, dass die „Sonnenstrahlen“ im Behälter mit der Luft wieder raus reflektiert werden. Im Behälter mit dem CO₂ verhindert das CO₂ diese Rausreflexion der Sonnenstrahlen. Da das Papier schwarz ist, ist die Reflektion nicht so groß, weil die Farbe die Sonnenstrahlen anzieht. Aber die Pappe hat nichts damit zu tun, die ist bei beiden das selbe.

Egon äußert anfangs wie auch während des Lernangebots die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT UND sieht sich in seinem schulisch erworbenen Vorwissen bestätigt. Inwiefern er sich eine Umwandlung von Sonnen- in Wärmestrahlung vorstellt, bleibt unklar. Egon zufolge werden die Sonnenstrahlen wieder von der Erde reflektiert und vom CO₂ am Entweichen in die Umgebung gehindert. Er beschreibt damit die Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT in der Variante ERWÄRMUNG DURCH SONNENSTRAHLUNG. Die Funktion der schwarzen Pappe beschreibt Egon in einer Verringerung der Reflexion, hält sie aber schließlich für irrelevant, da sie in beiden Behältern vorhanden sei. Er versucht somit die Erwärmung auf unterschiedliche Variablen im Experiment zurückzuführen.

Beispiel II: Ablehnung der Vorstellung Erwärmung durch Ozonloch

Vor dem Lernangebot Treibhausexperiment CO₂ vs. Luft (Z. 42-96)

Max: Das CO₂ greift die Ozonschicht an und dadurch wird das Ozonloch immer größer. Dadurch wird mehr Wärme eingestrahlt und es wird wärmer.

Während des Lernangebots Treibhausexperiment CO₂ vs. Luft (Z. 193-268)

Max: Wenn das Ozonloch geschlossen ist, kommt gar nicht erst so viel Strahlung rein. Es muss also von Anfang an eine Erwärmung geben, die nichts mit der Sonneneinstrahlung zu tun hat.

Interviewer: Wo ist denn hier das Ozon?

Max: Wir haben gesagt, es wird wärmer, weil das CO₂ das Ozon zerstört. Aber es gibt hier kein Ozon und Ozonloch. Der Behälter mit CO₂ ist fast zwei Grad wärmer. Hat das nicht auch was mit kurzen und langwelligen Strahlen zu tun? Dass die irgendwie anders strahlen? Warum wird das jetzt in dem CO₂-Behälter wärmer als in dem Sauerstoffbehälter?

Max äußert zu Beginn des Vermittlungsexperiments die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH. Durch das Lernangebot Prognose der globalen Erwärmung & Ozonloch hat er die Vorstellung eines sich schließenden Ozonlochs erworben und versucht diese, in der Erklärung dieses Versuchs anzuwenden. Eine nachfragende Intervention des Versuchsleiters lässt ihn in einen kognitiven Konflikt geraten. Er erklärt die Unabhängigkeit der Erwärmung vom Ozonloch, da im Versuch kein Ozon beteiligt sei. Schließlich versucht er, die Erwärmung auf verschiedene Strahlungsspektren zurückzuführen, ohne jedoch seinen Erklärungsansatz auszuführen. Die zur Erwärmung führenden Vorgänge bleiben ihm unklar. In der Beschreibung des Lernangebots bezeichnet er den luftgefüllten Behälter synonym als sauerstoffgefüllt.

Beispiel III: Fehldeutung der Beobachtung anhand eines synthetischen Modells

Vor dem Lernangebot Treibhausexperiment CO₂ vs. Luft (Z. 138-185)

Raphael: Das CO₂ sorgt für das Ozonloch. Ozonloch und diese Schicht ergänzen sich. Wenn es mehr von dieser Schicht geben würde, dann wäre das Ozonloch kleiner und die UV-Strahlen würden nicht durch kommen. Das Problem ist, dass es nicht genug von dieser Schicht gibt.

Während des Lernangebots Treibhausexperiment CO₂ vs. Luft (Z. 193-328)

Raphael: Der Temperaturfühler soll die Temperatur messen. Die Lampe ist die Sonne und der Boden ist nicht umsonst schwarz. Schwarz zieht dreißig Prozent mehr an als alles andere.

Hier in dem einen Behälter ist CO_2 und hier im anderen Behälter die Luft. Das CO_2 macht das Ozonloch. Da kommen die Sonnenstrahlen durch. Im Behälter mit dem O_2 bleiben ein paar Strahlen hängen, das kommt bis zum Papier nicht alles durch. Die Sonnenstrahlen können im Behälter mit CO_2 einfach locker durch die Ozonschicht und das CO_2 . Die Strahlen treffen auf das schwarze Papier auf, es sammelt sie und gibt sie dann wieder zurück. Das Ozonloch und diese Abgasschicht ergänzen sich gegenseitig.

Raphael beschreibt vor dem Lernangebot die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH, hat aber gleichzeitig die Vorstellung einer sich bildenden CO_2 -Schicht, wobei die Phänomene Schicht und Loch eine entgegen gesetzte Wirkung haben.

In der Beschreibung des Lernangebots bezeichnet er den luftgefüllten Behälter synonym als sauerstoffgefüllt. Diese fachlich nicht korrekte Beschreibung hat jedoch keine Auswirkungen auf seine weiteren Ausführungen. Raphael misst der schwarzen Pappe eine Bedeutung in der Anziehung von Strahlung zu.

Das Lernangebot führt bei Raphael nicht zu einer fachlich angemessenen Vorstellungsrekonstruktion: Er beschreibt zu Beginn des Lernangebots den Aufbau des Experiments – ohne eine Ozonschicht zu erwähnen. In der Erklärung der beobachteten stärkeren Erwärmung im CO_2 -gefüllten Behälter greift er schließlich wieder auf seine zu Beginn des Vermittlungsexperiments geäußerte Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH in der Variante ERWÄRMUNG DURCH STRAHLENFALLE zurück. Dabei wird die strahlenfangende Schicht vom CO_2 gebildet, das die Strahlung nicht wieder heraus lässt. CO_2 wird bei Raphael somit über zwei Eigenschaften konzeptualisiert: *CO_2 zerstört Ozonschicht* und *CO_2 speichert Wärme*. Bei Raphael wären weitere Interventionen notwendig, um herauszustellen, dass im Versuchsaufbau kein Ozon beteiligt ist.

Beispiel IV: Von Erwärmung durch Strahlenfalle zu Erwärmung durch CO_2

Vor dem Lernangebot Treibhausexperiment: CO_2 vs. Luft (Z. 151-166)

Siegbert: Es ist die Frage, warum das Ozonloch kleiner wird und die Temperatur trotzdem steigt.

Ann-Katrin: Die Sonnenstrahlen kommen ungehindert durch das Ozonloch durch und auch wieder zurück.

Siegbert: Ja. Dann werden sie wieder von den Wolken reflektiert.

Während des Lernangebots Treibhausexperiment: CO_2 vs. Luft (Z. 193-320)

Siegbert: In dem Behälter mit dem CO_2 ist es bestimmt wärmer, weil das CO_2 irgendwas mit dem Klimawandel zu tun haben muss. Da kommen Photonen runter. Vielleicht hat das was mit dem Kohlenstoff zu tun. Chemisch betrachtet ist CO_2 größer als O_2 . Die Photonen sind eine Art von Energie, sodass die Sonnenstrahlen praktisch diese Atome mehr zum Schwingen bringen und dann entsteht mehr Wärme. Die beiden Pappen haben nichts damit zu tun, weil das beides identisch ist. Die verstärken nur den Effekt, sodass es die Wärme mehr anzieht.

Siegbert konstruiert vor dem Lernangebot gemeinsam mit Ann-Katrin die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH in der Variante ERWÄRMUNG DURCH STRAHLENFALLE, in der die Strahlen von den Wolken wieder zur Erde reflektiert werden. Während des Lernangebots führt er die Erwärmung schließlich auf das CO_2 zurück. In der Beschreibung des Lernangebots verwechselt er Luft mit Sauerstoff. Er äußert schließlich eine wissenschaftsorientierte Vorstellung, nach der das CO_2 durch die eintreffenden Photonen stärker in Schwingung gerät als der Sauerstoff und führt dies auf die Molekülgröße zurück. In Bezug auf die langwelligen Anteile der Sonnenstrahlung beschreibt er damit sogar eine wissenschaftliche Vorstellung. Die schwarze Pappe hält er für unbedeutend, da sie in beiden Behältern vorhanden ist. Für eine weitere Konzeptentwicklung wäre für ihn eine Unterscheidung zwischen kurz- und langwelliger elektromagnetischer Strahlung hilfreich.

Beispiel IV: Bestätigung der Vorstellung, Aufdeckung von Lernbedarf

Vor dem Lernangebot Treibhausexperiment: CO₂ vs. Luft: (Z. 56-62)

Nina: Irgendwer hatte mal eine Zeichnung, da gingen die Sonnenstrahlen rein, wurden größtenteils wieder zurück reflektiert und ein Teil ging aber wieder raus. Aber das Meiste blieb drin.

Während des Lernangebots Treibhausexperiment: CO₂ vs. Luft (133-134; 147-157)

Nina: CO₂ wird erwärmt und da finden dann exotherme Reaktionen statt. Im Behälter mit der Luft werden die Strahlen durchgehen, absorbiert werden und teilweise wieder zurückgestrahlt. Im Behälter mit dem CO₂ gehen die Strahlen wieder zurück zur Erde. Deswegen ist es da wärmer, weil sich da die Wärme so sammelt.

Nina äußert zu Beginn die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT. Das Lernangebot bestätigt sie in der Vorstellung, dass es durch das CO₂ zu einer Erwärmung kommt. Dafür hat sie zwei Erklärungen: Zum einen erwärmen die Strahlen das CO₂ direkt durch eine Reaktion, bei der Wärme freigesetzt wird. Zum anderen dringen die Strahlen zum Erdboden durch, werden dort absorbiert und nur teilweise zurückgestrahlt. Nina unterscheidet somit nicht zwischen Sonnen- und Wärmestrahlung, sondern äußert die Konzepte: *Erwärmung durch künstliche Reaktion* und *Erwärmung durch Strahlungssammlung*. Ninas Erklärungen zur Erwärmung gehen über die im Lernangebot dargestellten Phänomene hinaus. Vielmehr entstammen sie ihrem Vorwissen, das durch das Lernangebot aktiviert wird. Bei Nina wird ein Lernbedarf zur Unterscheidung zwischen Licht- und Wärmestrahlung deutlich.

Zusammenfassung

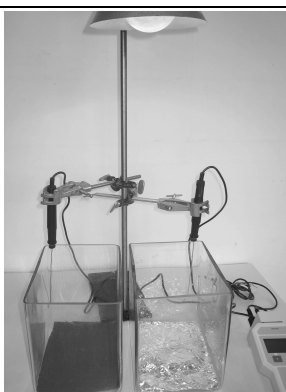
Das Lernangebot Treibhausexperiment CO₂ vs. Luft zielt auf die Vorstellung *CO₂ speichert Wärme* ab. Das Experiment ist dabei so konstruiert, dass die Behälter nach oben offen sind, um die Vorstellung *CO₂ zerstört Ozonschicht* zu widerlegen, da es keinerlei Schicht oder Wand gibt, die zerstört werden kann. Zusammenfassend lassen sich folgende zentrale Befunde beschreiben:

- **Die Vorstellung CO₂ führt zu Erwärmung wird vermittelt oder bestätigt.** Das Lernangebot hilft den Lernern dabei, die globale Erwärmung auf das klimaaktive Gas CO₂ zurückzuführen. Lerner, die zuvor undifferenzierte Vorstellungen zur Erwärmung haben, werden dabei in der Vorstellung bestätigt, dass CO₂ Ursache der globalen Erwärmung ist. Lerner, die vor dem Lernangebot die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT haben, werden in ihrer Vorstellung bestätigt und liefern wissenschaftsorientierte Erklärungsansätze.
- **Die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH kann erschüttert werden.** Zeigen Lerner eingangs die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH, erkennen sie durch die Beschreibung des Versuchsaufbaus, dass Ozon an dem Modellversuch nicht beteiligt ist und damit die globale Erwärmung auf andere Effekte zurückführen sein muss. Die Reaktionen Max' und Raphaels zeigen jedoch, dass es zum Teil weiterer Interventionen bedarf, um herauszustellen, dass Ozon nicht am Versuchsaufbau beteiligt ist. Hier wäre zukünftig eine stärkere Modellkritik über den Vergleich des Versuchsaufbaus mit den eigenen Vorstellungen bzw. dem Original notwendig, um die Nicht-Beteiligung der Ozonschicht herauszustellen, wie bei Raphael deutlich wird.
- **Lernangebot liefert keine Erklärung für die Erwärmung.** Das Lernangebot stellt das Phänomen *CO₂ speichert Wärme* dar, indem sich der CO₂-Behälter stärker erwärmt. Es liefert jedoch für die Lerner keine Erklärung der Phänomene. Für die Erklärung sind die Lerner auf ihr Vorwissen bzw. auf die im Vermittlungsexperiment folgenden Lernangebote angewiesen.

9.4.3 Lernangebot: Treibhausexperiment mit Folie vs. Pappe

In den Lernervorstellungen und vorangegangenen Lernangeboten zeigt sich deutlich, dass Lerner selten Konzepte zur Umwandlung von Sonnenstrahlung in terrestrische Wärmestrahlung haben. Im Folgenden soll die Wirkung der Lernangebote Treibhausexperiment mit Folie und Pappe (Kasten 9.7) und einer Infokarte mit dem Strahlungsspektrum der Sonne (Kasten 9.8) analysiert werden. Die Infokarte „Strahlungsspektrum“ resultiert aus der prozessbegleitenden Evaluation. Sie wurde erst nach dem ersten analysierten Beispiel (Max) eingeführt, um die Lerner bei der Bezeichnung ihrer Vorstellungen zu unterstützen. Die leitende Fragestellung ist:

- Wie erklären Lerner die unterschiedlichen Temperaturanstiege in den Behältern?

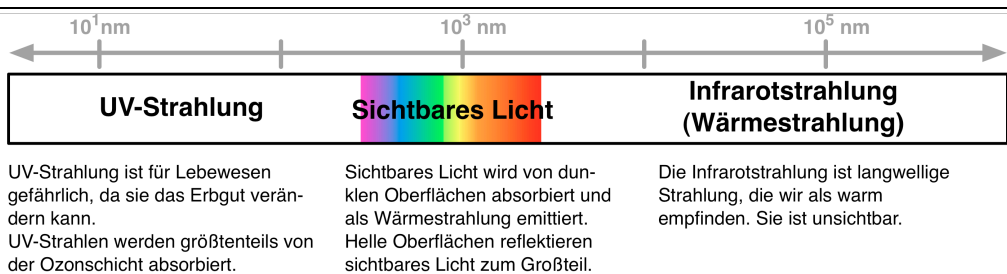


Kurzbeschreibung

Das Lernangebot besteht aus zwei nach oben geöffneten mit CO₂ gefüllten Behältern. Ein Behälter hat einen schwarzen, der andere einen Boden aus Alufolie. Die Behälter werden von oben mit einer 200 Watt-Lampe bestrahlt und die Temperatur in den Behältern mit frei hängenden Thermometern gemessen. Im Experiment kann so eine um 1 bis 2 Grad höhere Temperatur im Behälter mit dem schwarzen Untergrund gemessen werden. Die Lerner werden aufgefordert, das Ergebnis vorherzusagen und schließlich die im Experiment beobachteten Phänomene zu erklären.

Im Lernangebot soll über die stärkere Erwärmung des Behälters mit der Pappe und die Bedeutung der Absorption und Emission von Strahlung auf dunklen im Gegensatz zu reflektierenden Untergrund erklärt werden.

Kasten 9.7: Treibhausexperiment Pappe vs. Folie



Der zweite Teil des Lernangebots besteht aus der Infokarte „Strahlungsspektrum“ und der Aufforderung, die Beobachtungen aus dem Experiment anhand des Spektrums zu erklären.

Die Infokarte zielt auf eine Unterscheidung zwischen Licht- und Wärmestrahlung in den Vorstellungen der Lerner ab. Darüber hinaus kann mit der Beschreibung der UV-Strahlung auch eine stärkere Differenzierung von Treibhauseffekt und Ausdünnung des atmosphärischen Ozons erfolgen.

Kasten 9.8: Infokarte Strahlungsspektrum

Beispiel I: Treibhauseffekt - Von Strahlung zu Licht- und Wärmestrahlung

Vor dem Lernangebot Treibhausexperiment Folie vs. Pappe (Z. 335-370)

Ann-Katrin: Der Behälter mit dem Pappkarton wird wärmer. Die Alufolie reflektiert, die schwarze Pappe absorbiert. Es ist die Frage, ob durch die Alufolie alles reflektiert wird und wieder alles raus kommt.

Während des Lernangebots Treibhausexperiment Folie vs. Pappe (Z. 376-402)

Ann-Katrin: Ich meine, das hat was mit der Dichte und der Größe von CO₂ zu tun. Die Alufolie reflektiert zwar, aber es kommt immer noch ein kleiner Teil durch.

Während des Lernangebots Strahlungsspektrum (Z. 525-543)

Ann-Katrin: Licht wird in Wärme umgewandelt, die Wärme wird wieder an die Umwelt abgegeben. Die schwarze Pappe heizt sich stärker auf als die Alufolie. Somit hat die Pappe Lichtenergie in Wärmeenergie umgewandelt und gibt diese Wärmeenergie jetzt an die Umwelt ab.

Ann-Katrin sagt das Ergebnis des Experiments fachlich angemessen voraus und nutzt auch mit der Reflexion und der Absorption fachlich korrekte Termini: *Pappe absorbiert Strahlung, Folie reflektiert Strahlung*. Unklarheiten bestehen für sie in der Frage, ob es im Behälter mit der Alufolie auch zu einer Erwärmung kommt oder ob die gesamte Strahlung reflektiert wird. Ihre Vorhersagen werden schließlich durch das Lernangebot bestätigt. Die Frage nach der Totalreflexion im Behälter mit der Alufolie wird aufgrund einer leichten Erwärmung des Behälters indirekt negiert.

Durch das Lernangebot Strahlungsspektrum unterscheidet sie schließlich zwischen Licht- und Wärmeenergie. Darüber hinaus beschreibt sie die Rolle der Pappe mit: *Pappe wandelt Licht- in Wärmeenergie um*. Die Pappe gibt die Wärme schließlich wieder an die Umgebung ab: *Pappe gibt Wärmeenergie ab*.

Beispiel II: Ozonloch: Von Strahlung zu Licht- und Wärmestrahlung

Vor dem Lernangebot Treibhausexperiment: Folie vs. Pappe (Z. 335-370)

Raphael: Im Behälter mit der Pappe wird es wärmer als im Behälter mit der Folie: Die Strahlung trifft im Behälter mit der Folie auf und geht nach oben weg, wenn nicht eine Schicht über der Folie ist. Der Behälter mit der schwarzen Pappe reflektiert ziemlich wenig und wird wärmer.

Während des Lernangebots Treibhausexperiment: Folie vs. Pappe (Z. 376-402, 437)

Raphael: Die Temperatur im Behälter mit der Pappe ist gestiegen. Die Wärme im Behälter mit der schwarzen Pappe kommt von der Pappe. Die geringere Wärme im Behälter mit der Alufolie ist verursacht durch das Licht, da entsteht kaum Wärme. Es wird reflektiert und kommt durch das CO₂ ohne Widerstand durch. Es entweicht durch das Ozonloch. Im Behälter mit der schwarzen Pappe kommt die Wärme und es wird oben noch mal nach unten reflektiert.

Während des Lernangebots Strahlungsspektrum (Z. 525-543)

Raphael: Die Alufolie reflektiert alles und absorbiert kaum etwas. Die schwarze Pappe absorbiert mehr Sonnenstrahlung. Dann müsste es im Behälter mit der schwarzen Pappe deutlich wärmer sein als im Behälter mit der Alufolie und nicht nur ein Grad. Bei der Pappe entsteht einfach nur mehr Infrarotstrahlung und wird wieder an die Umgebung abgegeben.

Raphael argumentiert in der Vorhersage der Ergebnisse des Experiments mit den Begriffen Reflexion und Absorption: *Schwarze Pappe speichert Strahlung* und *Folie reflektiert Strahlung* sind die ihn leitenden Konzepte.

Nach dem Lernangebot äußert Raphael die Vorstellungen: *Schwarze Pappe verursacht Wärme, Folie verursacht wenig Wärme, Licht kommt durch CO₂ ohne Widerstand durch, Licht entweicht durch Ozonloch* und *CO₂ reflektiert Wärme nach unten*. Damit äußert Raphael – bis auf die Nennung des Ozonlochs – Konzepte der wissenschaftsorientierten Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT. Obwohl diese Konzepte logisch zur Erklärung ausreichen würden, um die Erwärmung zu erklären, nimmt er das Ozonloch wieder in seine Argumentation auf.

Mithilfe der Infokarte unterscheidet er zwischen Reflexion und Absorption und argumentiert, dass bei der Pappe mehr Sonnenstrahlung in Infrarotstrahlung umgewandelt wird. Die Erwärmung im Behälter mit der Pappe führt er somit auf die Entstehung von IR-Strahlung zurück. Die

Karte hilft ihm somit bei der fachlich angemessenen Bezeichnung seiner Vorstellungen. Das Ozonloch wird nun nicht mehr genannt.

Beispiel III: Elaborierung der Unterscheidung von Licht- und Wärmestrahlung

Vor dem Lernangebot Treibhausexperiment: Folie vs. Pappe (Z. 184-197)

Nina: Im Behälter mit der schwarzen Pappe wird es wärmer sein, weil das CO₂ die Lichtstrahlen nicht zurückwirft, sondern es die Wärme speichert oder sie hindert rauszubrechen.

Während des Lernangebots Treibhausexperiment: Folie vs. Pappe (Z. 208-230)

Nina: Im Behälter mit der Pappe ist es ein Grad wärmer als im anderen. Bei der schwarzen Pappe werden die Strahlen absorbiert und da sind die Lichtstrahlen so geschwächt, dass sie, wenn sie reflektiert werden, zu schwach sind, um diese CO₂-Schicht zu durchbrechen und deswegen bleibt die Wärme dann auch drin.

Während des Lernangebots Strahlungsspektrum (Z. 336-380)

Nina: Licht kommt rein, wird umgewandelt in Wärme und dann abgegeben an die Umgebung. Da wir einen CO₂-Mantel um die Erde haben, bleibt sie drin und erwärmt die Erde.

Nina sagt das Ergebnis des Experiments mit einer stärkeren Erwärmung im Behälter mit der schwarzen Pappe fachlich angemessen voraus. Dabei unterscheidet sie zwischen Licht- und Wärmestrahlung. Sie nutzt die Konzepte: *Schwarze Pappe verursacht Wärme* und *CO₂ speichert Wärme*. Sie nutzt die Termini Licht und Wärme, beschreibt indes keine Umwandlung von Licht in Wärme.

Nach Ablesen der Temperaturen in den Behältern wird sie in ihren Vorhersagen bestätigt. Sie beschreibt die unterschiedlichen Erwärmungen mit der Stärke der Strahlung: *Pappe absorbiert Strahlung*, *Schwaches Licht kann nicht durch CO₂ hindurch*, *Schwaches Licht ist Wärme*. Die durch die Alufolie reflektierte Strahlung ist so stark, dass sie das CO₂ durchdringt, während die Absorption zu einer Schwächung der Strahlung führt, diese vom CO₂ gespeichert wird und so für eine Erwärmung sorgt.

Nach der Auseinandersetzung mit dem Strahlungsspektrum beschreibt sie die Umwandlung von Licht in Wärmestrahlung: *Pappe wandelt Licht in Wärme*. Die Wärmestrahlung kann den CO₂-Mantel der Erde nicht durchdringen. Nina hat durch das Lernangebot somit ihre Vorstellung des Treibhauseffekts mit der Unterscheidung zwischen Licht- und Wärmestrahlung weiter ausdifferenzieren und angemessen bezeichnen können.

Beispiel IV: Von der Reflexion zur Umwandlung von Strahlung

Vor dem Lernangebot Treibhausexperiment Folie vs. Pappe (Z. 359-376)

Egon: Ich finde es logisch, dass im Behälter mit der Alufolie mehr reflektiert wird und die reflektierenden Strahlen dann immer hin und her gehen würden. Somit würde es eigentlich bei der Alufolie wärmer werden. Ich vermute, dass es bei der Alufolie wärmer wird.

Während des Lernangebots Treibhausexperiment: Folie vs. Pappe (Z. 386-407)

Freddi: Im Behälter mit der Pappe ist es viel wärmer.

Egon: Bei der Alufolie wird stärker reflektiert. Wenn wir mehr CO₂ im Behälter mit der Alufolie hätten, wären die Sonnenstrahlen erst gar nicht rein gekommen.

Während des Lernangebots Strahlungsspektrum (Z. 495-503)

Egon: Im Behälter mit der Alufolie wird es reflektiert, da sehen wir das sichtbare Licht auch. Im anderen Behälter sehen wir es nicht, es wird in Wärmestrahlung umgewandelt.

Egon beschreibt eingangs die Vorstellungen: *Folie reflektiert Strahlung* und *Erwärmung durch mehr Reflexion*. Damit käme es im Behälter mit der Folie zur stärkeren Erwärmung. Beim Ableesen der Temperaturen der Behälter sieht Egon seine Vorhersage widerlegt. Er bezeichnet schließlich die eingehende Strahlung für die Erwärmung verantwortlich: *Mehr CO₂ hält Strahlung draußen*. Er unterscheidet somit nicht zwischen Licht- und Sonnenstrahlung.

Die Arbeit mit dem Strahlungsspektrum führt schließlich dazu, dass er zwischen Wärmestrahlung und Lichtstrahlung unterscheidet und die *Umwandlung von Licht in Wärme* als Ursache der Erwärmung sieht. Dabei rekurriert er auf das Konzept *Wärme ist unsichtbar*.

Zusammenfassung

Im Lernangebot Treibhausexperiment Pappe vs. Folie und Strahlungsspektrum werden zwei Aspekte miteinander verknüpft: (1) Die Erfahrung der stärkeren Erwärmung durch einen absorbierenden im Gegensatz zu einem reflektierenden Untergrund und (2) die Unterscheidung zwischen Licht- und Wärmestrahlung anhand eines Strahlungsspektrums. Zusammenfassend zeigen sich folgende Befunde:

- **Das Experiment vermittelt bzw. bestätigt Erfahrung.** Im Experiment erfahren die Lerner die stärkere Erwärmung des Behälters mit der schwarzen Pappe. Dies hilft ihnen entweder, ihre Erwartungen zu bestätigen (Ann-Katrin, Nina) oder aber zu widerlegen (Egon). Bei Lernern wie Egon, die anfangs eine stärkere Erwärmung mit der Alufolie antizipiert haben, führt das Lernangebot zu einer Vorstellungsrekonstruktion von *Starke Reflexion führt zu starker Erwärmung* zu *Absorption führt zu Erwärmung*. Damit wird die Alltagserfahrung bestätigt, dass sich schwarze Untergründe stärker erwärmen als reflektierende.
- **Das Experiment hilft Licht- und Wärmestrahlung zu differenzieren.** Die Erfahrungen aus dem Experiment helfen den Lernern, zwischen der sichtbaren Licht- und der unsichtbaren Wärmestrahlung zu differenzieren. Z. T. haben sie dennoch Schwierigkeiten in der fachlich angemessenen Bezeichnung der Strahlung.
- **Das Strahlungsspektrum hilft bei der Bezeichnung der Licht- und Wärmestrahlung.** Während das Experiment eher der Vermittlung einer Erfahrung diene, zielte die Intervention Strahlungsspektrum auf eine Bezeichnung dieser Erfahrungen und der daraus konstruierten Vorstellungen. Das Strahlungsspektrum hilft den Lernern bei der fachlich angemessenen Bezeichnung ihrer Vorstellungen zur Licht- und Wärmestrahlung. So unterscheiden alle Lerner nach den beiden Angeboten zwischen Licht- und Wärmestrahlung sowie zwischen Reflexions- und Absorptionsprozessen. Ob die Unterscheidung zwischen Licht- und Wärmestrahlung durch Raphael, der wiederholt die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH äußerte, zu einer fachlich angemessenen Erklärung führt, kann in diesem Lernangebot nicht abschließend geklärt werden.

9.4.4 Lernangebot: (Un)Durchlässiges CO₂

Aus den Denkfiguren zum Treibhauseffekt wird deutlich, dass Lerner Schwierigkeiten mit der Unterscheidung von Wärmestrahlung und Sonnenstrahlung auf der einen und den Eigenschaften des Kohlenstoffdioxids auf der anderen Seite haben. Ziel des Lernangebots ist deshalb, den Lernern die Durchlässigkeit des CO₂ für sichtbares Licht und die Undurchlässigkeit für Wärmestrahlung zu vermitteln. Die durch die Analyse der Lernervorstellungen leitende Fragestellung ist:

- Wie beschreiben und erklären die Lerner die unterschiedlichen Temperaturen und gleichen Helligkeiten hinter den Beuteln?



Kurzbeschreibung

Das Experiment besteht aus zwei Beuteln, von denen einer mit Luft und der andere mit CO_2 gefüllt ist. Diese Beutel werden mit einer 200-Watt-Lampe bestrahlt. Hinter den Beuteln wird die Temperatur gemessen und die Helligkeit geprüft. Hinter dem luftgefüllten Beutel kann eine um etwa 1,5 Grad höhere Temperatur gemessen werden, da das CO_2 im anderen Beutel einen Teil der Wärmestrahlung absorbiert. Beide Beutel sind gleich durchlässig für Licht. Nach dem ersten Vermittlungsexperiment mit Olaf wurde mit einem Luxmeter die Helligkeit hinter den Beuteln gemessen.

Die Lerner wurden aufgefordert das Ergebnis vorherzusagen, zu messen und schließlich zu erklären. Erwartet werden nach dem Lernangebot die Vorstellungen: *Luft ist durchlässig für Licht und Wärme* sowie *CO_2 ist durchlässig für Licht und undurchlässiger für Wärme*.

Abbildung 9.12: (Un)Durchlässiges CO_2

Beispiel I: CO_2 reflektiert Licht und Wärme

Vorhersage des Lernangebots (Un)Durchlässiges CO_2 (Z. 389-425)

Olaf: Durch den Beutel mit der Luft kommen mehr Strahlen durch. Beim CO_2 werden mehr Strahlen, egal was für welche, wieder reflektiert oder treffen auf die CO_2 -Moleküle und verlieren dadurch Energie, weil sie die Moleküle eventuell spalten.

Während des Lernangebots (Un)Durchlässiges CO_2 (Z. 419- 472)

Horst: Vielleicht täuschen mich meine Augen, aber die Tüte mit CO_2 sieht etwas dunkler aus.

Olaf: Das Schwarze in der Tüte könnten Kohlenstoffteilchen sein, die da drin rumschweben. Es könnte sein, dass die Wärmestrahlen die CO_2 -Moleküle spalten, und da entsteht Kohlenstoff und Sauerstoff. Das Licht kommt bei beiden Tüten durch. Aber es ist verschieden: Das CO_2 reflektiert beides, aber Wärmestrahlung mehr als das sichtbare Licht.

Olaf vermutet vor dem Lernangebot eine stärkere Durchlässigkeit der luftgefüllten Tüte für Strahlung gegenüber der CO_2 -gefüllten Tüte. Dies führt er darauf zurück, dass CO_2 die Strahlung stärker reflektiert oder durch die Strahlung gespalten wird. Er nutzt somit die Konzepte *Luft ist durchlässiger für Strahlung*, *CO_2 ist undurchlässiger für Strahlung*, *CO_2 reflektiert Strahlung* und *Strahlung spaltet CO_2* . Eine Unterscheidung zwischen Licht- und Wärmestrahlung trifft er zu diesem Zeitpunkt nicht.

Olaf unterscheidet nach der Durchführung des Experiments zwischen Licht- und Wärmestrahlung. So beschreibt er den Beutel mit dem CO_2 als weniger durchlässig für Licht- und Wärmestrahlung. Geleitet von Horsts Beschreibung eines Unterschieds in der unterschiedlichen Durchlässigkeit der Beutel für sichtbares Licht, liefert Olaf zwei Erklärungsansätze: Zum einen reflektiert CO_2 die Licht- und Wärmestrahlung, zum anderen könnten die Wärmestrahlen CO_2 in Kohlenstoff und Sauerstoff gespalten haben. Der als schwarz bezeichnete Kohlenstoff würde schließlich sichtbar. Die fachlich nicht adäquate Vorstellung einer CO_2 -Spaltung durch Wärmestrahlung kann durch die phänomenologische Ausrichtung des Lernangebots in Bezug auf die molekularen Vorgänge nicht verändert werden. Hierfür wären weitere erklärende Lernangebote notwendig, die im Rahmen der Vermittlungsexperimente nicht erprobt wurden.

Die selektive Durchlässigkeit des CO_2 für Lichtstrahlung im Gegensatz zur Wärmestrahlung wurde von Olaf somit nicht erkannt, da er die CO_2 -Tüte als weniger lichtdurchlässig erfasst hat. Einen Erklärungsansatz für diese – nicht adäquate – Wahrnehmung könnte eine durch seine Vorannahmen geleitete Wahrnehmung sein. In den weiteren Vermittlungsexperimenten wurde

schließlich eine Lichtstärkemessung mit einem Luxmeter parallel zur Temperaturmessung durchgeführt, um den Einfluss subjektiver Wahrnehmungen unterschiedlicher Helligkeiten zu minimieren.

Beispiel II: CO₂ ist selektiv durchlässig und absorbiert IR-Strahlung

Vorhersage des Lernangebots (Un)Durchlässiges CO₂ (Z. 431-454)

Max: Beide Tüten sind durchsichtig. Ich erwarte, dass es beim CO₂ wärmer wird.

Während des Lernangebots (Un)Durchlässiges CO₂ (Z. 456-574)

Max: Bei den Tüten sind – bis auf den Inhalt – dieselben Voraussetzungen gegeben. Sichtbares Licht geht durch. Auf den ersten Blick ist es bei der Tüte mit normaler Luft wärmer und mit CO₂ fast um zwei Grad kälter. Das CO₂ absorbiert Infrarotstrahlung. Das würde für die Theorie sprechen, dass es durch die hohe CO₂-Belastung wärmer wird. Kurzwellige Strahlen treten in die Atmosphäre ein, strahlen auf die Erde, langwellige Strahlen werden wieder reflektiert und treten dann wieder in die Atmosphäre. Das CO₂ absorbiert die Wärmestrahlung dann.

Max erwartet eingangs eine höhere Temperatur hinter dem CO₂, ohne dies weiter auszuführen. Er äußert die Vorstellungen: *Luft ist durchlässig für Licht*, *CO₂ ist durchlässig für Licht* und *CO₂ ist durchlässiger für Wärme*.

Nach Ablesen der Temperaturen beschreibt er beide Tüten als lichtdurchlässig. Hinter der Tüte mit dem CO₂ beschreibt er eine niedrigere Temperatur als hinter der luftgefüllten Tüte. Als Erklärung äußert er die Vorstellung *CO₂ absorbiert Wärmestrahlung*.

Zusätzlich überträgt er die Ergebnisse des Modellversuchs aufs Original und beschreibt die Eigenschaften des CO₂ anhand des Erdklimas: Luft ist durchlässig für kurzwellige Strahlen (Licht). Die Wärme wird vom Kohlenstoffdioxid absorbiert und nicht wieder abgegeben. Diese Vorstellung entspricht der wissenschaftlichen Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT. Die Begrenztheit des Modellversuchs, nämlich dass die Lampe Licht- und Wärmequelle gleichzeitig ist, wird von Max nicht erkannt. Vielmehr findet bei ihm eine fachlich angemessene Analogisierung des Gesamtversuchs mit dem Original statt, ohne die einzelnen Bestandteile zu analogisieren.

Beispiel III: Von durchlässigem CO₂ zu selektiver Durchlässigkeit

Vorhersage des Lernangebots (Un)Durchlässiges CO₂ (Z. 561-594)

Raphael: CO₂ ist für mich das Ozonloch und da können die Strahlen einfach mit geringerem Widerstand als durch die Tüte mit Luft durch. Hinter der Tüte mit dem CO₂ wird es wärmer. Mehr Licht, also mehr Strahlung kommt durch.

Während des Lernangebots (Un)Durchlässiges CO₂ (Z. 599-639)

Raphael: Hinter der Luft ist es wärmer. Das Licht ist gleich. Dann ist CO₂ nicht so wärmedurchlässig.

Raphael erwartet aufgrund seiner Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH eine stärkere Erwärmung hinter der Tüte mit dem CO₂, da die Strahlung dort mit weniger Widerstand hindurch dringen kann. Nach dem Experiment unterscheidet er zwischen Licht- und Wärmestrahlung. Er beschreibt eine gleiche Lichtdurchlässigkeit und eine geringere Wärmedurchlässigkeit für CO₂ mit den Konzepten: *CO₂ ist undurchlässiger für Wärme* und *CO₂ ist durchlässiger für Licht*. In der veränderten Nutzung der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH zu Beginn und der anschließenden Nutzung von Konzepten aus der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT sieht er keinen Widerspruch oder aber er formuliert ihn nicht.

Beispiel IV: Von Undurchlässigem CO₂ zu selektiv durchlässigem CO₂

Vorhersage des Lernangebots (Un)Durchlässiges CO₂ (Z. 424-522)

Nina: Aus der Lampe kommen sichtbares Licht und Wärmestrahlung raus. Das sichtbare Licht wird in der Luft besser reflektiert, deswegen ist es hinter der Tüte mit Luft heller. Durch die Tüte mit der Luft geht die Wärme besser durch. Durch die Tüte mit CO₂ kommen sie nicht so durch. Das CO₂ erwärmt sich vielleicht. Die Luft in der Tüte gibt die Wärme besser an die Luft dahinter ab als das CO₂. Hat CO₂ eine größere Dichte als Luft? Ich vermute, dass die Wellen nicht so gut durchkommen und dass es deswegen bei dem CO₂ dunkler ist als bei der Luft. Dann hält die Luft doppelt warm und doppelt sonnig.

Während des Lernangebots (Un)Durchlässiges CO₂ (Z. 543-622)

Nina: Durch beide Tüten geht das Licht gleich durch. Licht kommt rein, aber Wärme nicht raus. Die Wärmestrahlen haben eine längere Wellenlänge. Die können nicht durch die CO₂-Schicht. Die bleiben drin.

Nina unterscheidet zwischen Licht- und Wärmestrahlung. Sie erwartet eine höhere Temperatur und eine höhere Lichtintensität hinter der Tüte mit der Luft (*Luft ist durchlässiger für Wärme, Luft ist durchlässiger für Licht*). Die Lichtdurchlässigkeit führt sie dabei auf eine stärkere Reflexion zurück. Das CO₂ ist ihrer Vorstellung nach weniger durchlässig für Licht und Wärme und speichert die Wärme (*CO₂ ist undurchlässiger für Licht, CO₂ ist undurchlässiger für Wärme, CO₂ speichert Wärme*). Diese Unterschiede diskutiert sie fragend mit der Dichte des CO₂. Auch hier zeigt sich die mangelnde Erklärungsmächtigkeit des Lernangebots auf molekularer Ebene.

Nach Durchführung des Experiments sieht sie sich größtenteils in ihren Vorstellungen bestätigt. Die gleiche Lichtstärke hinter den Tüten lässt sie das Konzept *CO₂ ist undurchlässig für Licht* zu *CO₂ ist durchlässig für Licht* rekonstruieren.

Beispiel V: CO₂ speichert Wärme

Vorhersage des Lernangebots (Un)Durchlässiges CO₂ (Z. 561-594)

Siegbert: Aus der Lampe kommen Licht und Wärme raus. Die Außentemperatur ist hinter der Tüte mit dem CO₂ kälter, weil die Wärme in der Tüte bleibt. Das Licht ist gleich.

Während des Lernangebots (Un)Durchlässiges CO₂ (Z. 599-654)

Siegbert: Die Sauerstofftüte ist gleich durchlässig wie die CO₂-Tüte für Licht. Für Wärme sind sie nicht gleich durchlässig. Die CO₂-Tüte ist für Wärme weniger durchlässig. Das heißt, es muss mehr Wärme in der Tüte mit dem CO₂ gespeichert sein, denn wo soll sie sonst hin gehen? Wir haben herausgefunden, dass CO₂ ein größerer Wärmespeicher ist als O₂.

Siegbert erwartet eine niedrigere Temperatur hinter der Tüte mit dem CO₂, da CO₂ die Wärme speichert: *CO₂ ist undurchlässig für Wärme, CO₂ speichert Wärme*. Für Licht erwartet er bei beiden Tüten die gleiche Durchlässigkeit: *CO₂ ist durchlässig für Licht, Luft ist durchlässig für Licht*. Nach dem Ablesen der Werte sieht er sich in seiner Vorstellung bestätigt und beschreibt die Vorstellungen *Luft ist durchlässig für Licht, Luft ist durchlässig für Wärme, CO₂ ist durchlässig für Licht, CO₂ ist undurchlässiger für Wärme*. Die Ursache beschreibt er als Wärmespeicher CO₂: *CO₂ speichert Wärme*. Darüber hinaus verwechselt Siegbert Luft mit Sauerstoff.

Beispiel VI: Von undurchlässigem CO₂ zu CO₂ speichert Wärme

Vorhersage des Lernangebots (Un)Durchlässiges CO₂ (Z. 511-517)

Egon: Hinter der Tüte mit der Luft wird das Luxmeter höher ausschlagen als bei CO₂.

Freddi: Die Temperatur wird hinter der Tüte mit der Luft auch höher sein, weil das CO₂ nicht so viel durchlassen wird wie die Luft.

Egon: Ja, genau.

Während des Lernangebots (Un)Durchlässiges CO₂ (Z. 525-531)

Egon: Hinter der Tüte mit der Luft ist es wärmer. CO₂ blockiert also gar nicht das sichtbare Licht, sondern einfach nur diese Infrarotstrahlung, nur die Wärmestrahlung.

Egon und Freddi unterscheiden zwischen Licht- und Wärme und erwarten eingangs, dass hinter der Tüte mit der Luft mehr Licht und auch mehr Wärme ankommen (*Luft ist durchlässig für Licht, Luft ist durchlässig für Wärme, CO₂ ist undurchlässiger für Licht, CO₂ ist undurchlässiger für Wärme*).

Nach dem Ablesen der Daten sieht Egon seine Voraussagen in Bezug auf die Lichtdurchlässigkeit des CO₂ nicht bestätigt und revidiert sein Konzept hierzu: *CO₂ ist durchlässig für Licht*. Darüber hinaus formuliert er auch die Vorstellung *CO₂ ist undurchlässiger für Wärme* erneut.

Zusammenfassung

Zusammenfassend lassen sich zu dem Lernangebot folgende Befunde festhalten:

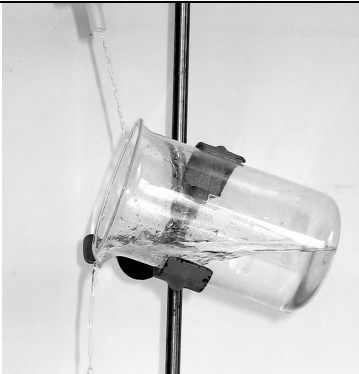
- **Das Lernangebot vermittelt bzw. bestätigt Erfahrung.** Das Lernangebot zielt auf das Erkennen der selektiven Durchlässigkeit von Kohlenstoffdioxid für Licht- und Wärmestrahlung. Es hat somit einen beschreibenden und keinen erklärenden Charakter in Bezug auf die Vorgänge bei der Durchlässigkeit. Abgesehen von Horst und Olaf beschreiben alle Lerner nach dem Lernangebot die selektive Durchlässigkeit des CO₂ für Licht- und Wärmestrahlung bei zum Teil abweichenden Vorannahmen. Einzig Olaf und Horst meinen eine unterschiedliche Lichtdurchlässigkeit der Tüten zu erkennen. Vermutlich ist diese nicht korrekte Wahrnehmung durch ihre Vorannahmen beeinflusst. Die Möglichkeit der subjektiven Wahrnehmung wurde in den folgenden Vermittlungsexperimenten durch die standardisierte Messung der Lichtintensität mit einem Luxmeter minimiert. Allerdings muss hier auf eine schwache Sensibilität des Luxmeters geachtet werden, da ansonsten schon kleinste Änderungen des Messwinkels zu anderen Beleuchtungsstärken führen.
- **Das Lernangebot hilft zwischen Licht- und Wärmestrahlung zu unterscheiden.** Die Messung der Licht- und Wärmedurchlässigkeit lenkt die Aufmerksamkeit der Lerner auf beide Entitäten. So kann die in den vorigen Lernangeboten herbeigeführte Unterscheidung zwischen Licht- und Wärmestrahlung gefestigt werden. Die Umwandlung von Licht- in Wärmestrahlung durch Absorptions- und Emissionsprozesse kann im Lernangebot nicht erfahren werden.
- **Die Eigenschaften des CO₂ werden differenzierter betrachtet.** Bei einigen Lernern (Max, Siegbert) wird in der Vorhersage des Experiments die Vorstellung *CO₂ hat mit Erwärmung zu tun* deutlich. Dem Konzept zufolge, wird eine höhere Temperatur hinter dem mit CO₂ gefüllten Beutel antizipiert. Ein anderes Erklärungsmuster ist die Undurchlässigkeit von CO₂ für sowohl Wärme- als auch Lichtstrahlung (Egon, Nina). Die Widerlegung der Erwartungen lässt die Lerner ihre Vorstellungen rekonstruieren. Typisch ist eine Rekonstruktion der Vorstellungen *CO₂ ist undurchlässig für Licht* zu *CO₂ ist durchlässig für Licht* und *CO₂ ist durchlässig für Wärme* zu *CO₂ ist undurchlässiger für Wärme*.
- **Das Lernangebot kann molekulare Vorgänge nicht erklären.** Die Lerner versuchen zum Teil, die Eigenschaften des CO₂ auf molekularer Ebene zu erklären. Für die Erklärung ist das Lernangebot jedoch nicht aussagekräftig genug. Die von Lernern wie Siegbert, Max und Nina geäußerte Vorstellung *CO₂ speichert Wärme* könnte durch einen weiteren Tempe-

naturfühler in den jeweiligen Beuteln bestätigt werden. Jedoch könnten die Eigenschaften nur mit dem Experiment nach wie vor nicht auf molekularer Ebene erklärt werden. Für eine Erklärung der selektiven Transparenz bedarf es weiterführender Lernangebote, die im Rahmen dieser Studie nicht getestet wurden.

- **Strahlungsrichtungen müssen reflektiert werden.** Das Lernangebot stellt die Eigenschaften des CO₂ in Bezug auf die Transparenz für Licht und Intransparenz für Wärme auf phänomenologischer Ebene angemessen dar. Der von einigen Lernern intuitiv durchgeführte Vergleich der Lampe mit der Sonne und der Beutel mit der Atmosphäre ist jedoch fachlich nicht korrekt: Die Lampe emittiert Licht- und Wärmestrahlung, während die Sonne größtenteils im sichtbaren Spektrum emittiert. Die Wärmestrahlung in der Atmosphäre entsteht durch eine Absorption der Lichtstrahlung durch die Erde und eine Emission von Wärmestrahlung. Letztere wird vom CO₂ absorbiert und re-emittiert (vgl. Kapitel 6.3). Gäbe es diese Absorption nicht, müsste es in den unteren Schichten der Atmosphäre dem Experiment zufolge kälter sein. Hier wäre zukünftig eine stärkere Modellkritik notwendig.

9.4.5 Lernangebot: Fließgleichgewicht

Der Leitlinie »Den Strahlungshaushalt als Gleichgewicht begreifen« folgend wurde ein Lernangebot zur Erfahrung eines Fließgleichgewichts entworfen. Im Lernangebot sollen die Lerner den Wechsel von Gleichgewicht und Ungleichgewicht in den atmosphärischen Strahlungsprozessen anhand der Veränderung der Wärmemenge in der Atmosphäre erfahren.

	<p>Kurzbeschreibung</p> <p>Das Lernangebot besteht aus einem Becherglas, das an einem Stativ befestigt ist. In das Glas fließt im gekippten Zustand Wasser ein und wieder ab. Die Lerner bekamen den Impuls: „Die Wassermenge im Becherglas stellt die Wärmemenge* in der Atmosphäre dar. (1) Beschreibt das Modell. (2) Beschreibt anhand des Modells, was durch den verstärkten CO₂-Ausstoß in der Atmosphäre passiert.“</p> <p>Ziel des Angebots ist das Erkennen eines Strahlungsgleichgewichts zu Beginn, das z. B. durch ein Kippen des Becherglases (analog Erhöhung der CO₂-Konzentration) gestört wird und sich auf höherem Niveau wieder einpendelt.</p>
---	---

Kasten 9.9: Experiment zum Strahlungsgleichgewicht

**Fachlich korrekt stellt die Wassermenge das Analogon der Energiemenge in der Atmosphäre dar. Da es nicht Aufgabe dieses Lernangebots war, zwischen Energie und Wärme als eine Form von Energie, zu unterscheiden, fand hier eine Reduktion auf Wärme als zentralen Aspekt bei der globalen Erwärmung statt.*

Die Analyse des Lernangebots wurde durch folgende Fragestellung geleitet:

- Wie rekonstruieren die Lerner ihre Vorstellungen zum Strahlungsgleichgewicht in der Atmosphäre anhand des Lernangebots?

Beispiel I: Ungleichgewicht durch CO₂

Während des Lernangebots Fließgleichgewicht (Z. 643-704)

Egon: Das Wasser, was in das Glas kommt, ist die Sonnenenergie. Das, was raus fließt, ist die Wärmeenergie, die von der Erde wieder abgeben wird. Wenn das Glas überläuft, kann die Erde keine Wärme mehr aufnehmen. Das Wasser in dem Versuch fließt raus, d.h. die Wärme-

strahlung auf der Erde wird zurück reflektiert. Man könnte sich das so denken, dass das der normale Zustand ist, ohne zu viel CO₂-Ausstoß.

Wenn man jetzt so eine Klappe vor die Öffnung des Glases macht, ist das wie CO₂, das die Wärme drin hält. [Egon kippt das Glas steiler, sodass es sich mit Wasser füllt] Nach dem Kippen des Glases passt viel mehr Wärme rein, also Wasser. Jetzt dauert es länger, bis es überfließt. Wenn nichts raus läuft, entspricht es dem Zustand, in dem CO₂ die Wärmestrahlung blockiert. CO₂ hindert die Wärme daran, aus der Atmosphäre raus zu gehen, sodass die Wärme zurück reflektiert wird und auf der Erde bleibt.

Egon analogisiert das Fließgleichgewicht mit dem Strahlungshaushalt der Erde. Dabei gibt es eine bestimmte Menge Strahlung, die die Erde aufnehmen kann. Wenn diese erreicht ist, würde der Rest abgestrahlt. Er äußert dabei die Vorstellung eines *Strahlungsgleichgewichts* ohne es entsprechend zu bezeichnen. Den CO₂-Ausstoß simuliert er durch ein Kippen des Becherglases: Den voreingestellten Gleichgewichtszustand vergleicht er mit der normalen CO₂-Konzentration. Eine Erhöhung der CO₂-Konzentration hindert die Wärme daran, in den Weltraum zu entweichen und führt so zu einem *Ungleichgewicht*.

Beispiel II: Ungleichgewicht durch mehr CO₂

Während des Lernangebots Fließgleichgewicht (Z. 630-692)

Nina: Wenn das Becherglas halb aufgerichtet ist und gleich viel raus, wie rein fließt, entweicht die Wärme. Irgendwie bleibt das konstant. Wenn wir mehr CO₂ in die Atmosphäre entlassen, wäre das Glas steiler. Die Wärme kann nicht entweichen, also staut sich das Ganze. In einer Atmosphäre ohne CO₂ wäre das Glas umgedreht [deutet das Glas mit Öffnung nach unten an].

Antonia: Dadurch, dass man immer mehr CO₂ kriegt, wird quasi das Glas immer senkrechter, sodass irgendwann gar keine Wärme mehr abgegeben werden kann.

Nina: Also das Fass zum Überlaufen gebracht wird.

Nina konstruiert gemeinsam mit Antonia einen Vergleich zwischen dem Fließgleichgewicht im Modell und dem Strahlungsgleichgewicht der Atmosphäre. Sie beschreibt dabei eingangs einen Gleichgewichtszustand, in dem Zu- und Abfluss identisch sind. Die Wirkung einer erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentration wird mit einem steileren Becherglas verglichen. Dadurch entsteht ein Wärmestau in der Atmosphäre. Damit konstruiert Nina die Vorstellung *Mehr CO₂ führt zu Ungleichgewicht*. Nina beschreibt somit einen Wechsel von Gleichgewicht und Ungleichgewicht, ohne ihn als solchen zu bezeichnen. Eine CO₂-freie Atmosphäre wird von Nina erst mit einem auf dem Kopf stehenden Becherglas verglichen, in dem kein Wasser bleibt, sondern alles einfließende Wasser unmittelbar abfließt. Das durch das CO₂ verursachte Ungleichgewicht führt für Nina schließlich zur Metapher des überlaufenden Fasses: *Zu viel CO₂ führt zu zu viel Wärme in der Atmosphäre*. Diese Vorstellung wird vermutlich durch die Begrenztheit des Modells hervorgerufen, da das Becherglas nur eine bestimmte Menge Wasser fassen kann.

Beispiel III: Verschiebung des Gleichgewichts durch mehr CO₂

Während des Lernangebots Fließgleichgewicht (Z. 927-1005)

Raphael: Wenn gleich viel rein fließt, wie raus fließt, ist das ein Gleichgewicht. Wenn mehr CO₂ auf der Erde ist, deckt diese Schicht die Wärmestrahlung ab und lässt sie nicht wieder zurück. Wenn die Physik es zulässt, wird das Glas immer voller.

[Versuchsleiter kippt das Glas steiler]

Raphael: Wenn man das Glas steiler kippt, so mag die Physik es zulassen. Es wird voller, bis irgendwann wieder ein Gleichgewicht da ist. Ohne CO₂ wäre das Wasserglas fast waagrecht,

ohne Widerstand. Das Gleichgewicht muss nicht unbedingt mit einem schrägen Glas sein. Mit dem waagerechten Glas ist es auch ein Gleichgewicht: Was auftrifft kommt, wieder raus. Mit waagerechtem Glas haben wir null Grad. Wenn es stark senkrecht gekippt ist und die Erde warm ist, ist es auch wieder ein Gleichgewicht.

Raphael analogisiert das Modellexperiment mit den Strahlungsflüssen in der Atmosphäre. Mehr CO₂ in der Atmosphäre bedeutet für ihn ein sich füllendes Glas. Einen Behälter mit identischem Zu- und Abfluss beschreibt er als *Gleichgewicht*. Dabei ist die Behälterstellung und damit die Füllhöhe für ihn nicht entscheidend: Solange Zu- und Abfluss gleich sind, herrscht ein Gleichgewicht. Durch das Kippen des Glases, was mehr CO₂ in der Atmosphäre für ihn symbolisiert, kommt es zu einem *Ungleichgewicht*, bis sich schließlich ein neues Gleichgewicht einstellt. Ohne es als solches zu bezeichnen, beschreibt er die Vorstellung der *Verschiebung eines Gleichgewichts*.

Zusammenfassung

Das Lernangebot „Speicher-Fluss-Experiment“ zielte auf die Vermittlung von Erfahrungen zu Fließgleichgewichten.

- **Becherglas und Atmosphäre sind analogisierbar.** Die Lerner analogisieren das Modellexperiment mit den atmosphärischen Strahlungsprozessen. Dabei wird der Ausgangszustand im Modell als Analogon der Atmosphäre mit einer konstanten CO₂-Konzentration bezeichnet. Das Kippen des Wasserglases stellt für die Lerner die Zunahme der CO₂-Konzentration und die daraus resultierende Zunahme des Wasserstandes eine Zunahme der Wärme in der Atmosphäre dar. Einige Lerner stellen über die gestiegene CO₂-Konzentration hinaus auch eine CO₂-freie Atmosphäre am Modell dar. Damit wäre auch die Bedeutung des natürlichen Treibhauseffekts anhand des Lernangebots mit den Lernern thematisierbar.
- **Lernangebot hilft Gleichgewichtsvorstellungen zu explizieren.** Durch die Erfahrung des Gleichgewichts und Ungleichgewichts der Wasserflüsse im Becherglas explizieren die Lerner die Anwendung des Gleichgewichtsschemas auf die Atmosphäre. Dabei unterscheiden sie zwischen einem Gleichgewicht im Ursprungszustand und der Störung des Gleichgewichts durch eine Zunahme der CO₂-Konzentration.
- **Verschiebung des Gleichgewichts wird nur teilweise erkannt.** Alle Lerner beschreiben einen Zusammenhang des CO₂ mit einem Ungleichgewicht, das schließlich zu einer Zunahme der Wärme in der Atmosphäre führt. Während für Egon die generelle Existenz von CO₂ in der Atmosphäre zu einem Ungleichgewicht führt, führt für Nina die Änderung der CO₂-Konzentration zu einem Ungleichgewicht. Einzig Raphael beschreibt das fachliche Konzept einer *Verschiebung des Gleichgewichts*, das ausdrückt, dass sich auch bei einer höheren CO₂-Konzentration wieder ein neues Strahlungsgleichgewicht einstellt.

9.5 Denkfade zum Treibhauseffekt

Auf Grundlage der Analyse der Vermittlungsexperimente zum Treibhauseffekt ergeben sich Denkpfade der Lerner über mehrere Lernangebote hinweg, die beispielhaft anhand von Egon, Nina und Raphael dargestellt werden. Die Denkpfade sind dabei nach den in Kapitel 9.3 erläuterten Kriterien erstellt.

9.5.1 Egons Denkpfad zum Treibhauseffekt

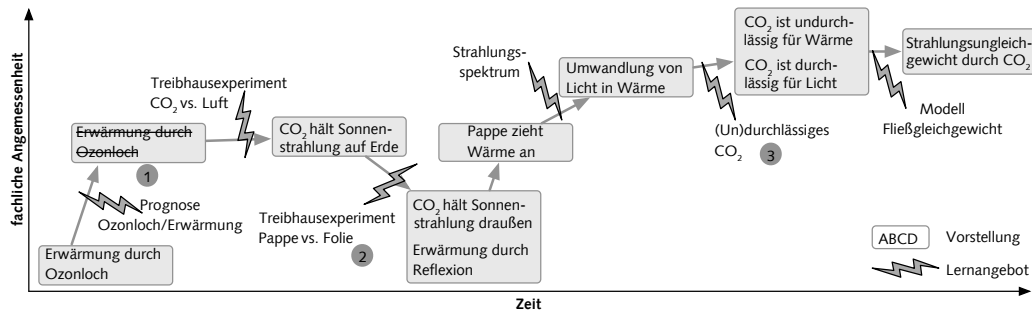


Abbildung 9.13: Egons Denkpfad zum Treibhauseffekt

Egon rekonstruiert im Laufe des Vermittlungsexperiments seine Vorstellungen von ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH zu ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT mit den entsprechenden Konzepten (CO_2 speichert Wärme etc.). Entscheidende Lernfortschritte lassen sich bei Egon durch drei Lernangebote beobachten: (1) Die Differenzierung von Ozonloch und Treibhauseffekt, (2) die Unterscheidung zwischen Licht- und Wärmestrahlung und (3) die Beschreibung der unterschiedlichen Eigenschaften des CO_2 in Bezug auf Licht- und Wärme im Lernangebot (Un)Durchlässiges CO_2 . Dabei war in Lernangebot (2) besonders die fachlich angemessene Bezeichnung der Strahlung anhand des Strahlungsspektrums lernförderlich.

Egon erkennt die Verursachung eines Strahlungsungleichgewichts durch CO_2 , aber nicht das Prinzip einer Verschiebung des Gleichgewichts auf ein höheres Niveau.

9.5.2 Ninas Denkpfad zum Treibhauseffekt

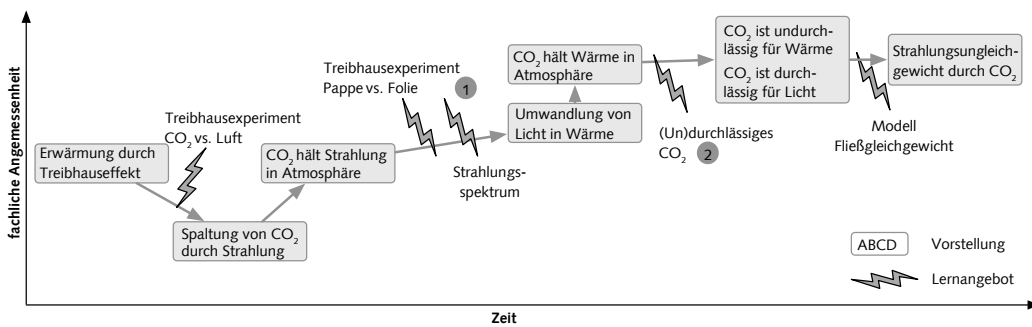


Abbildung 9.14: Ninas Denkpfad zum Treibhauseffekt

Nina äußert schon zu Beginn des Vermittlungsexperiments die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT, jedoch ohne zwischen Licht- und Wärmestrahlung zu differenzieren. Durch (1) Die Unterscheidung zwischen Licht- und Wärmestrahlung im Lernangebot und (2) die Beschreibung der unterschiedlichen Eigenschaften des CO_2 in Bezug auf Licht- und Wärme kommt sie schließlich zu einem sehr wissenschaftsorientierten Verständnis des Treibhauseffekts. Auch Nina beschreibt schließlich ein *Strahlungsungleichgewicht durch mehr CO_2* , jedoch ohne eine Verschiebung des Gleichgewichts zu thematisieren.

10 Zusammenfassung und Diskussion

Im Folgenden werden das Vorgehen und die Ergebnisse dieser Studie zusammengefasst und kritisch reflektiert. Dabei wird auch diskutiert, ob die verwendeten Methoden und Theorien zur Beantwortung der Forschungsfragen beitragen. Darüber hinaus wird erörtert, welche Relevanz diese Untersuchung für den naturwissenschaftlichen Unterricht und die naturwissenschaftsdidaktische Forschung hat.

10.1 Zusammenfassung zentraler Ergebnisse

In dieser Arbeit wurden die Vorstellungen von Wissenschaftlern (Kapitel 6) und Lernern (Kapitel 7) zum Kohlenstoffkreislauf und Treibhauseffekt als zentrale Aspekte des Klimawandels erhoben und mithilfe der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens theoriegeleitet analysiert. Die Vorstellungen der Lerner und Wissenschaftler wurden mit dem Ziel in Beziehung gesetzt, theoriegeleitet Lernangebote zum Klimawandel zu schaffen und zu evaluieren.

10.1.1 Vorstellungen und Vorstellungsentwicklungen zum Kohlenstoffkreislauf

In der Analyse der Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf können vier Denkfiguren beschrieben werden, die allesamt auf das Speicher-Fluss-Schema zurückgreifen, sich aber in der Nutzung weiterer Schemata unterscheiden. Das Speicher-Fluss-Schema kann somit als zentrales Schema zum Verstehen des Kohlenstoffkreislaufs identifiziert werden.

	Künstliches CO ₂	Natürliches und Künstliches CO ₂	Pflanzennahes und -fernes CO ₂	Anthropogenes Ungleichgewicht
Kohlenstoffkreislauf als Speicher-Fluss-Schema	<p>Lerner</p>	<p>Lerner</p>	<p>Lerner</p>	<p>Lerner/Wissenschaftler</p>
Ursache des Klimawandels	Freisetzung von CO ₂	Freisetzung von CO ₂ aus Verbrennung	Freisetzung von CO ₂ aus Verbrennung in pflanzenferne Atmosphäre	Ungleichgewicht durch Verbrennung und Abholzung
genutzte Schemata		Kreislaufschema		
		Start-Weg-Ziel-Schema		
	Natürlich-Künstlich-Schema		Gleichgewichtsschema	

Tabelle 10.1 Zusammenfassung der Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf

In der Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT wird das Gleichgewichtsschema unterschiedlich elaboriert genutzt: Das häufigste Konzept ist *Zusätzlicher Kohlenstofffluss durch Verbrennung*. Bei den Wissenschaftlern und z. T. auch bei den Lernern lassen sich zusätzlich die Konzepte *Höhere Flussrate durch Abholzung* und *Verringerte Rückflussrate durch Abholzung* finden (vgl. Kapitel 6.3.5 und 7.3.4). Die Wissenschaftler beschreiben über die Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT weitere Aspekte des Kohlenstoffkreislaufs im Rahmen des Klimawandels mit den Denkfiguren ERDGESCHICHTLICHES UNGLEICHGEWICHT, VORINDUSTRIELLES GLEICHGEWICHT und REAGIERENDER KOHLENSTOFFKREISLAUF.

Das in der Reanalyse des Stands der Forschung beschriebene Konzept ERWÄRMUNG DURCH VERSCHMUTZUNG (vgl. Kapitel 3.1.3) konnte bei den Lernern in dieser Studie nicht bestätigt werden. Zwar machen viele Lerner eine Verschmutzung und Abgase für den Klimawandel verantwortlich, jedoch immer in Beziehung mit der Emission von CO₂. Die Verschmutzung spielt für die Lerner und Wissenschaftler in dieser Arbeit eine Rolle als Quellbereich, um den Klimawandel als Umweltproblem zu begreifen.

Aufgrund des lernerzentrierten Untersuchungsdesigns war es möglich, die in Kapitel 3.1.5 reanalysierten Vorstellungen zur CO₂-Freisetzung aus anderen empirischen Untersuchungen detaillierter zu beschreiben. Die Interpretation mithilfe der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens erlaubte darüber hinaus eine Analyse der Quellen der Vorstellungen und damit eine theoriegeleitete Kategorisierung der Vorstellungen.

Auf Grundlage der analysierten Vorstellungen der Lerner konnten verschiedene von Wissenschaftlern zur Vermittlung des Kohlenstoffkreislauf genutzte Metaphern auf ihre lernhinderlichen und lernförderlichen Aspekte ausgewertet und bewertet werden.

In der Didaktischen Strukturierung wurden aus einem Vergleich der Lerner- und der Wissenschaftlervorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf folgende Leitlinien zur Vermittlung des Kohlenstoffkreislaufs herausgearbeitet:

Leitlinien zur Vermittlung des Kohlenstoffkreislaufs im Rahmen des Klimawandels

1. Kohlenstoff als natürlichen Bestandteil der Atmosphäre begreifen
2. Den Kohlenstoffkreislauf als Speicher-Fluss-Schema erkennen
3. Die Anwendung des Natürlich-Künstlich-Schema reflektieren
4. Die globale Erwärmung auf veränderte Kohlenstoffflüsse zurückführen

Diese Leitlinien wurden in Lernangeboten umgesetzt und formativ evaluiert. Dabei fokussierten die Lernangebote auf eine Restrukturierung von Vorstellungen: Der Vergleich der Vorstellungen von Wissenschaftlern und Lernern zeigt, dass beide Gruppen häufig auf die gleichen Schemata zum Verstehen des Klimawandels rekurren. Unterschiede zeigen sich in der Differenziertheit der Übertragung dieser Schemata auf den Zielbereich Kohlenstoffkreislauf. Die Lernangebote fokussierten deshalb darauf, die Lerner in einer fachlich angemessenen Konzeptualisierung der jeweiligen Schemata beim Verstehen des Klimawandels zu unterstützen.

Die Analyse der Vorstellungen von Wissenschaftlern und Lernern mithilfe der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens hilft dabei, Lernangebote zu gestalten, die die Vorstellungen der Lerner nicht nur als Ausgangspunkt, sondern als Grundlage für das Lernen zum Klimawandel nehmen. In den Vermittlungsexperimenten zum Kohlenstoffkreislauf wird der Ansatz verfolgt, das von den Lernern genutzte Speicher-Fluss-Schema in einem Modell zu explizieren. So können sie die Nutzung dieses Schemas erfahren und anhand der Erfahrungen die Übertragung auf den Zielbereich Kohlenstoffkreislauf reflektieren. Mithilfe verschiedener Lernangebote können so unterschiedliche Aspekte des Speicher-Fluss-Schemas, wie auch des Natürlich-Künstlich-Schemas rekonstruiert werden. Zum Kohlenstoffkreislauf werden folgende Lernangebote entwickelt und evaluiert:

- Der Kohlenstoffkreislauf im Speicher-Fluss-Modell**
 Die Modellierung des Kohlenstoffkreislaufs mit Behältern und Kugeln hilft Lernern, ihre Anwendung des Speicher-Fluss-Schemas auf den Kohlenstoffkreislauf zu reflektieren. So können sie die Elemente des Schemas (Speichergröße, Flussrate, Ursache des Flusses) voneinander scheiden und die Ursachen des Klimawandels fachlich angemessen verstehen. Als verständnisförderlich erwies sich dabei, dass die Lerner ihre eigenen Vorstellungen mithilfe gestifteter Erfahrungen reflektieren können.
- Das Natürlich-Künstlich-Schema im Speicher-Fluss-Modell**
 Mit dem Lernangebot können Vorstellungsentwicklungen von *Künstliches CO₂* über *Künstliche Kohlenstoffflüsse* hin zu *Künstliche Ursachen des Kohlenstoffflusses* und somit von der ontologischen Kategorie Stoff über den Prozess hin zur Ursache initiiert werden. Dabei unterstützt insbesondere die Darstellung der Kohlenstoffflüsse auf Teilchenebene in einem narrativen Kontext die Lerner bei der Einordnung der Ursachen des Klimawandels.
- Anwendung des Speicher-Fluss-Schemas: Abholzung des Regenwalds**
 Die Arbeit mit dem Speicher-Fluss-Modell hilft den Lernern dabei, sich die Einflüsse der Umwandlung von Regenwaldflächen in Ackerland vorzustellen. Dabei ist insbesondere die wiederholte Erfahrung des Speicher-Fluss-Schemas am Modell für einige Lerner notwendig um die Auswirkungen der Abholzung zu verstehen.

10.1.2 Vorstellungen und Vorstellungsentwicklungen zum Treibhauseffekt

Die Analyse der Vorstellungen zu den Mechanismen der globalen Erwärmung zeigt, dass Wissenschaftler wie Lerner die Atmosphäre als Behälter imaginieren. Unterschiede zwischen den verschiedenen Denkfiguren zeigen sich in den beteiligten Strukturen der Atmosphäre, der zur Erwärmung führenden Strahlung und dem Gleichgewichtsschema:

	ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH		ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT		
Variante	mehr Sonnenstrahlen 	Strahlenfalle 	Sonnenstrahlen 	Wärmestrahlen 	Treibhausatmosphäre
Speicher-Fluss-Schema	Behältergrenze	Ozon ist Behälterwand	CO ₂ ist Behälterwand		CO ₂ füllt Behälter
	Eigenschaften der Behältergrenze	CO ₂ zerstört Behälterwand	Durchlässigkeit von CO ₂ ist abhängig von Strahlungsrichtung	Durchlässigkeit von CO ₂ ist abhängig von Strahlungsart	
	beteiligte Strahlung	Sonnenstrahlen			Wärmestrahlen
	Verhalten der Strahlung		Reflexion	Umwandlung	
Gleichgewichtsschema	Erwärmung durch mehr Einstrahlung	Erwärmung durch weniger Abstrahlung		Erwärmung durch neues Gleichgewicht	

Tabelle 10.2 Zusammenfassung der Vorstellungen zum Treibhauseffekt

In dieser Untersuchung konnten zwei übergreifende Denkfiguren zu den Mechanismen der globalen Erwärmung gefunden werden: ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH und ERWÄRMUNG

DURCH TREIBHAUSEFFEKT. Eine detaillierte Analyse auf Grundlage der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens zeigt, dass die Denkfiguren in fünf Varianten auftreten, in denen dem CO₂ unterschiedliche Eigenschaften von *aggressiv* über *einseitig durchlässig* zu *selektiv durchlässig* zugeschrieben werden. Die Varianten der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT sind unterschiedlich komplex strukturiert: Die Unterscheidung zwischen Licht- und Wärmestrahlung findet sich nur in elaborierten und sehr selten von Lernern genutzten Varianten der Denkfigur statt. Die Vorstellung eines verschobenen Strahlungsgleichgewichts konnte nur bei Wissenschaftlern gefunden werden. Unterschiede zeigen sich auch in Beschreibung der Position des CO₂: Die Vorstellung einer Treibhausatmosphäre ist den Wissenschaftlern eigen. Eine Treibhausgasschicht wird jedoch z. T. auch von Wissenschaftlern imaginiert, allerdings verknüpft mit der Vorstellung eines verschobenen Strahlungsgleichgewichts und nicht eines absoluten Ungleichgewichts um Strahlungshaushalt, wie es von den Lernern beschrieben wird.

Die Denkfiguren gründen sich in einer unterschiedlichen Nutzung des Gleichgewichtsschemas: In der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH kommt es zu einer vermehrten Einstrahlung und in der Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT zu einer verringerten Abgabe von Strahlung in den Weltraum. Dabei ist die Vorstellung der Lerner, die eines *kontinuierlichen Strahlungsgleichgewichts*: Solange ein Loch in der Ozonschicht ist, gelangt mehr Strahlung in die Atmosphäre bzw. solange die Treibhausgasschicht dicker ist als im Ausgangszustand, wird mehr Strahlung eingefangen. Wissenschaftler hingegen argumentieren mit einer *Verschiebung des Strahlungsgleichgewichts*. Letztere Vorstellung hat eine nur schwer zugängliche lebensweltliche Erfahrungsbasis, was ihre ausschließliche Nutzung durch Wissenschaftler erklärt.

Die Analyse der Vorstellungen auf Grundlage der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens zeigt darüber hinaus, dass der Treibhauseffekt und das Ozonloch den gleichen frame aktivieren und deshalb häufig hybridisiert werden (vgl. Kapitel 7.4.3).

Die in anderen empirischen Untersuchungen gefundenen Vorstellungen (z. B. *Wärme aus Vulkanausbrüchen*, *Wärme aus Fabriken und Städten erwärmt die Erde*, *Erwärmung durch wärmere Sonne*) konnten in dieser Untersuchung nicht bestätigt werden. Diese Vorstellungen lassen sich jedoch auch in die in dieser Studie herausgearbeitete Erfahrungsbasis *Erwärmung durch mehr Einstrahlung* einordnen, da auch hier *mehr Wärme* in die Atmosphäre freigesetzt wird, allerdings aus Vulkanen, Städten oder durch eine wärmere Sonne. Damit liefern die Ergebnisse dieser Arbeit auch Ansätze zum Verstehen der Ergebnisse anderer empirischer Untersuchungen in diesem Bereich.

Auf Grundlage der analysierten Vorstellungen der Lerner konnten auch zum Treibhauseffekt verschiedene von Wissenschaftlern zur Vermittlung genutzte Metaphern auf ihre lernhinderlichen und lernförderlichen Aspekte ausgewertet und bewertet werden.

Leitlinien zur Vermittlung des Treibhauseffekts

1. Ozonloch und Treibhauseffekt unterscheiden
2. Treibhausgase speichern Wärme
3. Aus Sonnenstrahlung wird Wärmestrahlung
4. CO₂ ist durchlässig für Licht- und undurchlässig für Wärmestrahlung
5. Die Atmosphäre als Kontinuum begreifen
6. Den Strahlungshaushalt als Gleichgewicht begreifen

Diese Leitlinien wurden in Lernangeboten umgesetzt und evaluiert. Die Lernangebote zum Treibhauseffekt zielen auf die Vermittlung von Erfahrungen, die die Lerner bei der Entwicklung eines fachlich angemessenen Verständnisses der Strahlungsflüsse in der Atmosphäre unterstützen. Dabei werden ihnen über Experimente ihren Vorstellungen adäquate Erfahrungen (z. B. zur Unterscheidung von Licht- und Wärmestrahlung) ermöglicht und diese (z. B. anhand eines Strahlungsspektrums) fachlich angemessen bezeichnet. Zum Treibhauseffekt wurden folgende Lernangebote entwickelt und evaluiert:

- **Prognosen für die globale Erwärmung und das Ozonloch**
Der Vergleich der Prognosen der globalen Erwärmung und der Größe des Ozonlochs führt bei Lernern, die über die Denkfigur ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH verfügen aufgrund der nicht ihren Erwartungen entsprechenden Daten über einen kognitiven Konflikt zu einer Unzufriedenheit mit ihrer bisherigen Vorstellung. Diese Unzufriedenheit wird aufgelöst, indem die ursprüngliche Vorstellung abgelehnt, die Gültigkeit der Daten hinterfragt oder die ursprüngliche Vorstellung erweitert wird.
- **Treibhausexperiment mit CO₂ vs. Luft**
Das Lernangebot hilft, CO₂ als Ursache der globalen Erwärmung zu erkennen. Lerner, die über die Vorstellung ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH verfügen, geraten in einen kognitiven Konflikt, wenn sie erkennen, dass an dem Modellversuch kein Ozon beteiligt ist. Hierfür bedarf es z. T. Hilfestellungen.
- **Treibhausexperiment mit Folie vs. Pappe**
Die Erfahrungen aus dem Experiment helfen, zwischen sichtbarer Licht- und unsichtbarer Wärmestrahlung bzw. der Absorption und Emission zu differenzieren. Für eine fachlich angemessene Bezeichnung der entsprechenden Vorstellungen ist darüber hinaus oft die Abbildung eines Strahlungsspektrums notwendig.
- **(Un)Durchlässiges CO₂**
Das Lernangebot lässt die selektive Durchlässigkeit von Kohlenstoffdioxid für Licht- und Wärmestrahlung erfahren. In der Regel erfolgt eine Rekonstruktion der Vorstellungen *CO₂ ist undurchlässig für Licht* zu *CO₂ ist durchlässig für Licht* und *CO₂ ist durchlässig für Wärme* zu *CO₂ ist undurchlässig für Wärme*. Für eine Erklärung der selektiven Durchlässigkeit sind z. T. weiterführender Lernangebote notwendig.
- **Fließgleichgewicht**
Durch die Erfahrung des Gleichgewichts und Ungleichgewichts der Wasserflüsse im Becherglas kann die Anwendung des Gleichgewichtsschemas auf die Atmosphäre expliziert werden. In der Regel unterscheiden die Lerner dabei zwischen einem Gleichgewicht im Ursprungszustand und der Störung des Gleichgewichts durch eine Zunahme der CO₂-Konzentration. Das fachliche Konzept einer Verschiebung des Gleichgewichts wird nur vereinzelt erkannt.

Die Lernangebote konnten anhand von Vermittlungsexperimenten prozessbasiert evaluiert werden. Dabei wurden die Vorstellungsentwicklungen anhand von Denkpfeilen nachvollzogen. Mithilfe der Denkpfeile konnten Möglichkeiten und Grenzen von Lernangeboten evidenzbasiert aufgezeigt werden: So ist es aufgrund des prozessbasierten Vorgehens möglich zu beschreiben, ob ein Lernangebot den gewünschten Lernerfolg unterstützen kann und auch, warum es das kann.

10.2 Reflexion des theoretischen Rahmens

Der theoretische Rahmen der Untersuchung wird von insgesamt drei unterschiedlichen, jedoch miteinander in Beziehung stehenden Perspektiven aufgespannt (Kap. 2): den konstruktivistischen Grundlagen des Lernens, dem Conceptual-Change-Ansatz sowie der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens. Hier soll die Frage geklärt werden, inwiefern die theoretischen Ansätze zur Beantwortung der Forschungsfragen beitragen und die Ergebnisse anderer Untersuchungen in diesem Gebiet weiterführen können.

10.2.1 Der Konstruktivismus als Ausgangspunkt dieser Studie

Die konstruktivistischen Grundlagen des Lernens werden als Basis für die Gestaltung von Lernangeboten, aber auch für die Analyse von Lernervorstellungen genommen. Leitend sind somit Fragen danach, wie die individuelle Konstruktion von Vorstellungen stattfindet und wie sie unterstützt werden kann. Es wurde deshalb ein Untersuchungsdesign mit Analysemethoden gewählt, das eine prozessorientierte Untersuchung und damit das Nachverfolgen der Vorstellungsentwicklungen von Lernern ermöglicht.

Auch die Gestaltung der Lernangebote gründet sich auf den aus dem Konstruktivismus abgeleiteten Grundsätzen für das Lehren und Lernen, indem die vorunterrichtlichen Vorstellungen der Lerner für die Planung von Lernangeboten berücksichtigt werden (Widodo & Duit 2005). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion bietet hierfür einen erprobten Forschungsrahmen: Ausgehend von den aufgearbeiteten Lerner- und Wissenschaftlervorstellungen, werden Sequenzen von Lernangeboten geplant, um Lerner beim Lernen zu unterstützen. Es werden dabei mögliche Denkpfade antizipiert, die die Lerner in ihrem Lernen zu einem wissenschaftlicheren Verständnis des Klimawandels einschlagen können. Dies sind jedoch keine fertigen Wege. Vielmehr werden eher Wegweiser aufgestellt, die die Lerner abhängig von ihren aktuellen Vorstellungen weiter in Richtung fachlich angemessener Vorstellung leiten sollen. Dieses Vorgehen ist angelehnt an die Entwicklung der „hypothetical learning trajectories“, wie sie Simon (1995) und Mousley et al. (2004) als Folgerung aus dem Konstruktivismus für die Gestaltung von Lernumgebungen vorschlagen.

In der vorliegenden Untersuchung werden aufgrund der prozessbasierten Analyse die Denkpfade der Lerner aus den Vermittlungsexperimenten untersucht und so die Lernwirksamkeit der entwickelten Lernangebote evaluiert. Außerdem werden Abweichungen von antizipierten Vorstellungsentwicklungen diskutiert und Vorschläge für eine Weiterentwicklung der Lernangebote gemacht.

10.2.2 Nutzung der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens

Die Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens ermöglicht es, die Vorstellungen der Lerner und Wissenschaftler auf ihre Quellen hin zu untersuchen. So können insbesondere bei den Lernervorstellungen zum Treibhauseffekt die Ergebnisse bisheriger Studien bestätigt und aus der Theorie heraus tiefer gehend analysiert werden. Die damit gewonnene Klarheit über die Erfahrungsbasis auf der die Lerner – und Wissenschaftler – ihre Vorstellungen gründen, erlaubt so die Erklärung der Genese der Vorstellungen. Damit können mögliche Lernhürden prognostiziert und Lernangebote entsprechend dieser Lernhürden konzipiert werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden so theoriegeleitet Lernangebote entwickelt. Die Lernangebote intendieren entweder eine Reflexion von Vorstellungen aufgrund bereits vorhandener Erfahrungen, wie z. B. im Falle der Arbeit mit dem „Speicher-Fluss-Modell“ zur Reflexion des zur Erklärung des Kohlenstoffkreislaufs genutzten Speicher-Fluss-Schemas. Oder aber die Lernangebote zielen auf die Vermittlung von Erfahrungen und damit der Erarbeitung neuer Vorstellungen, wie z. B. bei der Erarbeitung der unterschiedlichen Eigenschaften von CO₂ im Lernangebot „(Un)Durchlässiges CO₂“ ab.

So konnte das Speicher-Fluss-Schema als Basis der Vorstellungen von Wissenschaftlern und Lernern beim Verstehen des Treibhauseffekts mit den grundlegenden Denkfiguren ERWÄRMUNG DURCH MEHR EINSTRAHLUNG und ERWÄRMUNG DURCH WENIGER ABSTRAHLUNG ausgemacht werden. Bei den Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf zeigte die Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens, dass auch Lerner mit den sehr wissenschaftsfernen Denkfiguren KÜNSTLICHES CO₂ und NATÜRLICHES UND KÜNSTLICHES CO₂ auf die gleichen Schemata zurückgreifen wie die Wissenschaftler. Unterschiede zeigen sich in der Nutzung und Konzeptualisierung der

Schemata. Die Analyse des erfahrungsbasierten Hintergrunds der Vorstellungen ermöglichte so die Unterstützung der Lerner bei der Rekonstruktion ihrer Vorstellungen.

10.2.3 Umsetzung des Conceptual Change Ansatzes in der Studie

Die Conceptual Change Forschung zeigt verschiedene Aspekte auf, die helfen können, eine stellungsveränderung herbeizuführen. Dabei spielen die Kriterien Unzufriedenheit, Verständlichkeit, Plausibilität und Furchtbarkeit für eine Weiterentwicklung von Vorstellungen eine wichtige Rolle (vgl. Kapitel 2.3).

Unzufriedenheiten mit den bisherigen Vorstellungen wurden in der Regel über die Initiierung eines kognitiven Konflikts erzeugt. Besonders die Lernangebote „Vergleich der Prognosen zu globaler Erwärmung und dem Ozonloch“ und „Geschichte eines Kohlenstoffteilchens“ führten Lerner in eine Unzufriedenheit mit ihren bisherigen Vorstellungen. Diese Unzufriedenheit wird jedoch nicht unbedingt durch ein Umlernen aufgelöst: Meist werden zwar die ursprünglichen Vorstellungen abgelehnt, aber es werden nicht automatisch neue Vorstellungen geäußert. So bestätigt sich der von Chinn und Brewer (1993) beschriebene Befund, dass Lerner, die in einen kognitiven Konflikt geraten häufig die Gültigkeit der Daten hinterfragen oder ihre ursprüngliche Vorstellung erweitern. Selbst wenn der kognitive Konflikt vom Lerner erlebt und verstanden wird, führt dies nicht zu einem automatischen Umlernen. Eher ist mit graduellen Veränderungen zu rechnen (vgl. Limon 2001).

In weiteren Lernangeboten wurden den Lernern verschiedene Erfahrungen anhand von Experimenten ermöglicht, die an ihre Alltagserfahrungen anknüpfen. Wenn ein Lerner auf Grundlage der Erfahrung die Phänomene nicht fachlich angemessen bezeichnen konnte, wurden weitere, die fachlich angemessene Bezeichnung unterstützende Lernangebote eingesetzt. Die von Posner et al. (1982) bzw. Strike und Posner (1992) formulierten Kriterien für eine zu vermittelnde Vorstellung (Verständlichkeit, Plausibilität, Furchtbarkeit) waren dabei nur bedingt für das in dieser Studie angewandte Vorgehen adaptierbar: Der Ansatz der Lernangebote zielte in der Regel nicht auf eine Vermittlung von Vorstellungen, sondern auf das Ermöglichen von verstehensförderlichen Erfahrungen. Diese Erfahrungen halfen den Lernern, eigene Vorstellungen zu konstruieren. Dabei ist davon auszugehen, dass sie nur solche Vorstellungen konstruierten, die für sie verständlich und damit plausibel sind. Die in dieser Studie gestifteten Erfahrungen wurden so gewählt, dass sie an die vorunterrichtlichen Vorstellungen der Lerner anknüpfen und diese erweitern (z. B. Modellierung des Kohlenstoffkreislaufs zur Reflexion des vorher schon genutzten Speicher-Fluss-Schemas oder die Ausschärfung der Vorstellungen zur Licht- und Wärmedurchlässigkeit im Lernangebot (Un)Durchlässiges CO₂).

Aus konstruktivistischer Perspektive sollten Kriterien für einen Conceptual Change somit in erster Linie auf zu stiftende Erfahrungen hin formuliert werden. Zuvörderst wäre dabei das Anknüpfen an bereits gemachte Erfahrungen zu nennen: Die den Lernern zu vermittelnden Erfahrungen sollten an bereits vorhandene Erfahrungen und daraus resultierende Vorstellungen anknüpfen. Dies bedeutet nicht, dass nur Alltagserfahrungen vermittelt werden sollten. Auch wissenschaftliche Erfahrungen können ein Anknüpfen an vorhandene Vorstellungen leisten. Sie sollten jedoch vorhandene Vorstellungen aufgreifen um diese für den Lernprozess zu nutzen.

10.3 Reflexion des methodischen Vorgehens

Die in diesem Abschnitt stattfindende Reflexion des methodischen Vorgehens dient der Qualitätssicherung. Dabei soll das methodische Vorgehen entsprechend Standards der Lehr-

Lernforschung im Bereich des design based research und den in Kapitel 7.2.2 beschriebenen Gütekriterien qualitativer Sozialforschung reflektiert werden.

10.3.1 Dokumentation des methodischen Vorgehens

Die Gruppe um Collins schlägt zur Qualitätssicherung von Studien im Bereich des design based research die Dokumentation von fünf Aspekten vor, an denen im Folgenden die Durchführung dieser Studie reflektiert wird (Collins et al. 2004, S. 38f.):

- **Beschreibung der Ziele und des Designs der Untersuchung:** Die Ziele der vorliegenden Studie wurden als „evidenzbasierte und theoriegeleitete Entwicklung von Lernangeboten zu zentralen Aspekten des Klimawandels“ klar benannt. Mit der Didaktischen Rekonstruktion wurde ein bewährtes Untersuchungsdesign zur Entwicklung der Lernangebote herangezogen.
- **Beschreibung der Vermittlungsexperimente:** Der Verlauf der einzelnen Vermittlungsexperimente ist in den Transkripten dokumentiert und in Kapitel 10 analysiert, um Variationen im Verlauf transparent zu machen. Die formative Evaluation der Lernangebote wurde ebenso deutlich gemacht, wie auch spontane Interventionen des Versuchsleiters und der Lerner im Vermittlungsexperiment. Darüber hinaus sind Rahmenbedingungen, wie die Beschreibung der Untersuchungsgruppe, die Durchführung und Analysemethoden, transparent gemacht.
- **Beschreibung der Lernangebote:** Die aus der didaktischen Strukturierung (Kapitel 8) entwickelten Leitlinien wie auch die Lernangebote zur Vermittlung des Klimawandels werden theoriegeleitet entwickelt und beschrieben. Die in den Vermittlungsexperimenten erprobten Lernangebote sind inklusive der in der formativen Evaluation vorgenommenen Modifikationen dokumentiert.
- **Beschreibung der Ergebnisse einzelner Lernangebote:** Die in dieser Untersuchung erprobten Lernangebote werden einzeln auf ihre Lernwirksamkeit hin untersucht (Kapitel 9). Die Vorstellungsentwicklungen während der Arbeit mit den Lernangeboten sind theoriegeleitet analysiert. Es können somit Mikrodenkpfade der Lerner über ein einzelnes Lernangebot (vgl. Kapitel 9.3) oder über ein ganzes Vermittlungsexperiment hinweg (vgl. Kapitel 9.5) erstellt werden.
- **Zusammenführung der Ergebnisse:** Die Ergebnisse der Vorstellungsentwicklungen in den einzelnen Vermittlungsexperimenten werden in der Evaluation eines jeden Lernangebotes zusammenführend diskutiert. Dabei sind im Rahmen einer formativen Evaluation schon während der Vermittlungsexperimente Modifikationen vorgenommen und dokumentiert worden. Gegebenenfalls wurden weitere Vorschläge zur Modifikation gemacht.

10.3.2 Das Vermittlungsexperiment in der Didaktischen Rekonstruktion

Mit dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion liegt ein erprobter Forschungsrahmen zur Entwicklung von Lernangeboten vor. Dieser ermöglicht ein methodisch kontrolliertes Vorgehen sowohl innerhalb der einzelnen Untersuchungsaufgaben als auch beim Vergleich der Ergebnisse aus den einzelnen Untersuchungsteilen. Den üblichen Rahmen von Untersuchungen im Bereich des design based research ausweitend, wird in der Didaktischen Rekonstruktion auch ein kritischer Blick auf die Perspektiven von Wissenschaftlern auf den Klimawandel gerichtet und diese nicht vorbehaltlos als Grundlage für das Lehren übernommen. Besonders die in Kapitel 8.3 und

8.5 analysierten Metaphern und Analogien der Wissenschaftler zeigen, dass eine Analyse von fachlichen Quellen aus fachdidaktischer Perspektive hilfreiche Hinweise dafür geben kann, wie Inhalte sinnvoll vermittelt werden können – und mit welchen Sprachbildern sie nicht bzw. nur sehr vorsichtig vermittelt werden sollten. Die Lernervorstellungen werden dem Modell und den theoretischen Grundlagen dieser Untersuchung folgend für sich ernst genommen und analysiert. Erst die Analyse der Lernervorstellungen als solche, die nicht als Messung an den Wissenschaftlervorstellungen orientiert ist, ermöglichte eine anschließende vergleichende Betrachtung der Lerner- und der Wissenschaftlerperspektive.

In der Didaktischen Strukturierung erfolgt eine transparente und damit nachvollziehbare Erarbeitung von Leitlinien und daraus abgeleiteten Lernangeboten für die Vermittlung zentraler Aspekte des Klimawandels. Letztere wurden in Vermittlungsexperimenten evaluiert und optimiert, sodass als Ergebnis Lernangebote zur Verfügung stehen, die methodisch kontrolliert und theoriegeleitet entstanden sind.

Wie bei Steffe (1996) und Riemeier (2005) erwiesen sich Vermittlungsexperimente auch in dieser Studie als geeignete Methode zur prozessbasierten Erhebung von Lernprozessen. Dabei konnten in Interviewphasen Vorstellungen und in Vermittlungsphasen deren Veränderungen erfasst werden. Das Vermittlungsexperiment ermöglichte es den Lernergruppen, ihre eigenen Vorstellungen unabhängig vom Versuchsleiter zu diskutieren und sie dadurch zu reflektieren. Mit den Vermittlungsexperimenten werden in dieser Untersuchung Erkenntnisse über das Lernen zum Klimawandel anhand didaktisch rekonstruierter Lernangebote gewonnen. Durch die Grupsituationen in den Vermittlungsexperimenten konnte eine unterrichtsnahe Atmosphäre geschaffen werden.

Die vorliegende Untersuchung besteht aus zwei empirischen Teilstudien: (a) einer Interview- bzw. Literaturstudie zur Erhebung der Lerner- bzw. Wissenschaftlervorstellungen (Kapitel 6 und 7) und (b) einer Interventionsstudie zur Entwicklung und Evaluation von Lernangeboten zur Vermittlung des Klimawandels (Kapitel 8 und 9). Diese Unterteilung war sinnvoll und notwendig, da die Analyse vorliegender empirischer Untersuchungen über Lernervorstellungen nur eine unzureichende Grundlage für die theoriegeleitete Analyse dieser Vorstellungen geliefert hätte: Zum einen wurde in der Reanalyse empirischer Untersuchungen (Kapitel 3) eine starke Fokussierung bisheriger Studien auf den Treibhauseffekt deutlich. Zum anderen basierten diese Studien zum Großteil auf vorgegebenen Items. Dabei kann nicht unterschieden werden, inwiefern Lerner schon vor der Absolvierung eines Fragebogens über eine bestimmte Vorstellung verfügten oder ob diese erst durch die vorgegebenen Items induziert bzw. nach Plausibilität aus den vorhandenen Antwortmöglichkeiten ausgewählt wurde. Um Aussagen über die Vorstellungen von Lernern und vor allem auch über die Quellen ihrer Vorstellungen treffen zu können, war somit eine qualitative Erhebung notwendig. Nur so konnte eine Grundlage für die Entwicklung von Lernangeboten zu geschaffen werden, die den Qualitätsmaßstäben der Didaktischen Rekonstruktion entspricht (Gropengießer 1999; Kattmann 2007; Kattmann et al. 1997). Dass dieses Vorgehen sinnvoll war, zeigt sich z. B. daran, dass neue Vorstellungen gefunden werden konnten (z. B. KÜNSTLICHES CO₂), während andere in quantitativen Erhebungen beschriebene Vorstellungen (z. B. *Klimawandel durch bleihaltiges Benzin*) keine Rolle für die Lerner in dieser Studie spielten.

10.3.3 Umsetzung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung

Im Folgenden wird die Sicherung der Qualität der Analysen in dieser Untersuchung anhand der von Mayring (2003, S. 111) formulierten Gütekriterien für qualitative Forschung kritisch reflektiert:

- **Verfahrensdokumentation und methodisch kontrollierte Analyse:** Die Verfahren zur Auswahl und Erhebung der Daten sind zu Beginn der jeweiligen Kapitel ausführlich dargestellt. Die Analysen sind ebenso dokumentiert. Alle in die Untersuchung eingeflossenen

Daten sind mit Verweisen auf die Transkripte bzw. Fachtexte angegeben und somit nachvollziehbar.

- **Interne Triangulation:** Die in dieser Studie gewonnenen Ergebnisse sind methodisch und zeitlich trianguliert worden: Zum einen wurden mit der Qualitativen Inhaltsanalyse und der Metaphernanalyse unterschiedliche Perspektiven an das gleiche Material angelegt. Zum anderen wurden mit der im Sommer 2007 durchgeführten Interviewstudie und der im Sommer 2008 durchgeführten Interventionsstudie zu zwei verschiedenen Zeitpunkten in zwei verschiedenen Stichproben Lernervorstellungen erhoben. Aus Tabelle 7.17 und Tabelle 7.23 geht hervor, dass die in der Interviewstudie gefundenen Vorstellungen in der Interventionsstudie bestätigt werden. Dies ist ein Indiz für die Validität der Ergebnisse.
- **Interne Validierung:** Die vorgenommenen Interpretationen wurden einer konsensuellen Validierung unterzogen: Dabei wurden die ausgewerteten Daten in der Arbeitsgruppe Biologiedidaktik der Leibniz Universität Hannover zur Konsentierung der Interpretationen vorgelegt. Zentrale Ergebnisse der Analyse der Lernervorstellungen wurden mit zwei praktizierenden Lehrkräften einer hannoverschen Gesamtschule anhand ihrer unterrichtlichen Erfahrungen konsensuell validiert.
Die Analysen der Lerner- und Wissenschaftlervorstellungen wurden darüber hinaus durch Vorträge auf Fachkonferenzen und in referierten Publikationen der Wissenschaftlergemeinschaft mit entsprechenden Belegen zur Diskussion gestellt (Niebert & Gropengießer 2008, 2009, 2010).
- **Externe Validierung:** Ein Vergleich der in dieser Studie erfassten Äußerungen von Lernern zum Klimawandel mit anderen empirischen Untersuchungen in diesem Feld (vgl. Kapitel 3) zeigt, dass die hier erhobenen Vorstellungen keine Einzelfälle darstellen, sondern sich alters- und nationenübergreifend bestätigen lassen. Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen findet in dieser Studie eine theoriegeleitete Analyse der Quellen der Vorstellungen und eine Analyse der Wissenschaftlervorstellungen statt.

10.4 Relevanz der Studie für die Lehr-Lernforschung

Mit der vorliegenden Untersuchung wurden Lernangebote auf der Basis der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens entwickelt und auf ihren Vermittlungserfolg hin evaluiert. Dabei stand der Verlauf des Lernprozesses im Fokus der Vermittlungsexperimente. Somit sind in Bezug auf die einzelnen Lernangebote nicht nur Aussagen darüber möglich, ob sie erfolgreich waren, sondern auch warum sie es waren oder nicht waren und wo ihre Begrenzungen liegen. Daraus konnten Lernschwierigkeiten und Lernmöglichkeiten der Lernangebote abgeleitet werden. Die Untersuchung leistet damit einen Beitrag zur prozessorientierten Erforschung der Vorstellungsentwicklung und damit der Conceptual-Change-Forschung.

10.4.1 Lernen als Reflexion der eigenen Vorstellung

Riemeier (2005) hat in ihrer Untersuchung über die Vorstellungswicklungen zur Zelltheorie die Hypothese aufgeworfen, dass die Reflexion der eigenen Vorstellung einen entscheidenden Beitrag zur Vorstellungsentwicklung haben kann. Diese Hypothese konnte im Rahmen dieser Untersuchung bestätigt und ausgeschärft werden. So zeigt sich z. B. an den Vorstellungsentwicklungen zum Kohlenstoffkreislauf, dass die Reflexion der Anwendung des Quellbereichs (z. B. Speicher-Fluss-Schema, Gleichgewichtsschema, Natürlich-Künstlich-Schema) mithilfe eines Modells eine Vorstellungsentwicklung hin zu einer fachlich angemessenen Vorstellung unterstützen kann.

Besonders bei der Anwendung des Speicher-Fluss-Schemas auf die Abholzung von Regenwäldern zugunsten von Kulturland (Kapitel 9.3.3) zeigt sich indes die Bedeutung der Erfahrungsstiftung. Obwohl die Lerner schon in den vorigen Lernangeboten mit dem Speicher-Fluss-Modell gearbeitet haben, musste ein Großteil der Lerner die in der Aufgabe dargestellten Daten erst im Modell nachstellen und erfahren, um zu einer fachlich angemessenen Erklärung zu kommen.

10.4.2 Das Vermittlungsexperiment in der Lehr-Lernforschung

Das Vermittlungsexperiment hat sich schon bei Riemeier (2005) als fruchtbares Forschungsinstrument für die prozessbasierte Lehr-Lernforschung erwiesen. Auch in dieser Untersuchung zeigt sich das in den Vermittlungsexperimenten gewählte Kleingruppendesign mit zwei bis drei Lernern als geeignete Methode zur Erforschung der individuellen Verständniseentwicklung. Es ermöglichte sowohl soziale Interaktionen unter den Lernern wie auch eine nachvollziehbare und damit methodisch kontrollierbare Analyse der Interaktionen hinsichtlich ihres Einflusses auf das Lernen. Damit hat das Kleingruppendesign einen methodischen Vorteil gegenüber dem Vermittlungsexperiment in einer Klassensituation. Dennoch ist eben aufgrund der Kleingruppensettings zu vermuten, dass auch im Klassenkontext ähnliche Ergebnisse erzielt werden.

10.4.3 Einordnung der Ergebnisse in die Conceptual Change Forschung

Auf einer Metaebene lassen sich zwei für diese Untersuchung relevante Forschungsrichtungen ausmachen: Conceptual Change als Theoriewechsel (Vosniadou 1994; Vosniadou et al. 2008) und Conceptual Change als Wechsel der ontologischen Kategorie (Chi 2008; Chi et al. 1994b; Slotta & Chi 2006).

Lernen zum Klimawandel als Theoriewechsel

Vosniadou (2009) übt Kritik an der Anwendung der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens zur Initiierung eines Conceptual Change. Sie argumentiert, dass der Ansatz nicht geeignet sei, da Lerner Metaphern nicht erkennen und deswegen nicht reflektieren können. Die Nutzung verschiedener Metaphern führe zu einer Fragmentierung von Vorstellungen.

Diese Vermutung Vosniadous konnte in dieser Untersuchung nicht bestätigt werden: Wenn Lerner beispielsweise diskutieren, ob ein Kohlenstofffluss an sich oder seine Ursache als künstlich zu bezeichnen ist (vgl. Kapitel 9.3.2), wird deutlich, dass die hier untersuchten Lerner sehr wohl in der Lage sind, ihre Metaphern zu reflektieren. Sie können darüber hinaus die Quellbereiche ihrer Vorstellungen abwägen und schließlich fachlich angemessen auf den Zielbereich zu übertragen. Die Reflexion und die damit einhergehende Restrukturierung von Metaphern hilft den Lernern somit, Inhalte des Klimawandels fachlich angemessen zu erschließend.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass die Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens einen fruchtbaren Beitrag zur Conceptual-Change-Forschung leisten kann: So kann die Erkenntnis anderer, auf der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens basierenden Studien (z.B. Amin 2009; Brookes & Etkina 2007; Gropengießer 2001; Mathewson 2005; Riemeier & Gropengießer 2008), bestätigt werden: Lerner, wie auch Wissenschaftler bedienen sich verschiedener Metaphern, um abstrakte Phänomene zu verstehen. Dabei zeigt sich in dieser Studie nicht nur die Nutzung von Metaphern durch sowohl Wissenschaftler als auch Lerner. Vielmehr wird deutlich, dass die Vorstellungen zum Kohlenstoffkreislauf und Treibhauseffekt von Wissenschaftlern und Lernern in zentralen Aspekten auf die gleichen Quellbereiche wie das Behälterschema, das Speicher-Fluss-Schema und das Gleichgewichtsschema rekurren (vgl. Kapitel 8.3 und 8.5).

Im Vergleich zeigen sich damit sogar Parallelen zwischen den (meist erfahrungsbasierten) Rahmentheorien Vosniadous und den erfahrungsbasierten Schemata Lakoffs, die als Grundlage für die Erklärung naturwissenschaftlicher Phänomene anhand von inhaltsspezifischen Theorien (Vosniadou) bzw. Zielbereichen (Lakoff) herangezogen werden. Dabei beschreibt Vosniadou ein Lernen immer dann als schwierig, wenn neben der inhaltsspezifischen Theorie auch die Rahmentheorie verändert werden soll. Da Wissenschaftler und Lerner auf die gleichen Schemata und damit Rahmentheorien zum Klimawandel rekurren, verfolgten in dieser Untersuchung die Lernangebote nicht das Ziel, die Rahmentheorien auszutauschen oder zu verändern. Vielmehr sollten sie anhand neuer Erfahrungen reflektiert werden, um sie anschließend fachlich angemessen zu konzeptualisieren und auf den Zielbereich übertragen zu können. Es geht somit nicht darum, z. B. beim Lernen des Treibhauseffekts die Rahmentheorie *Erde Ist Behälter* zu verwerfen, sondern ihre Nutzung weiterzuentwickeln. So konnten die Lerner ihre Vorstellungen anhand mehrerer Lernangebote von *Erwärmung durch mehr Einstrahlung* (ERWÄRMUNG DURCH OZONLOCH) zu *Erwärmung durch weniger Abstrahlung* (ERWÄRMUNG DURCH TREIBHAUSEFFEKT) und damit hin zu einer fachlich angemessenen Perspektive rekonstruieren, ohne die Rahmentheorie zu verwerfen.

Lernen zum Klimawandel als Wechsel der ontologischen Kategorie

Das Lernen zum Kohlenstoffkreislauf lässt sich als eine Veränderung der ontologischen Perspektive interpretieren: Chi et al. (1994a) beschreiben, dass fachlich nicht angemessene Vorstellungen häufig entstehen, weil Phänomene einer aus fachlicher Sicht falschen ontologischen Kategorie zugeordnet werden. Als Conceptual Change wird bezeichnet, wenn ein Konzept, das ursprünglich einer nicht angemessenen ontologischen Kategorie (z. B. Stoff) zugeordnet wurde, schließlich unter einer angemessenen ontologischen Kategorie (z. B. Prozess) subsumiert wird.

In der Analyse der Vorstellungen von Lernern und Wissenschaftlern zum Kohlenstoffkreislauf im Rahmen des Klimawandels zeigte sich die Nutzung der ontologischen Kategorien Stoff, Prozess und Ursache. So wird in den Denkfiguren KÜNSTLICHES CO₂ und NATÜRLICHES UND KÜNSTLICHES CO₂ die Eigenschaft *künstlich* dem Stoff CO₂ zugeordnet (*CO₂ Ist Künstlich*). In der Denkfigur ANTHROPOGENES UNGLEICHGEWICHT wird die Eigenschaft *künstlich* hingegen entweder dem Prozess (*Verbrennung Ist Künstlich*) oder der Ursache des Prozesses (*Verbrennung durch den Menschen Ist Künstlich*) zugeordnet.

Die Reflexion des Natürlich-Künstlich-Schemas anhand der Arbeit mit dem Speicher-Fluss-Modell ließ die Lerner die Zuordnung der Eigenschaften *künstlich* und *natürlich* rekonstruieren (vgl. Kapitel 9.3.2). Dabei fand bei den Lernern in dieser Arbeit beim Verstehen des Kohlenstoffkreislaufs ein Wechsel der ontologischen Kategorie vom *Stoff* zum *Prozess* oder der *Ursache* des Prozesses statt.

Lernen zum Klimawandel als Conceptual Reconstruction

Die in dieser Arbeit initiierten Lernprozesse zielten nicht zwangsläufig auf eine Entwicklung neuer Vorstellungen, sondern auf ein Umlernen anhand vorhandener Vorstellungen. Anknüpfend an die Theorien Chis und Vosniadous lassen sich die konzeptuellen Veränderungen der Lernervorstellungen in dieser Arbeit somit als eine Rekonstruktion von Vorstellungen bezeichnen. Dabei werden verkörperten Vorstellungen wie das Speicher-Fluss-Schema, das Natürlich-Künstlich-Schema und das Gleichgewichtsschema reflektiert und ihre Anwendung auf den Kohlenstoffkreislauf (z. B. von *Künstliches CO₂* zu *Künstliche Ursache des Kohlenstoffflusses*) bzw. den Treibhauseffekt (von *Mehr Einstrahlung* zu *Weniger Abstrahlung*) rekonstruiert. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchung lässt sich eine Vorstellungsveränderung im Sinne der Conceptual Change Forschung definieren als eine »Rekonstruktion der Übertragung erfahrungsbasierter Vorstellungen in einen abstrakten Zielbereich«.

Der von Kattmann (2005) vorgeschlagene Terminus der Conceptual Reconstruction lässt sich auf Grundlage dieser Studie somit als aus fachdidaktischer Sicht angemessenere Bezeichnung des Lernprozesses zum Treibhauseffekt und Kohlenstoffkreislauf bestätigen.

10.5 Relevanz der Studie für den Unterricht

Den Zielstellungen der Didaktischen Rekonstruktion folgend ist diese Untersuchung auf eine Verbesserung der Qualität des naturwissenschaftlichen Unterrichts ausgerichtet. Als Ergebnis dieser Arbeit stehen für die Planung von Unterricht zum Klimawandel auf ihre Quellen hin untersuchte Lernervorstellungen und auch evidenzbasierte und theoriegeleitet entwickelte Leitlinien und Lernangebote zur Vermittlung des Klimawandels zur Verfügung.

Ausubel beschreibt die Aufgabe eines Lehrers in der Gestaltung von Unterricht wie folgt: „The most important single factor influencing learning is what the learner already knows. Ascertain this and teach ...accordingly“ (Ausubel 1968, S. v). Er greift damit einen Standpunkt Diesterwegs auf, der schon in der Mitte des 19. Jahrhunderts die Berücksichtigung der Vorstellungen der Lerner für die Gestaltung von Unterricht betont „Der Standpunkt des Schülers ist der Ausgangspunkt [...] und] bestimmt die Methode des Gegenstandes“ (Diesterweg 1850, S. 211, 216). Mit den Ergebnissen dieser Untersuchung können Lehrkräfte die Vorstellungen ihrer Lerner zum Klimawandel antizipieren und mit Hilfe der Lernangebote einen entsprechenden Unterricht planen.

Zwar beschränkte sich die Analyse in dieser Studie auf Lerner der Klassen 11 und 12. Jedoch zeigen die im Stand der Forschung (Kapitel 3) dargestellten Untersuchungen, dass die Vorstellungen auch bei Lernern in Grundschulen und auch bei erwachsenen, durchaus naturwissenschaftlich gebildeten Laien gefunden werden können. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die hier dargestellten Vorstellungen eine über die Untersuchungsgruppe hinausgehende Relevanz haben.

Darüber hinaus konnten konkrete Unterrichtsvorschläge anhand von Lernangeboten erarbeitet und evaluiert werden. Es stehen somit über die Lernervorstellungen hinaus auch Unterrichtsanregungen und Materialien zur Verfügung, mit denen aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Studie zentrale Aspekte des Klimawandels vermittelt werden können. Die Lernervorstellungen zum Treibhauseffekt und Kohlenstoffkreislauf und auch die Lernangebote zum Kohlenstoffkreislauf sind für die schulische Praxis über Publikationen in entsprechenden Zeitschriften mit Unterrichtsbezug zugänglich gemacht worden (Niebert 2009a, 2009b).

Die wohl grundlegendste Leitlinie für die Vermittlung des Treibhauseffekts lautet: „Ozonloch und Treibhauseffekt unterscheiden“. Ein Blick in gängige, aktuelle Schulbücher (z.B. Beyer et al. 2008; Bickel et al. 2006; Jütte & Kähler 2007) und Hochschullehrbücher (z.B. Campbell et al. 2006) macht deutlich, dass die Phänomene Ozonloch und Treibhauseffekt häufig gemeinsam behandelt werden, ohne sie deutlich voneinander abzugrenzen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung legen nahe, dass ein nicht deutlich abgrenzendes Nebeneinander der Vermittlung von Treibhauseffekt und Ausdünnung atmosphärischen Ozons lernhinderlich ist.

Der Klimawandel wird in den nationalen Bildungsstandards zum Fach Biologie nicht explizit als Unterrichtsinhalt aufgeführt, kann aber mit Teilaspekten unter dem Basiskonzept „System“ im Kompetenzbereich „Fachwissen“ oder im Kompetenzbereich „Bewerten“ eingeordnet werden (KMK 2004a). Darüber hinaus sind verschiedene in dieser Studie untersuchte Aspekte des Klimawandels auch als Unterrichtsinhalt in den Bildungsstandards Physik (KMK 2004c), Chemie (KMK 2004b) und Geographie (DGfG 2007) zu finden. Die in dieser Arbeit zu entwickelnden Lernangebote sind auf einen modularisierten Einsatz zu verschiedenen Teilaspekten des Klimawandels hin entwickelt und können so auf der einen Seite auf die Vorstellungen der Lerner hin

und auf der anderen Seite auf die unterrichtlichen Rahmenbedingungen und Unterrichtsfächern hin eingesetzt werden.

Durch die theoriegeleitete Analyse der Vorstellungen war es möglich, die Vorstellungen der Lerner zu kategorisieren und so eine für die Unterrichtsplanung überschaubare Ordnung zu schaffen. Lehrende erhalten so die Möglichkeit, Lernangebote individuell auf die verfügbaren Vorstellungen des Lerners im Unterricht hin einzusetzen. Ähnlich der Konzeption der Vermittlungsexperimente kann somit ein Unterricht gestaltet werden, in dem die Lerner einer Klasse unterschiedliche, ihren Vorstellungen adäquate Lernangebote erhalten. Die in dieser Arbeit entwickelten Lernangebote eignen sich somit für eine Binnendifferenzierung des Unterrichts. Zur Implementierung eines an individuellen Vorstellungen orientierten Unterrichts sind Diagnoseinstrumente hilfreich, wie sie derzeit z. B. von Dannemann (2009) zum Thema Sehen entwickelt werden.

Die modular einsetzbaren Lernangebote können darüber hinaus abhängig vom Leistungsstand der Lerngruppe in den Unterricht implementiert werden. So kann anhand der Behälter im Speicher-Fluss-Modell entschieden werden, ob die Rolle der Ozeane thematisiert wird, um die Reaktionen des Kohlenstoffkreislaufs auf die gestiegene CO₂-Konzentration zu diskutieren, oder ob eine Thematisierung des ANTHROPOGENEN UNGLEICHGEWICHTS ausreichend ist, in der auf die Ozeane als Kohlenstoffspeicher verzichtet werden kann. Ebenso kann mit dem Einsatz des Lernangebot Fließgleichgewicht beim Lernen zum Treibhauseffekt z. B. entschieden werden, ob die Vorstellungen ERWÄRMUNG DURCH NEUES STRAHLUNGSGLEICHGEWICHT oder ERWÄRMUNG DURCH WENIGER ABSTRAHLUNG Ziel von Vermittlungsprozessen sein sollten.

Im Rahmen von Ansätzen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung im naturwissenschaftlichen Unterricht ist es neben einer Vermittlung von Vorstellungen ein Ziel, Lernern Handlungsoptionen für einen nachhaltigen Lebensstil zu eröffnen. Diese Studie fokussierte auf die Vorstellungen der Lerner und damit auf die kognitive Dimension. Von einer Veränderung von Vorstellungen gleichzeitig auf eine Veränderung von Handlungen zu schließen, wäre naiv und ist wissenschaftlich nicht haltbar (z.B. Hodson 2003; Rost et al. 2001; Schlüter 2007). Jedoch zeigt sich in Untersuchungen aus unterschiedlichen Disziplinen, dass Vorstellungen durchaus einen Einfluss auf Handlungen haben: So konnte nachgewiesen werden, dass ein angemessenes fachliches Wissen zwar keine hinreichende, aber eine notwendige Bedingung für Handlungen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung sind (Andrey et al. 2000; Kaiser & Fuhrer 2003; Schahn 1993). Eine Gruppe um Bord konnte darüber hinaus zeigen, dass allgemeine Vorstellungen von einem „umweltfreundlichen Verhalten“ nicht ausreichend sind, sondern auch auf individueller Ebene adäquate Vorstellungen von zentralen Aspekten des Klimawandels Voraussetzung für effektive Handlungen gegen den Klimawandel sind (Bord et al. 2000).

Beck (2007) betont indes, dass individuelle Handlungen nur bedingt Einfluss auf das Klima haben: Weder ist der Klimawandel von einem Einzelnen verursacht, noch kann er von einem Einzelnen verhindert werden. Vielmehr bedarf es vielfältiger Entscheidungen auf politischer Ebene, um zu einer nachhaltigen Entwicklung zu kommen. Die in dieser Untersuchung beschriebenen Lernangebote können hier einen Beitrag leisten: Prester und Kollegen haben ein adäquates Fakten- und Handlungswissen als starken Prädiktor für politische Partizipation und ausmachen können (Prester et al. 1987). Diese Position wird auch von Stermann und Sweeney (2007) unterstützt, die den gut informierten Bürger als Voraussetzung für eine wirksame Klimapolitik sehen.

Die in dieser Studie erhobenen Vorstellungen und die daraus abgeleiteten Lernangebote zielen darauf ab, die Entwicklung fachlich angemessener Vorstellungen zum Klimawandel zu unterstützen. Diese fachlich angemessenen Vorstellungen können Lernern Optionen für wirksame nachhaltige Handlungen auf individueller Ebene eröffnen und ihnen helfen, sich als aktive und mündige Bürger für ein nachhaltiges Leben zu engagieren.

10.6 Erreichte Ziele

Diese Studie verfolgt das Ziel einer theoriegeleiteten und evidenzbasierten Entwicklung von Lernangeboten zum Klimawandel. Aufbauend auf dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion konnten folgende Ziele erreicht werden:

- I. In dieser Untersuchung konnten Lernervorstellungen zu zentralen Aspekten des Klimawandels erhoben werden. Dabei zeigte sich, dass Lerner durchaus über wissenschaftsorientierte Vorstellungen verfügen, sie diese aber oft fachlich nicht angemessen konzeptualisieren. Es konnten z. T. schon bekannte Vorstellungen theoriegeleitet kategorisiert und neue Vorstellungen beschrieben werden (Kapitel 4 und 8).
- II. Es wurden Vorstellungen von Wissenschaftlern zum Klimawandel erhoben und mithilfe der Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens interpretiert. Dabei konnten verständnisförderliche und -hinderliche Aspekte aus den von Wissenschaftlern genutzten Metaphern herausgearbeitet werden (Kapitel 7 und 9).
- III. Durch die didaktische Strukturierung konnten Korrespondenzen und Verschiedenheiten zwischen den Vorstellungen von Wissenschaftlern und Lernern aufgezeigt werden. Dabei wurde deutlich, dass Wissenschaftler und Lerner meist auf die gleichen erfahrungsbasierten Quellbereiche zurückgreifen, diese aber im Zielbereich Klimawandel meist unterschiedlich konzeptualisieren (Kapitel 9).
- IV. Aufbauend auf dem in Beziehung Setzen der Vorstellungen von Wissenschaftlern und Lernern konnten vier Leitlinien zur Vermittlung des Kohlenstoffkreislaufs und sieben Leitlinien zur Vermittlung des Treibhauseffekts entwickelt werden. Diese wurden in drei (Kohlenstoffkreislauf) bzw. fünf Lernangeboten (Treibhauseffekt) umgesetzt (Kapitel 10).
- V. Die Lernangebote wurden in Vermittlungsexperimenten getestet und formativ evaluiert. Die Vorstellungsentwicklungen der Lerner konnten anhand von Denkpfeilen erfasst und ausgewertet werden. Dabei wurde deutlich, welche Lernangebote das Verstehen des Klimawandels fördern und wo Verständnisschwierigkeiten auftreten (Kapitel 10).

Mit den in dieser Studie analysierten Vorstellungen ist eine Grundlage für die Vermittlung zentraler Aspekte des Klimawandels geschaffen, indem Mikrotheorien über das Lernen zum Klimawandel entwickelt wurden. In Folgeuntersuchungen wäre zu klären, ob die erhobenen Vorstellungen und die entwickelten Lernangebote auch für alltägliche, formelle wie nicht-formelle Vermittlungssituationen nutzbar sind. Die Ergebnisse dieser Studie legen dies nahe, sie harren jedoch einer empirischen Prüfung der Alltagstauglichkeit für „Vermittler des Klimawandels“.

11 Literatur

- Amin, T. (2009): Conceptual Metaphor Meets Conceptual Change. *Human Development*, 52, 165-197.
- Andersson, B. & Wallin, A. (2000): Students' understanding of the Greenhouse Effect, the social consequences of reducing CO₂ emissions and the problem of Ozone layer depletion. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(10), 1096-1111.
- Andrey, J., Kay, P., Fook, I. F., Mortsch, L., Gibson, R., Scott, D. et al. (2000): Introduction. In D. Scott, B. Jones, J. Andrey, R. Gibson, P. Kay, L. Mortsch & K. Warriner (Hrsg.), *Climate Change communication. Proceedings from an international conference*. (S. iii-iv). Kitcher-Waterloo: University of Waterloo and Environment Canada.
- Atkins, P. W. (1996): *Physikalische Chemie*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Ault, C. R. (1983): Structured Interviews and Children's Science Conceptions. *Science Teacher*, 9(2), 45-53.
- Ault, C. R., Novak, J. D. & Gowin, D. B. (1984): Constructing vee maps for clinical interviews on molecule concepts. *Science Education*, 68, 441-462.
- Ausubel, D. P. (1968): *Educational psychology: A cognitive view*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Baldauf, C. (1997): *Metapher und Kognition. Grundlagen einer neuen Theorie der Alltagsmetaphern*. Frankfurt am Main: Peter Lang.
- Bear, M. F., Connors, B. W. & Paradiso, M. A. (2001): *Neuroscience: Exploring the brain*. Baltimore: Lippincott, Williams & Wilkins.
- Beck, U. (2007): *Weltrisikogesellschaft*. Berlin: Suhrkamp Verlag.
- Behringer, W. (2007): *Kulturgeschichte des Klimas*. München: Beck.
- Bertalanffy, L. v. (1950): The Theory of Open Systems in Physics and Biology. *Science*, 111(23-29).
- Bertalanffy, L. v. (1968): *General System Theory*. New York: George Braziller.
- Beyer, I., Bickel, H., Gropengießer, H., Kluge, S., Knauer, B., Kronberg, I. et al. (2008): *Natura. Biologie für Gymnasien – Oberstufe*. Stuttgart: Ernst Klett Verlag.
- Bickel, H., Knauer, B. & Kronberg, I. (2006): *Natura Biologie. Oberstufe. Themenheft Ökologie*. Stuttgart: Ernst Klett Verlag.
- Bohnsack, R. (1999): *Rekonstruktive Sozialforschung. Einführung in die Methodologie und Praxis qualitativer Sozialforschung*. Opladen: Leske+Budrich.
- Booth-Sweeney, L. & Sterman, J. D. (2000): Bathtub dynamics: initial results of a systems thinking inventory. *System Dynamics Review*, 16(4), 249-286.
- Bord, R. J., Fisher, A. & O'Connor, R. E. (1998): Public perceptions of global warming: United States and international perspectives *Climate Research*, 11, 75-84.
- Bord, R. J., O'Connor, R. & Fisher, A. (2000): In what sense does the public need to understand global climate change? *Public Understanding of Science*, 9, 205-218.
- Bortz, J. & Döring, N. (2006): *Forschungsmethoden und Evaluation*. Berlin: Springer.
- Bostrom, A., Morgan, G. M., Fischhoff, B. & Read, D. (1994): What do People Know about Global Climate Change? - 1. Mental Models. *Risk Analysis*, 14(6), 959-970.
- Boyes, E. & Stanisstreet, M. (1992): Students' perceptions of global warming. *International Journal of Environmental Studies*, 42, 287-300.
- Boyes, E. & Stanisstreet, M. (1993): The Greenhouse-Effect - Childrens 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.
- Boyes, E. & Stanisstreet, M. (1998): High school students' perceptions of how major global environmental effects might cause skin cancer. *The Journal of Environmental Education*, 29(2), 31-36.
- Bredahl, L. (1999): Consumer's Cognitions With Regard to Genetically Modified Foods. Results of a Qualitative Study in Four Countries. *Appetite*, 33, 343-360.
- Brookes, D. T. & Etkina, E. (2007): Using conceptual metaphor and functional grammar to explore how language used in physics affects student learning. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 3, 1-16.
- Buchner, A. (2006): Funktionen und Modelle des Gedächtnisses. In H.-O. Karnath & P. Thier (Hrsg.), *Neuropsychologie* (S. 437-447). Berlin: Springer.
- Callicott, J. B. (1996): Do Deconstructive Ecology and Sociobiology Undermine Leopold's Land Ethics? *Environmental Ethics*, 18, 353-372.
- Campbell, N. A., Reece, J. B. & Markl, J. (2006): *Biologie* (6. Aufl.). San Francisco: Benjamin Cummings.
- Chi, M. (2008): Three types of conceptual change: Belief revision, mental model transformation, and categorical shift. In S. Vosniadou (Hrsg.), *Handbook of research on conceptual change* (S. 61-82). Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- Chi, M., de Leeuw, N., Chiu, M. & LaVancher, C. (1994a): Eliciting self-explanations improves understanding. *Cognitive Science*, 18, 439-477.
- Chi, M., Slotta, J. D. & de Leeuw, N. (1994b): From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts. *Learning and Instruction*, 4, 27-43.
- Chinn, C. A. & Brewer, W. F. (1993): The role of anomalous data in knowledge acquisition: A theoretical framework and implications for science instruction. *Review of Educational Research*, 63(1), 1-49.
- Cobb, P., Confrey, J., diSessa, A., Lehrer, R. & Schauble, L. (2003): Design Experiments in Educational Research. *Educational Researcher*, 32(1), 9-13.
- Collins, A., Joseph, D. & Bielaczyc, K. (2004): Design research: Theoretical and methodological issues. *Journal of the Learning Sciences*, 13(1), 15-42.
- Cramer, B. & Andruleit, H. (2009): *Energierohstoffe 2009 - Reserven, Ressourcen, Verfügbarkeit*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Cuddington, K. (2007): The "Balance of Nature" Metaphor and Equilibrium in Population Ecology. *Biology and Philosophy*, 16, 463-479.
- Dannemann, S. & Krüger, D. (2009): Entwicklung und Evaluation eines Diagnoseinstruments für Schülervorstellungen zum Sehen und zur Wahrnehmung. In D. Krüger & A. Upmeyer zu Belzen (Hrsg.), *Erkenntnisweg Biologiedidaktik 8*. Kassel.
- DGfG (2007): *Bildungsstandards im Fach Geographie für den Mittleren Schulabschluss*. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Geographie (DGfG).
- Diesterweg, F. A. W. (1850): *Wegweiser zur Bildung für Deutsche Lehrer*. Essen: Bädecker.
- diSessa, A. A. (1993): Toward an Epistemology of Physics. *Cognition and Instruction*, 10(2), 105 - 225.
- diSessa, A. A. & Sherin, B. L. (1998): What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), 1155-1192.
- Dove, J. (1996): Student teacher understanding of the greenhouse effect, ozone layer depletion and acid rain. *Environmental Education Research*, 2, 89-100.
- Dubs, R. (1995): Konstruktivismus: Einige Überlegungen aus der Sicht der Unterrichtsgestaltung. *Zeitschrift für Pädagogik*, 41(6), 889-903.
- Duden (2002): *Das Bedeutungswörterbuch*. Mannheim: Duden.

- Duit, R. (1995): Zur Rolle der konstruktivistischen Sichtweise in der naturwissenschaftlichen Lehr-Lern-Forschung. *Zeitschrift für Pädagogik*, 41, 905-923.
- Duit, R. (1998): *Towards multi-perspective views of science learning and instruction*. Paper presented at the American Educational Research Association.
- Duit, R. (1999): Conceptual change approaches in science education. In W. Schnotz, Vosniadou, S., Carretero, M. (Hrsg.), *New perspectives on conceptual change* (S. 263-282). Oxford, UK: Pergamon.
- Duit, R., Gropengießer, H. & Kattmann, U. (2005): Towards science education research that is relevant for improving practice: The Model of Educational Reconstruction. In H. Fischer (Hrsg.), *Developing standards in research on science education. The ESERA Summer School 2004*. (S. 1-9). London: Taylor & Francis.
- Duit, R. & Treagust, D. (1998): Learning in Science – From Behaviourism Towards Social Constructivism and Beyond. In B. Fraser & K. Tobin (Hrsg.), *International Handbook of Science Education*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers.
- Duit, R. & Treagust, D. F. (2003): Conceptual change: a powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), 671-688.
- Egerton, F. N. (1973): Changing Concepts of the Balance of Nature. *The Quarterly Review of Biology*, 48(2), 322-350.
- Ekborg, M. & Areskoug, M. (2006): How students teacher's understanding of the greenhouse effect develops during a teacher education programme. *NorDiNa*, 5, 17-29.
- Fetterman, D. M. (1988): *Qualitative approaches to evaluation in education*. New York: Praeger.
- Flick, U., von Kardoff, E. & Steinke, I. (2004): *Qualitative Forschung. Ein Handbuch*. Reinbeck bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag.
- Foerster, H. v. (1981): Das Konstruieren einer Wirklichkeit. In P. Watzlawik (Hrsg.), *Die erfundene Wirklichkeit* (S. 39-60). München: Piper.
- Gallese, V. & Lakoff, G. (2005): The brain's concepts: The role of the sensory-motor system in conceptual knowledge. *Cognitive Neuropsychology*, 22(3-4), 455-479.
- Gardner, G. T. & Stern, P. C. (2002): *Environmental Problems and Human Behaviour*. Boston: Pearson Custom Publishing.
- Gebhard, U. (2009): *Kind und Natur: Die Bedeutung der Natur für die psychische Entwicklung* (3. Aufl.). Wiesbaden: VS Verlag.
- Gerstenmeier, J. & Mandl, H. (1995): Wissenserwerb unter konstruktivistischer Perspektive. *Zeitschrift für Pädagogik*, 41(6), 867-888.
- Gläser, J. & Laudel, G. (2006): *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen*. Wiesbaden: VS Verlag.
- Glaserfeld, E. v. (1987): Lernen als konstruktive Tätigkeit. In E. v. Glaserfeld (Hrsg.), *Wissen, Sprache und Wirklichkeit* (S. 275-303). Braunschweig: Vieweg & Sohn.
- Glaserfeld, E. v. (1989): Constructivism in Education. In T. Husen, Postlethwaite, T. N. (Hrsg.), *The international encyclopedia of education* (S. 162-163). New York: Pergamon Press.
- Glaserfeld, E. v. (1995): A Constructivist Approach to Teaching. In L. P. Steffe & J. Gale (Hrsg.), *Constructivism in Education* (S. 3-15). Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Glaserfeld, E. v. (2004): Constructivism. In W. E. Craighead & C. B. Nemeroff (Hrsg.), *The Concise Corsini Encyclopedia of Psychology and Behavioral Science* (S. 219-220). Hoboken, N. J.: John Wiley & Sons.
- Glaserfeld, E. v. (2008): Learning as Constructive Activity. *AntiMatters*, 2(3), 33-49.
- GlobeScan (2009): *Climate Concerns Continue to Increase: Global Poll*. Toronto: GlobeScan.
- Gropengießer, H. (1999): Didaktische Rekonstruktion als Rahmen für fachdidaktische Lehr-Lernforschung. In H. Guenther-Arndt (Hrsg.), *Fachdidaktik als Zentrum professioneller Lehrerbildung* (S. 15-27). Oldenburg: Oldenburger Vor-Drucke.

- Gropengießer, H. (2001): *Didaktische Rekonstruktion des 'Sehens'*. *Wissenschaftliche Theorien und die Sicht der Schüler in der Perspektive der Vermittlung*. Oldenburg: Zentrum für pädagogische Berufspraxis Oldenburg.
- Gropengießer, H. (2003a): *Lebenswelten, Denkwelten, Sprechwelten. Wie man Vorstellungen der Lerner verstehen kann*. Oldenburg: Didaktisches Zentrum.
- Gropengießer, H. (2003b): Lernen und Lehren. Thesen und Empfehlungen zu einem professionellen Verständnis. In E. Nuissl, C. Schiersmann & H. Siebert (Hrsg.), *Report 3/2003. Gehirn und Lernen* (S. 29-39). Bielefeld: wbv.
- Gropengießer, H. (2005): Qualitative Inhaltsanalyse in der fachdidaktischen Lehr-Lernforschung. In P. Mayring & M. Gläser-Zikuda (Hrsg.), *Die Praxis der Qualitativen Inhaltsanalyse* (S. 172-189). Weinheim: Beltz.
- Gropengießer, H. (2007): Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens. In D. Krüger & H. Vogt (Hrsg.), *Theorien in der biologiepädagogischen Forschung* (S. 105-116). Berlin: Springer.
- Gunstone, R. & Mitchell, I. (1997): Metacognition and conceptual change. In J. J. Mintzes, J. H. Wandersee & J. D. Novak (Hrsg.), *Teaching science for understanding*. San Diego: Academic Press.
- Guzzetti, B. J., Glass, G. V. (1992): Promoting conceptual change in science: A comparative meta-analysis of instructional interventions from reading education and science education. *Paper presented at the annual meeting of the American Educational Research Association, San Francisco, California*, 1-46.
- Haan, G. d. & Gerhold, L. (2008): Bildung für nachhaltige Entwicklung - Bildung für die Zukunft. *Umweltpsychologie*, 12(2), 4-9.
- Hansen, P. J. K. (2010): Knowledge about the Greenhouse Effect and the Effects of the Ozone Layer among Norwegian Pupils Finishing Compulsory Education in 1989, 1993, and 2005 What Now? *International Journal of Science Education*, 32(3), 397 - 419.
- Hellstern, G. M. & Wollmann, H. (1984): *Handbuch zur Evaluierungsforschung*. Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Hilpinen, R. (1995): Belief Systems as Artifacts. *The Monist*, 78, 136-155.
- Hodson, D. (2003): Time for action: Science education for an alternative future. *International Journal of Science Education*, 25(6), 645-670.
- Hoffmann-Riem, C. (1980): Die Sozialforschung einer interpretativen Soziologie. *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*, 32, 339-372.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Genf: Cambridge University Press.
- Jäkel, O. (1997): *Metaphern in abstrakten Diskurs-Domänen: Eine kognitiv-linguistische Untersuchung anhand der Bereiche Geistestätigkeit, Wirtschaft und Wissenschaft*. Frankfurt am Main: Peter Lang.
- Janich, P. & Weingarten, M. (1999): *Wissenschaftstheorie der Biologie*. München: Fink.
- Jeffries, H., Boyes, E. & Stanisstreet, M. (2001): Knowledge about the Greenhouse Effect: Have college students improved? *Research in Science & Technological Education*, 19(2), 205-221.
- Jelemenská, P. (2006): *Das Verständnis der Einheiten in der Natur: Ein Beitrag zur didaktischen Rekonstruktion in der Ökologie*. Oldenburg: Didaktisches Zentrum.
- Johnson, M. (1987): *The Body in the Mind. The Bodily Basis of Meaning, Imagination, and Reason*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Jung, W. (1993): Hilft die Entwicklungspsychologie dem Physikdidaktiker? In R. Duit & W. Gräber (Hrsg.), *Kognitive Entwicklung und naturwissenschaftlicher Unterricht* (S. 86-107). Kiel: IPN-Institute for Science Education.
- Jütte, M. & Kähler, H. (2007): *Biologie heute entdecken 2*. Braunschweig: Schrödel.
- Kaiser, F. G. & Fuhrer, U. (2003): Ecological behavior's dependency on different forms of knowledge. *Applied Psychology: An International Review*, 52, 598-613.

- Kandel, E. R., Schwartz, J. H. & Jessell, T. M. (2000): *Principles of Neural Science*. New York: McGraw-Hill.
- Kappas, M. (2009): Klimawandel: eine andauernde Kontroverse und Herausforderung für Natur- und Sozialwissenschaft. In M. Kappas (Hrsg.), *Klimatologie. Klimaforschung im 21. Jahrhundert – Herausforderung für Natur- und Sozialwissenschaften*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Kattmann, U. (2005): Lernen mit anthropomorphen Vorstellungen? Ergebnisse von Untersuchungen zur Didaktischen Rekonstruktion in der Biologie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 11, 165-174.
- Kattmann, U. (2007): Didaktische Rekonstruktion - eine praktische Theorie. In D. Krüger & H. Vogt (Hrsg.), *Theorien in der biologiepädagogischen Forschung*. Springer, Berlin.
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997): Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3(3), 3-18.
- Kattmann, U. & Gropengießer, H. (1998): *Schulnahe fachdidaktische Lehr-Lernforschung: Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion*. Oldenburg: Carl von Ossietzky Universität.
- Kehrer, P. (1977): Energieressourcen der Erde - Grenzen aus geowissenschaftlicher Sicht. *Geologische Rundschau*, 66(1), 697-711.
- Kelly, A. (2004): Design research in education: Yes, but is it methodological? *Journal of the Learning Sciences*, 13(1), 115--128.
- Kerstan, T. & Thadden, E. (2004, 01.07.2004): Wer macht die Schule klug? Ein Streitgespräch zwischen dem Hirnforscher Manfred Spitzer und der Kognitionspsychologin Elsbeth Stern. *Die Zeit*, S. 69-70.
- Khalid, T. (2003): Pre-service High School Teachers' Perceptions of Three Environmental Phenomena *Environmental Education Research*, 9(1), 35-50.
- KMK (2004a): *Bildungsstandards im Fach Biologie für den Mittleren Schulabschluss*. Bonn: Luchterhand.
- KMK (2004b): *Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss*. Bonn: Luchterhand.
- KMK (2004c): *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss*. Bonn: Luchterhand.
- Komorek, M. & Duit, R. (2004): The teaching experiment as a powerful method to develop and evaluate teaching and learning sequences in the domain of nonlinear systems. *International Journal of Science Education*, 26(5), 619-633.
- Koulaidis, V. & Christidou, V. (1999): Models of students' thinking concerning the greenhouse effect and teaching implications. *Science Education*, 83(5), 559-576.
- Krüger, D. (2007): Die Conceptual Change-Theorie. In D. Krüger & H. Vogt (Hrsg.), *Handbuch der Theorien in der biologiepädagogischen Forschung* (S. 81-92). Berlin: Springer.
- Lakoff, G. (1990): *Women, Fire and Dangerous Things. What Categories Reveal about the Mind*. Chicago, London: The University of Chicago Press.
- Lakoff, G. & Johnson, M. (1980): *Metaphors We Live By*. Chicago, London: The University of Chicago Press.
- Lakoff, G. & Johnson, M. (1999): *Philosophy in the Flesh. The Embodied Mind and Its Challenge To Western Thought*. New York: Basic Books.
- Lakoff, G. & Johnson, M. (2006): *Leben in Metaphern*. Heidelberg: Carl-Auer-Systeme Verlag.
- Lakoff, G. & Wehling, E. (2009): *Auf leisen Sohlen ins Gehirn*. Heidelberg: Carl-Auer-System-Verlag.
- Lamberg, T. d. & Middleton, J. A. (2009): Design Research Perspectives on Transitioning From Individual Microgenetic Interviews to a Whole-Class Teaching Experiment. *Educational Researcher*, 38(4), 233-245.
- Le Chatelier, H. (1884). *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 99, 786.

- Leach, J. (2007): Contested Territory: The actual and potential impact of research on teaching and learning science on student's learning. In R. Pinto´ & D. Couso (Hrsg.), *Contributions from Science Education Research* (S. 39-57).
- Lee, K. W. (2003): *Philosophy and Revolutions in Genetics: Deep Science and Deep Technology*. Basingstoke: Palgrave MacMillan.
- Levi, P. (1987): *Das periodische System*. München: Carl Hanser Verlag.
- Limon, M. (2001): On the cognitive conflict as an instructional strategy for conceptual change: A critical appraisal. *Learning and Instruction*, 11(4-5), 357-380.
- Lovelock, J. (1989): *The ages of Gaia: A biography of our living earth*. Oxford: Oxford University Press.
- Lunetta, V. N., Berg, E. van den, Katu, N. (1993): Teaching experiment methodology in the study of electricity concepts. In J. Novak (Hrsg.), *Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*. Ithaca, New York: Cornell University (distributed electronically).
- Marsch, S. (2009): *Metaphern des Lehrens und Lernens*. FU Berlin, Berlin.
- Mason, L. & Santi, M. (1998): Discussing the greenhouse effect: Children's' collaborative discourse reasoning and conceptual change. *Environmental Education Research*, 4(1), 67-85.
- Mathewson, J. H. (2005): The visual core of science. *International Journal of Science Education*, 27, 529-548.
- Mayring, P. (2003): *Qualitative Inhaltsanalyse*. Weinheim: Beltz UTB.
- Mayring, P. (2007): Generalisierung in qualitativer Forschung *Forum Qualitative Sozialforschung*. *Forum: Qualitative Social Research*, 8(3), Art. 26.
- Merkel, A. (2007). *Rede von Bundeskanzlerin Dr. Angela Merkel vor der Generalversammlung der Vereinten Nationen* Unpublished manuscript, New York.
- Mill, J. S. (1969): *Collected Works of John Stuart Mill, Part 10: Essays on Ethics, Religion and Society*. Toronto: Toronto University Press.
- Millar, R., Leach, J., Osborne, J. & Ratcliffe, M. (2006): *Improving subject teaching: Lessons from research in science education*. London: RoutledgeFalmer.
- Mitchell, J. F. B. (1989): The "Greenhouse" Effect and Climate Change. *Reviews of Geophysics*, 27(1), 115-141.
- Moore, G. E. (1996): *Principia Ethica*. Dover: Dover Philosophical Classics.
- Mousley, J., Sullivan, P. & Zevenbergen, R. L. (2004): *Alternative learning trajectories*. Paper presented at the Mathematics education for the third millennium: Towards 2010.
- Niebert, K. (2009a): Der Kohlenstoffkreislauf im Klimawandel. *Unterricht Biologie*, 349, 34-40.
- Niebert, K. (2009b): Es wird wärmer, weil mehr Sonne auf die Erde scheint. *Unterricht Physik*, 111/112, 20-23.
- Niebert, K. & Gropengießer, H. (2008): Es wird wärmer, weil mehr Sonne auf die Erde scheint - Vorstellungen von Wissenschaftlern und Lernern zum Klimawandel. In U. Harms & A. Sandmann (Hrsg.), "Ausbildung und Professionalisierung von Lehrkräften" *Internationale Tagung der Fachsektion Didaktik der Biologie im VBiO, Essen 2007* (S. 141-158). Innsbruck, Wien, Bozen: StudienVerlag.
- Niebert, K. & Gropengießer, H. (2009): 'The earth is warming because there is a hole in the atmosphere' – Students' and scientists' conceptions of global warming. In M. Hammann, Kerst T. Boersma & Arend J. Waarlo (Hrsg.), *The Nature of Research in Biological Education: Old and New Perspectives on Theoretical and Methodological Issues. A selection of papers presented at the VIIth Conference of European Researchers in Didactics of Biology (ERIDOB)* (S. 55-72). Utrecht: Utrecht University.
- Niebert, K. & Gropengießer, H. (2010): »CO2 causes a hole in the atmosphere« Using laypeople's conceptions as a starting point to communicate climate change In W. Leal (Hrsg.), *The Economic, Social and Political Elements of Climate Change*. Berlin: Springer

- OECD (2007): *PISA 2006 – Die Ergebnisse der dritten internationalen Vergleichsstudie*. Münster: Waxmann.
- Osterlind, K. (2005): Concept formation in environmental education: 14-year olds' work on the intensified greenhouse effect and the depletion of the ozone layer. *International Journal of Science Education*, 27(8), 891-908.
- Pansegrau, P. (2000): "Klimaszenarien, die einem apokalyptischen Bilderbogen gleichen" oder "Leck im Raumschiff Erde". Eine Untersuchung der kommunikativen und kognitiven Funktionen von Metaphorik im Wissenschaftsjournalismus anhand der Spiegelberichterstattung zum 'Anthropogenen Klimawandel'. *Dissertation Universität Bielefeld, Fak. f. Linguistik und Literaturwissenschaft*.
- Papadimitriou, V. (2004): Prospective Primary Teachers' Understanding of Climate Change, Greenhouse Effect, and Ozone Layer Depletion *Journal of Science Education and Technology*, 13(2), 299-307.
- Parchmann, I., Pioch, J. & Piosik, R. (1999): Ursachen des Treibhauseffektes - Ergebnisse einer punktuellen Untersuchung bei Schülern und Studenten in Oldenburg und Danzig. *Chemkon*, 6(1), 47-48.
- Paton, R. C. (1992): Towards a Metaphorical Biology. *Biology and Philosophy*, 7, 279-294.
- Pearce, F. (2001): The Kingdoms of Gaia. *New Scientist*, 30-33.
- Piaget, J. (1930): *The child's conception of physical causality*. London: Kegan Paul.
- Piaget, J. & Inhelder, B. (1972): *Die Psychologie des Kindes*. Olten, Freiburg/Brs.: Walter.
- Pidwirny, M. (Producer). (2006, 15.12.2009) The Nature of Radiation. *Fundamentals of Physical Geography*.
- Pintrich, P. R., Marx, R. W. , Boyle, R. A. (1993): Beyond cold conceptual change: The role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change. *Review of Educational Research*, 63(2), 167-199.
- 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.
- Posner, M. I. & Raichle, M. E. (1996): *Bilder des Geistes: Hirnforscher auf den Wegen des Denkens*. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag.
- Prester, G., Rohrmann, B. & Schellhammer, E. (1987): Environmental evaluation and participation activities: A social psychological field study. *Journal of Applied Social Psychology*, 17, 751-787.
- Pruneau, D., Gravel, H., Bourque, W. & Langis, J. (2003): Experimentation with a socio-constructivist process for climate change education. *Environmental Education Research*, 9(4), 429 - 446.
- Pruneau, D., Moncton, U., Liboiron, L. & Vrain, E. (2001): People's idea about climate change: A source of inspiration for the creation of educational programs. *Canadian Journal of Environmental Education*, 6(1), 58-76.
- Radcliffe, J. (1984): *The Sceptical Feminist*. Harmondsworth: Penguin Books.
- Randeniya, L. K., Vohralik, P. F. & Plumb, I. C. (2002): Stratospheric ozone depletion at northern mid latitudes in the 21st century: The importance of future concentrations of greenhouse gases nitrous oxide and methane. *Geophysical Research*, 29(4), 101-104.
- Read, D., Bostrom, A., Morgan, G. M., Fischhoff, B. & Smuts, T. (1994): What do People Know about Global Climate Change? - 2. Survey Studies of Educated Lay People. *Risk Analysis*, 14(6), 971-982.
- Reinfried, S., Schuler, S., Aeschenbacher, U. & Huber, E. (2008): Der Treibhauseffekt - Folge eines Lochs in der Atmosphäre. *Geographie heute*, 265, 24-33.
- Reinmann, G. & Mandl, H. (2006): Unterrichten und Lernumgebungen gestalten. In A. Krapp & B. Weidenmann (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie* (S. 615-658). Weinheim: Beltz.

- Reinmann-Rothmeier, G. & Mandl, H. (2001): Unterrichten und Lernumgebungen gestalten. In A. Krapp & B. Weidenmann (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie* (S. 601-645). Weinheim: Beltz.
- Richards, I. A. & Ogden, C. K. (1923): *The Meaning of Meaning*. Orlando: Harcourt Brace Jovanovich.
- Riemeier, T. (2005): *Biologie verstehen: Die Zelltheorie*. Oldenburg: Didaktisches Zentrum.
- Riemeier, T. (2007): Moderater Konstruktivismus. In D. Krüger & H. Vogt (Hrsg.), *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung*. Berlin: Springer.
- Riemeier, T. & Gropengießer, H. (2008): On the Roots of Difficulties in Learning about Cell Division. *International Journal of Science Education*, 30(7), 923-939.
- Rohrer, T. (2005): Image Schemata in the Brain. In B. Hampe & J. Grady (Hrsg.), *From Perception to Meaning: Image Schemas in Cognitive Linguistics* (S. 165-196). Berlin: Mouton de Gruyter.
- Rost, J., Gresele, C. & Martens, T. (2001): *Handeln für die Umwelt. Anwendung einer Theorie*. Münster: Waxmann.
- Roth, G. (1986): *Selbstorganisation – Selbsterhaltung – Selbstreferentialität: Prinzipien der Organisation der Lebewesen und ihre Folgen für die Beziehung zwischen Organismus und Umwelt*. München.
- Roth, G. (1997): *Das Gehirn und seine Wirklichkeit*. Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag.
- Roth, G. (2003): *Aus Sicht des Gehirns*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Roth, G. (2004): Wir sind determiniert. Die Hirnforschung befreit von Illusionen. In C. Geyer (Hrsg.), *Hirnforschung und Willensfreiheit* (S. 218-222). Frankfurt am Main.
- Roth, G. (2009): *Aus Sicht des Gehirns*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Rye, J., Rubba, P. & Wiesenmayer, R. (1997): An investigation of middle school students' alternative conceptions of global warming. *International Journal of Science Education*, 19(5), 527-551.
- Sander, E. (2002): Harmonisch-stabile oder ‚fließende‘ Natur? Zum Naturverständnis in der Ökologie und bei Schülerinnen und Schülern. In H. Vogt, D. Krüger & U. Unterbruner (Hrsg.), *Erkenntnisweg Biologiedidaktik* (S. 83-90). Salzburg.
- Schahn, J. (1993): Die Kluft zwischen Einstellung und Verhalten beim individuellen Umweltschutz. In J. Schahn & T. Giesinger (Hrsg.), *Psychologie für den Umweltschutz* (S. 29-49). Weinheim: PVU.
- Schlüter, K. (2007): Vom Motiv zur Handlung – Ein Handlungsmodell für den Umweltbereich. In D. Krüger & H. Vogt (Hrsg.), *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung* (S. 57-67). Springer, Berlin.
- Schmitt, R. (2003): Methode und Subjektivität in der Systematischen Metaphernanalyse. *Forum Qualitative Sozialforschung [Online Journal]*, 4(2), <http://www.qualitative-research.net/fqs-texte/2-03/02-03schmitt-d.htm> [12.12.2006].
- Schmitt, R. (2005): Systematic Metaphor Analysis as a Method of Qualitative Research. *The Qualitative Report*, 10(2), 358-394.
- Schramme, T. (2002): Natürlichkeit als Wert. *Analyse & Kritik – Zeitschrift für Sozialtheorie*, 24, 249-271.
- Schuler, S. (2005): Umweltwissen als Subjektive Theorie - eine Untersuchung von Schülervorstellungen zum globalen Klimawandel. In M. Schrenk & H. Seybold (Hrsg.), *Bildung für nachhaltige Entwicklung - Ergebnisse empirischer Untersuchungen*. Hamburg: Verlag Dr. Kovac.
- Schütz, A. (1981): *Der sinnhafte Aufbau der sozialen Welt*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Shaw, I. (1999): *Qualitative Evaluation*. London: Sage.
- Shepardson, D. P., Niyogi, D., Choi, S. & Charusombat, U. (2009): Seventh grade students' conceptions of global warming and climate change. *Environmental Education Research*, 15(5), 549 - 570.

- Simon, H. A. (1969): *The sciences of the artificial*. Cambridge: MIT Press.
- Simon, M. (1995): Reconstructing mathematics pedagogy from a constructivist perspective. *Journal for Research in Mathematics Education*, 26, 114-145.
- Slotta, J. & Chi, M. (2006): Helping Students Understand Challenging Topics in Science Through Ontology Training. *Cognition and Instruction*, 24(2), 261-289.
- Soeffner, H. G. (2004): Sozialwissenschaftliche Hermeneutik. In U. Flick, E. von Kardoff & I. Steinke (Hrsg.), *Qualitative Forschung. Ein Handbuch* (S. 164-175). Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch.
- Soper, K. (1995): *What is Nature?* Oxford: Blackwell Publishers.
- Spencer, H. (1882): *First Principles*. New York: D. Appleton and Company.
- Spitzer, M. (2003): *Lernen: Gehirnforschung und die Schule des Lebens*. Heidelberg; Berlin [u.a.]: Spektrum Akademischer Verlag.
- Stahelin, J., Harris, N. R. P., Appenzeller, C. & Eberhard, J. (2001): Ozone Trends: A Review. *Rev. Geophys.*, 39.
- Steffe, L. P. & D'Ambrosio, B. S. (1996): Using teaching experiments to enhance understanding of students' mathematics. In D. F. Treagust, R. Duit & B. J. Fraser (Hrsg.), *Improving teaching and learning in science and mathematics* (S. 65-76). New York: Teachers College Press.
- Steiner, G. (2001): Lernen und Wissenserwerb. In A. Krapp & B. Weidenmann (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie* (S. 139-205). Weinheim: Beltz Verlag.
- Sterman, J. & Booth-Sweeney, L. (2007): Understanding Public Complacency About Climate Change: Adults' Mental Models of Climate Change Violate Conservation of Matter. *Climatic Change*, 80(3), 213-238.
- Stern, E. (2003, 25.09.2003): Rezepte statt Rezeptoren. *Die Zeit*.
- Strauss, A. & Corbin, J. (1996): *Grounded Theory: Grundlagen Qualitativer Sozialforschung*. Weinheim: Beltz, Psychologie Verlags Union.
- Strike, K. A. & Posner, G. J. (1992): A Revisionist Theory of Conceptual Change. In R. A. Duschl & R. J. Hamilton (Hrsg.), *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice* (S. 147-176). Albany: State University of New York.
- Taber, F. & Taylor, N. (2008): Climate of Concern - A Search for Effective Strategies for Teaching Children about Global Warming. *International Journal of Environmental & Science Education*, 4(3), 97-116.
- Terhart, E. (1999): Konstruktivismus und Unterricht. Gibt es einen neuen Ansatz in der Allgemeinen Didaktik? *Zeitschrift für Pädagogik*, 45(5), 629-647.
- Treagust, D. & Duit, R. (2008): Conceptual change: a discussion of theoretical, methodological and practical challenges for science education. *Cultural Studies of Science Education*, 3(2), 297-328.
- Tulving, E. (1999): Study of memory: processes and systems. In J. K. Foster & M. Jelicic (Hrsg.), *Memory: systems, process, or function?* (S. 11-30). Oxford: Oxford University Press.
- Tyson, L., Venville, G., Harrison, A. & Treagust, D. (1997): A multidimensional framework for interpreting conceptual change events in the classroom. *Science Education*, 81(4), 387-404.
- UNCED (1992): Agenda 21. Paper presented on the UN Conference on Environment and Development. *Rio de Janeiro, Brazil*.
- Ungar, S. (2000): Knowledge, Ignorance and the Popular Culture: Climate Change Versus the Ozone Hole. *Public Understanding of Science*, 9, 297-312.
- van Koppen, K. (2000): Resource, Arcadia, Lifeworld: Nature Concepts in Environmental Sociology. *Sociologia Ruralis*, 40, 300-318.
- Vosniadou, S. (1994): Capturing and modelling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45-69.

- Vosniadou, S. (2002): On the nature of naive physics. In M. Limón & L. Mason (Hrsg.), *Reconsidering conceptual change: Issues in theory and practice* (S. 61-76). Dordrecht: Kluwer.
- Vosniadou, S. (2009): 'Conceptual Metaphor Meets Conceptual Change': Yes to Embodiment, No to Fragmentation. *Human Development*, 52, 198-204.
- Vosniadou, S. & Brewer, W. F. (1992): Mental models of the earth: a study of conceptual change in childhood. *Cognitive Psychology*, 24, 535-585.
- Vosniadou, S., Vamavakoussi, X. & Skopeliti, I. (2008): The framework theory approach to the problem of conceptual change. In S. Vosniadou (Hrsg.), *International handbook of research on conceptual change* (S. 3-34). New York: Erlbaum.
- Wachbroit, R. (1994): Normality as a Biological Concept. *Philosophy of Science*, 61, 579-591.
- Walker, G. (2007): *Ein Meer von Luft: Eine Naturgeschichte der Atmosphäre*. Berlin: Berlin-Verlag.
- Warneck, P. (1998): Book Review: William H. Schlesinger: Biogeochemistry, an Analysis of Global Change (1997). *Journal of Atmospheric Chemistry*, 31, 347-348.
- Weingart, P., Engels, A. & Pansegrau, P. (2000): Risks of communication: discourses on climate change in science, politics, and the mass media. *Public Understanding of Science* 9, 261-283.
- Weitzel, H. (2006): *Biologie verstehen: Vorstellungen zu Anpassung*. Oldenburg: Didaktisches Zentrum.
- Widodo, A. & Duit, R. (2004): Konstruktivistische Sichtweisen vom Lehren und Lernen und die Praxis des Physikunterrichts. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10, 232-254.
- Widodo, A. & Duit, R. (2005): Konstruktivistische Lehr-Lern-Sequenzen und die Praxis des Physikunterrichts. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 11, 131-146.
- Wilbers, J. & Duit, R. (2001): Untersuchungen zur Mikro-Struktur des anlogischen Denkens in Teaching Experimenten. In S. v. Aufschnaiter, Welzel, M. (Hrsg.), *Nutzung von Videodaten zur Untersuchung von Lehr-Lern-Prozessen* (S. 143-156). Münster: Waxmann.
- Wolcott, H. F. (1990): On seeking and rejecting validity in qualitative research. In E. Eisner & A. Pushkin (Hrsg.), *Qualitative inquiry in education: The continuing debate* (S. 121-152). New York: Teacher's College Press.
- Zabel, J. (2009): *Biologie verstehen: Die Rolle der Narration beim Verstehen der Evolutionstheorie*. Oldenburg: Didaktisches Zentrum.
- Zembylas, M. (2005): Three perspectives on linking the cognitive and the emotional in science learning: Conceptual change, socio-constructivism and poststructuralism. *Studies in Science Education*, 41, 91-116.
- Zerubavel, E. (1985): *The seven day circle: the history and meaning of the week*. New York: Free Press.