

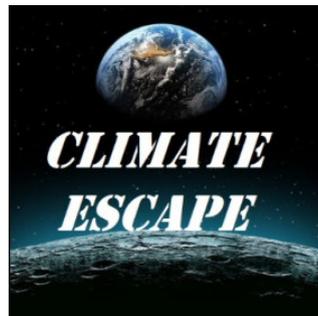
JOHANNES GUTENBERG-UNIVERSITÄT MAINZ

MASTERARBEIT

IM STUDIENGANG MASTER OF EDUCATION PHYSIK

Climate Escape

Planung, Durchführung und Reflexion
eines Schülerlabors zur Physik des Klimawandels
für die Sekundarstufe I



vorgelegt von

Timo Graffe

13. Fachsemester

Master of Education Physik und Geographie

Erstgutachter: Univ.-Prof. Dr. Uwe Gerd Oberlack

Zweitgutachter: Prof. Dr. Klaus Wendt

Datum: 21.10.2020

Abstract

Bei „Climate Escape“ handelt es sich um ein Schülerlabor zur Klimaphysik an der Universität Mainz, das von Schülerinnen und Schülern in Form eines interaktiven und abwechslungsreichen „Escape-Rooms“ mit anspruchsvollen Versuchsaufbauten und speziellen Dioramen im Kontext durchlebt wird.

Das Schülerlabor wurde für das „NaT-Lab-Physik“ der Universität Mainz konzipiert, um die Lernenden zu einer fachlich-kritischen Auseinandersetzung mit den Themen des anthropogenen Klimawandels und den daraus resultierenden physikalischen Konsequenzen anzuregen. Dafür werden an sechs Stationen elementare Kenntnisse, über die dem Klimawandel zugrundeliegenden physikalischen Prozesse in Atmosphäre und Ozean vermittelt. Um die Inhalte attraktiv und motivierend für Schüler*innen der Jahrgangsklassen 9/10 und der Oberstufe zu gestalten, wurden die Versuchsaufbauten gezielt unter den Prämissen der Kontextualisierung, Realitätsnähe und physikalischen Korrektheit konzipiert und konstruiert. Die Experimente stechen dabei in ihren Aufbauten bewusst aus dem Laborcharakter üblicher (Hoch-)Schul-Experimente heraus und orientieren sich an realitätsnahen Modellen.

Dem Schülerlabor liegt ein fiktives Escape-Room-Szenario zugrunde, bei dem die Schüler*innen die Messungen und Ergebnisse eines überfallenen Forschungslabors retten müssen. Dafür werden sie, wie bei einem Escape-Room üblich, Aufgaben und Rätsel lösen und dadurch Schlösser knacken, um das Schülerlabor bewältigen zu können. Um selbständiges Arbeiten der Experimentierenden zu realisieren, wird ein Tablet als „digitaler Moderator“ an den einzelnen Stationen mit den jeweiligen Arbeitsmaterialien genutzt. Die Lern- bzw. „Escape“- Umgebung ist mit Hilfe der gezielten Gamification, einer progressiven Arbeitsmaterialgestaltung und Methoden der Binnendifferenzierung darauf ausgelegt, von einer Vielzahl von Lernenden eigenständig und in Partnerarbeit bewältigt werden zu können. Die Modellexperimente legen inhaltlich einen Fokus auf den Strahlungshaushalt; also den Einfluss der Albedo und des anthropogenen Treibhauseffektes. Darauf bauen Folgen des Klimawandels wie der Meeresspiegelanstieg und die Ozeanversauerung auf. Weiterführend werden übergreifende und gesellschaftlich relevante Themen wie nachhaltiges Handeln und verantwortungsbewusste Lebensgestaltung behandelt. Das Projekt ist eine interdisziplinäre Lernumgebung, welche Bereiche aus Chemie, Biologie, Geografie und Politikwissenschaften mit denjenigen der Physik zusammenführt.

In dieser Arbeit werden die Konzeption, Durchführung und Evaluation des Schülerlabors für die Mittelstufe beschrieben. Die Entwicklung und Konstruktion der zugrundeliegenden experimentellen Aufbauten wurden in Zusammenarbeit mit Filip Sirrenberg durchgeführt. Eine Auslegung des Schülerlabors für die Oberstufe ist in seiner Masterarbeit zu finden. Die hier vorliegende schriftliche Ausarbeitung sowie die Lernaufgaben wurden nicht gemeinschaftlich erstellt. Das Schülerlabor wurde von insgesamt vier Schülerinnen durchgeführt und evaluiert. Aufgrund der Corona-Pandemie konnte kein Testdurchlauf mit einer größeren Gruppe Schüler*innen stattfinden.

Inhaltsverzeichnis

I. ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	1
II. TABELLENVERZEICHNIS.....	3
1. Einleitung und Motivation.....	4
2. Theoretische Grundlagen der Klimaphysik.....	8
2.1. Einführung in die Klimatologie.....	8
2.1.1. Wetter und Klima.....	8
2.1.2. Aufbau und Zusammensetzung der Atmosphäre.....	9
2.1.3. Kohlenstoffkreislauf.....	12
2.2. Strahlungsgesetze und Spektralbereiche.....	14
2.2.1. Schwarzkörperstrahlung.....	14
2.2.2. Planck'sches Strahlungsgesetz.....	15
2.2.3. Wien'sches Verschiebungsgesetz.....	16
2.2.4. Stefan-Boltzmann-Gesetz.....	17
2.2.5. Spektralbereiche der elektromagnetischen Strahlung.....	18
2.3. Der Strahlungshaushalt der Erde.....	19
2.3.1. Solare Einstrahlung.....	19
2.3.2. Energieverteilung der solaren Strahlung am Grunde der Atmosphäre.....	20
2.3.3. Albedo.....	21
2.3.4. Temperatur der Erde ohne Treibhauseffekt.....	23
2.3.5. Natürlicher Treibhauseffekt.....	24
2.3.6. Eigenschaften von Treibhausgasen.....	26
2.3.7. Kohlenstoffdioxid.....	28
2.3.8. Wasserdampf.....	29
2.3.9. Anthropogener Treibhauseffekt.....	30
2.3.10. Zukünftige Entwicklung.....	31
2.3.11. Positive Rückkopplungsprozesse und Kippunkte.....	32
2.4. Folgen des Klimawandels.....	34
2.4.1. Schmelzen des Meereises.....	34
2.4.2. Gletscherschmelzen und Meeresspiegelanstieg.....	35
2.4.3. Ozeanversauerung und Erwärmung der Ozeane.....	37
3. Didaktische und methodische Grundlagen.....	42
3.1. Allgemeiner Aufbau des Schülerlabors.....	42
3.2. Schülerlabor als Escape Room.....	43
3.3. Bildungsgehalt des Schülerlabors.....	45

3.4. Das Lehr-Lern-Modell	47
3.5. Kriterien kompetenzorientierter Lernaufgaben	50
3.6. Lernstile und Binnendifferenzierung	53
4. Konzeption der Stationen	56
4.1. Einstiegsphase	56
4.2. Station 1: Albedo	57
4.2.1. Lernziele.....	58
4.2.2. Fachliche Analyse der Versuche.....	59
4.2.3. Didaktische und methodische Analyse	63
4.3. Station 2: Treibhauseffekt	70
4.3.1. Lernziele.....	70
4.3.2. Fachliche Analyse der Versuche.....	71
4.3.3. Didaktische und methodische Analyse	74
4.4. Station 3: Eigenschaften von Treibhausgasen	78
4.4.1. Lernziele.....	79
4.4.2. Fachliche Analyse der Versuche.....	80
4.4.3. Didaktische und methodische Analyse	84
4.5. Station 3b: Anthropogener Treibhauseffekt und Kippunkte	89
4.5.1. Lernziele.....	89
4.5.2. Didaktische und methodische Analyse	90
4.6. Station 4: Meeresspiegelanstieg.....	94
4.6.1. Lernziele.....	94
4.6.2. Fachliche Analyse der Versuche.....	97
4.6.3. Didaktische und methodische Analyse	100
4.7. Station 5: Ozeanversauerung und die Erwärmung der Ozeane.....	106
4.7.1. Lernziele.....	107
4.7.2. Fachliche Analyse der Versuche.....	108
4.7.3. Didaktische und methodische Analyse	111
4.8. Station 6: Nachhaltigkeit	117
4.8.1. Lernziele.....	118
4.8.2. Fachliche Analyse der Versuche.....	119
4.8.3. Didaktische und methodische Analyse	121
4.9. Abschlussphase.....	125
5. Durchführung	127
5.1. Erste Versuchsgruppe	127
5.2. Zweite Versuchsgruppe	128

6. Evaluation und Diskussion der Ergebnisse	129
7. Fazit und Ausblick	133
III. LITERATURVERZEICHNIS	134
IV. DANKSAGUNGEN.....	141
V. ANHANG	143
V.I. Lernaufgaben (Kurzfassung)	143
V.I.I. Station 1: Albedo	143
V.I.II. Station 2: Treibhauseffekt	147
V.I.III. Station 3: Eigenschaften von Treibhausgasen	153
V.I.IV. Station 3b: Anthropogener Treibhauseffekt und Kippunkte	156
V.I.V. Station 4: Meeresspiegelanstieg	159
V.I.VI. Station 5: Ozeanversauerung und Erwärmung der Ozeane	165
V.I.VII. Station 6: Nachhaltigkeit	169
V.IV. Blanko-Fragebogen	171
V.V. Fragebogen	173

I. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Schüler*innenbefragung Gutenberg Gymnasium (eigene Darstellung)	5
Abb. 2: Vertikaler Aufbau der Atmosphäre (MPI für Meteorologie)	11
Abb. 3: Kohlenstoffkreislauf (LATIF 2009a: 41).....	13
Abb. 4: Hohlraumstrahler (eigene Darstellung).....	14
Abb. 5: Planck'sche Strahlungskurve (eigene Darstellung nach TIPLER 2019: 654).....	15
Abb. 6: Spektralbereiche der elektromagnetischen Strahlung (eigene Darstellung)	19
Abb. 7: Veranschaulichung zur Bestimmung der Solarkonstanten (eigene Darstellung)	20
Abb. 8: Solare Strahlungsspektren (SIRTL 2010: 8)	21
Abb. 9: Cool Roofs (eigene Darstellung nach Santa Monica Mirror 2017)	23
Abb. 10: Global und über das Jahr gemittelte Energiebilanz der Erde (LATIF 2009a: 56).....	25
Abb. 11: Normalschwingungen von Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf (eigene Darstellung nach DEMTRÖDER 2016: 321).....	28
Abb. 12: Gesamtabsorption von Kohlenstoffdioxid (Wikimedia Commons 2016)	29
Abb. 13: Anstieg des Kohlenstoffdioxidgehaltes in der Atmosphäre zwischen 1750 und 2010 (CIAIS und SABINE 2013: 493)	29
Abb. 14: Gesamtabsorption von Wasserdampf (Wikimedia Commons 2016)	30
Abb. 15: Änderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur (IPCC 2013: 25)	32
Abb. 16: Wasserdampf-Rückkopplung (eigene Darstellung).....	33
Abb. 17: Ausdehnung des nordhemisphärischen Meereises im September (IPCC 2013: 25)	35
Abb. 18: Mittlerer globaler Meeresspiegel (IPCC 2013: 30)	37
Abb. 19: Global gemittelter pH-Wert an der Meeresoberfläche (DKRZ a.o.J.).....	39
Abb. 20: Korallenbleiche im Great Barrier Reef (Wikimedia Commons 2006).....	40
Abb. 21: Escape-Room-Rätsel zur pH-Wert Bestimmung aus Station 5 (eigene Aufnahme)	44
Abb. 22: schematischer Aufbau des Lehr-Lern-Modells (LEISEN 2018: 2)	48
Abb. 23: „Überspringerseite“ (eigene Darstellung).....	54
Abb. 24: Aufbau Station 1 (eigene Aufnahme).....	57
Abb. 25: Modelllandschaften (eigene Aufnahme).....	59
Abb. 26: Albedometer bestehend aus zwei Luxmetern (eigene Aufnahme).....	60
Abb. 27: Versuch „Albedo“ mit Lampenhalterung (eigene Aufnahme)	60
Abb. 28: Wärmebildkamera (eigene Aufnahme).....	62
Abb. 29: Beispielaufgabe Wetterstation Nova Dimensao (Brasilien) (eigene Darstellung, Satellitenbilder Google Maps).....	65
Abb. 30: Bilder der vier Landschaften mit zugeordnetem Begriffskärtchen (eigene Aufnahme).....	65
Abb. 31: Dorfbauset, Planspiel zur Albedo (eigene Aufnahme)	67
Abb. 32: Aufbau Station 2 (eigene Aufnahme).....	70
Abb. 33: Versuch „Treibhauseffekt“ von DemoEx GmbH (eigene Aufnahme).....	72
Abb. 34: Planck'sche Strahlungskurve eines idealen Schwarzen Körpers bei einer Temp. von 80°C mit den Absorptionsbanden von CO ₂ (eigene Darstellung nach PHET).....	73
Abb. 35: Zuordnungsaufgabe für einen Transfer vom Real- in den Modellraum (eigene Darstellung) 75	
Abb. 36: Simulation „Treibhauseffekt“	76
Abb. 37: Aufbau Station 3 (eigene Aufnahme).....	79
Abb. 38: Versuch zur Messung der Treibhausgaswirkung von Wasserdampf (eigene Darstellung)	81
Abb. 39: Temperaturverlauf der von der Modellerde emittierten IR-Strahlung beim Einströmen von Wasserdampf in die Modellatmosphäre (Darstellung durch die App „Smart Probes“).....	81

Abb. 40: Planck'sche Strahlungskurve eines idealen Schwarzen Körpers bei einer Temperatur von 80°C mit den Absorptionsbanden von H ₂ O (eigene Darstellung nach PHET).....	82
Abb. 41: Versuch zur Messung der Treibhausgaswirkung von CO ₂ (eigene Darstellung).....	83
Abb. 42: Temperaturverlauf der von der Modellerde emittierten IR-Strahlung beim Einströmen von CO ₂ in die Modellatmosphäre (Darstellung durch die App „Smart Probes“)	83
Abb. 43: Temperaturverlauf der von der Modellerde emittierten IR-Strahlung beim Einströmen von Argon in die Modellatmosphäre (Darstellung durch die App „Smart Probes“)	84
Abb. 44: Apparatur mit vier Plexiglasröhren und Schlüsseln (eigene Darstellung)	85
Abb. 45: Kärtchen mit Strukturformel, Volumenanteil und Name wichtiger atmosphärischer Gase (eigene Darstellung)	86
Abb. 46: Molekülmodelle (von oben nach unten: Argon, Stickstoff, Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid) (eigene Aufnahme).....	87
Abb. 47: interaktives Visualisierungsmodell Kippunkte (eigene Aufnahme).....	92
Abb. 48: Temperaturkurven der unterschiedlichen RCP-Szenarien (DKRZ b o.J.)	92
Abb. 49: Aufbau Station 4 (eigene Aufnahme).....	95
Abb. 50: Versuchsaufbau zum Schmelzen von Gletschereis	97
Abb. 51: Versuch „thermische Ausdehnung von Wasser (eigene Aufnahme)	99
Abb. 52: Modelldorf mit möglichen Küstenschutzmaßnahmen (eigene Aufnahme)	104
Abb. 53: Aufbau Station 5 (eigene Aufnahme).....	107
Abb. 54: Versuchsaufbau 1 „Versauerung der Ozeane“ (eigene Aufnahme)	109
Abb. 55: Versuchsaufbau 2 „Versauerung der Ozeane bei unterschiedlichen Wassertemperaturen“ (eigene Aufnahme).....	110
Abb. 56: Schlauch mit T-Stück für den Versuchsaufbau 2 (eigene Aufnahme)	110
Abb. 57: Weltkarte mit UV-Schrift (eigene Aufnahme)	112
Abb. 58: Untersuchung von Holz, Kalk, Schiefer und Granit auf ein Reaktionsverhalten mit Säure (eigene Aufnahme)	112
Abb. 59: Reaktionsgleichungsschnipsel (eigene Aufnahme)	113
Abb. 60: Wirkungsgefüge als Lernprodukt (eigene Darstellung)	114
Abb. 61: interaktives Visualisierungsmodell (Ozean-Rückkopplungseffektes).....	116
Abb. 62: Aufbau Station 6 (eigene Aufnahme).....	117
Abb. 63: App „Worldwatchers“ (Worldwatchers o.J.).....	119
Abb. 64: Spielfeld des Spiels „Change your life“ (eigene Darstellung)	120
Abb. 65: Charakter „Jenni“ mit den dazugehörigen Startwerten (eigene Darstellung)	120
Abb. 66: Ereigniskarte „Upcyclin“ (eigene Darstellung)	121
Abb. 67: Uhr mit Geheimversteck (eigene Aufnahme)	126
Abb. 68: Antworten zu den Fragen 1 – 3 des Fragebogens in %	129
Abb. 69: Antworten zu den Fragen 7, 10 und 11 des Fragebogens in %	130
Abb. 70: Antworten zu den Fragen 15, 17 und 18 des Fragebogens in %	131

II. TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Zusammensetzung trockener und reiner Luft (SCHÖNWIESE 2003: 23)	10
Tab. 2: Durchschnittliche Albedo für verschiedene terrestrische Oberflächen: bei solarer Einstrahlung (0,3 – 4 µm Wellenlänge) (SCHÖNWIESE 2003: 123)	22
Tab. 3: Wärmeausdehnungskoeffizient für Wasser (KLOSE 2016: 129).....	36
Tab. 4: zeitlicher Ablauf des Schülerlabors für Gruppe A	42
Tab. 5: Abfolge der Stationen für die Gruppen A bis E	43
Tab. 6: Probemessungen der Albedo der vier Modelllandschaften (Messhöhe 27 cm).....	61
Tab. 7: Probemessungen der Albedo der vier Holzoberflächen (Messhöhe 14 cm)	62
Tab. 8: Probemessungen der Oberflächentemperatur der vier Dioramen (Messhöhe 14 cm).....	63
Tab. 9: Probemessungen zur Schmelzzeit des Gletschereises.....	98
Tab. 10: Zusammenhang zwischen Wasservolumen und Anstieg des Wasserspiegels beim Versuch Gletscherschmelzen	98
Tab. 11: Probemessungen zur Volumenausdehnung von Wasser bei einem Temperaturunterschied von 5°C	99
Tab. 12: Zusammenhang zwischen Wasservolumen der Ozeane und Anstieg des Meeresspiegels ..	102

1. Einleitung und Motivation

„You say you love your children above all else and yet you are stealing their future in front of their very eyes.“ (THUNBERG 12.12.2018)

Das sind die Worte eines Kindes; eines Kindes, das Angst um seine und die Zukunft aller Generationen hat und deshalb den Menschen dieser Erde den schweren Vorwurf macht, dass sie auf Kosten ihrer Kinder leben. Dieses Kind, GRETA THUNBERG, ist heute 17 Jahre alt und inzwischen die bekannteste Klimaaktivistin der Welt. Sie hatte angefangen die Schule für den Klimawandel zu bestreiken und Millionen von Kindern und Jugendlichen sind ihrem Ruf gefolgt. Es bildeten sich weltweite Proteste und die Community der Fridays for Future wurde gegründet. Allerdings nicht nur Kinder und Jugendlichen fangen an zu protestieren, sondern auch Studierende, Wissenschaftler*innen, Eltern und schlussendlich ein nennenswerter Teil der Bevölkerung in vielen Ländern und Erdteilen. Und wofür? Für die Umsetzung des Pariser Klimaabkommens, das eine Begrenzung der Erderwärmung auf unter 2°C, idealerweise auf 1,5°C vorsieht, sodass das Klimasystem keine irreversiblen Schäden erleidet (BMU 2017).

Während in Deutschland die Folgen des anthropogenen Klimawandels kaum wahrnehmbar sind, sieht es in anderen Regionen der Erde viel dramatischer aus. Hier spürt die ansässige Bevölkerung bereits heute die Auswirkungen in Form von Dürren, Überschwemmungen und anderen Extremwetterereignissen. Dabei betreffen die klimatischen Entwicklungen vor allem die Länder, deren Bevölkerung aktuell ohnehin am Existenzminimum lebt.

Der Klimawandel ist kein neues Phänomen. Einen natürlichen Klimawandel gibt es schon seit sich eine Atmosphäre um die Erde überhaupt gebildet hat. Der anthropogene Klimawandel stellt dabei im Vergleich zum Alter der Erde ein sehr kurzfristiges und neues Phänomen dar, aber für uns Menschen, ist er ein Problem, das schon länger bekannt ist. So warnte bereits ALEXANDER VON HUMBOLDT vor 200 Jahren vor einem menschengemachten Klimawandel (vgl. VON HUMBOLDT 1844). Wenn das Problem also schon seit 200 Jahre bekannt ist, müssten die Menschen nicht schon längst die passenden Gegenmaßnahmen gefunden und initiiert haben?

HANS JOACHIM SCHELLNHUBER (2015), langjähriger Leiter des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, sagte dazu: *„Der Mensch weiß, dass sein Verhalten klimaschädlich ist, er ändert nichts daran. Stattdessen werden wissenschaftliche Erkenntnisse gelehnt, um so weitermachen zu können wie bisher. Dabei haben Untersuchungen gezeigt, dass es für bestimmte Systeme auf der Erde Schwellenwerte, sogenannte Kippelemente [...] gibt, bei deren Überschreiten die Systeme in einem qualitativ anderen*

Zustand überführt werden [...] mit globalen Auswirkungen und möglicherweise irreversibel“ (FICKERT und HERGET 2019: 5).

Dieses Zitat zeigt, wie wichtig dieses Thema für die Gegenwart und die Zukunft sämtlicher Gesellschaften und für das Überleben eines Großteils der Weltbevölkerung ist. Um die Menschen, entgegen des von SCHELLNHUBER kritisierten Verhaltens, zu klimabewussten Verhaltensweisen zu erziehen, müssen sie sich mit dem Klimawandel aus wissenschaftlicher Sicht auseinandersetzen und die dahinterstehenden Prozesse verstehen. Die wichtigsten Orte für die Aneignung von Wissen zu einem solchen relevanten Thema bilden die Schulen und Hochschulen. Im schulischen Kontext stellt der Klimawandel eine interdisziplinäre Lernumgebung dar. Es spricht nicht nur die naturwissenschaftlichen Fächer, Physik, Chemie und Biologie an, sondern auch gesellschaftswissenschaftliche Fächer, wie Geographie, Sozialkunde und Geschichte. Betrachtet man die rheinland-pfälzischen Lehrpläne dieser Fächer, kommt das Thema „Klimawandel“ leider explizit kaum vor (vgl. MBWWK 2014; MBWWK 2016). Zwar wird der Klimawandel in der Geographie im Vergleich zu den anderen Fächern in einigen Themenfeldern aufgegriffen, spielt aber dort eine untergeordnete Rolle. In der Physik wird es noch weniger thematisiert und dem Oberstufenlehrplan ist lediglich ein Verweis als Wahlmodul und eine Empfehlung für eine fächerübergreifende Lerneinheit zu entnehmen.

Betrachtet man im Gegensatz dazu die Schülerperspektive, so wird von dieser sogar die Einbindung dieses Themas in den Schulunterricht als eigenständiges Fach gefordert. Dies zeigt eine Erhebung am Gutenberg-Gymnasium in Mainz, die im Rahmen dieser Ausarbeitung durchgeführt wurde (siehe Abb. 1). 118 Schüler*innen von der 7. bis 13. Klasse wurden gefragt, ob sie es wichtig fänden, dass man sich in der Schule mit dem Klimawandel beschäftigt. Dabei kam heraus, dass die Schüler*innen das Thema mit 84,8% als wichtig bzw. mit 54% als „sehr wichtig“ benannten. Nur 1,6% der Schüler*innen empfanden es als unwichtig.

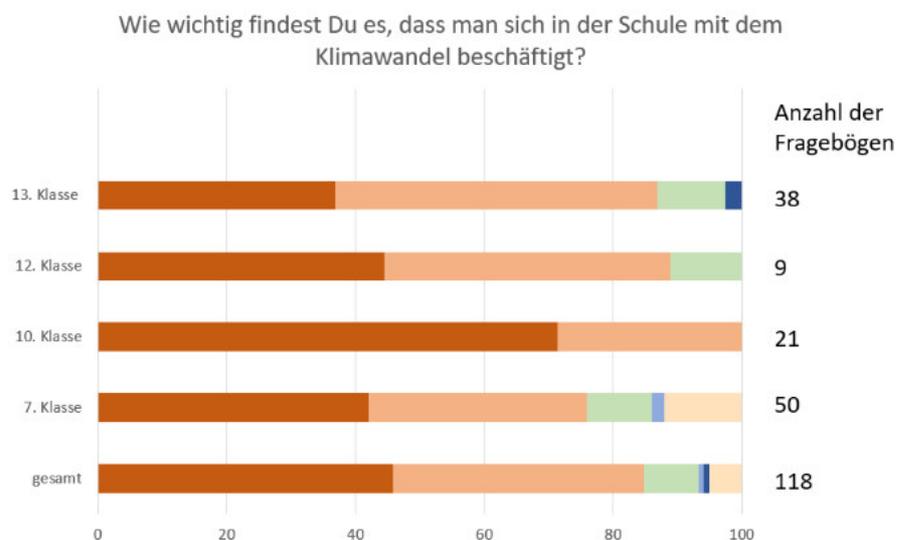


Abb. 1: Schüler*innenbefragung Gutenberg Gymnasium (eigene Darstellung)

Insgesamt wird deutlich, dass es von außerordentlicher Relevanz ist, den Schülerinnen und Schülern ein Angebot zu schaffen, sich mit dem Klimawandel auseinanderzusetzen. Dies kann beispielsweise in Form eines Schülerlabors passieren, das als Ferienkurs angeboten wird oder mit der Schulklasse als externen Lernort besucht werden kann, wie es z.B. beim NaT-Lab Physik der Universität Mainz der Fall ist.

Die hier vorgelegte Arbeit befasst sich konkret mit der Konzeption, Durchführung und Evaluation eines solchen Schülerlabors. Aufgrund der weltweiten Pandemiesituation wurde der Fokus auf die Konzeption gelegt, da es nicht möglich war, mit einer größeren Zahl von Schülerinnen und Schülern die Experimente im Labor durchzuführen. Das Ziel des Schülerlabors ist es, den Schülerinnen und Schülern die physikalischen Prinzipien, die verantwortlich für den Klimawandel sind, wie auch die Folgen des Klimawandels zu vermitteln, sowie eine Auseinandersetzung mit nachhaltigem Handeln anzustoßen und ihnen eine verantwortungsbewusste Lebensgestaltung näher zu bringen. Dabei wurde das Schülerlabor interdisziplinär aufgebaut, da auch Aspekte aus Chemie, Biologie und Geographie eine wichtige Rolle spielen. Trotzdem wurde darauf geachtet, dass der Fokus auf dem Fach „Physik“ liegt.

Zur Umsetzung des Schülerlabors wurden sechs Stationen mit verschiedenen Modellexperimenten konzipiert und konstruiert. Durch Dioramen und Modelllandschaften, die ein möglichst genaues optisches Abbild der Natur anstreben, wird kontextnahes Lernen gefördert. Eine weitere Besonderheit des Labors ist die Gestaltung als „Escape Room“, was sich positiv auf Motivation und Interesse der Schüler*innen auswirken soll. Jede Station fokussiert eine unterschiedliche Facette des Themas „Klimawandel“. Station 1 beschäftigt sich mit der Albedo, Station 2 mit dem Treibhauseffekt, Station 3 mit den Eigenschaften von Treibhausgasen und dem anthropogenen Treibhauseffekt, Station 4 mit dem Meeresspiegelanstieg, Station 5 mit der Ozeanversauerung und Station 6 mit nachhaltigem Handeln.

Diese Arbeit ist folgendermaßen gegliedert: Zuerst wird die Theorie, die dem Klimawandel zugrunde liegt, näher beschrieben. Dabei wird gezielt auf wesentliche Punkte eingegangen: Zu Beginn gibt es eine Einführung in die Klimatologie, in der Begrifflichkeiten wie „Wetter und Klima“ geklärt, sowie der Aufbau und die Zusammensetzung der Atmosphäre und der Kohlenstoffkreislauf näher beschrieben werden. Darauf folgen die physikalischen Grundlagen in Form der Strahlungsgesetze. Im nächsten Punkt wird der Strahlungshaushalt der Erde betrachtet. Hier werden unter anderem die Albedo eingeführt und der Treibhauseffekt näher erläutert. Abschließend werden die Folgen des Klimawandels exemplarisch am Schmelzen des Meereises, dem Gletscherschmelzen, dem Meeresspiegelanstieg und der Ozeanversauerung diskutiert. Nach der Theorie folgt die fachdidaktische Analyse. Zuerst wird allgemein auf den didaktischen und methodischen Aufbau des Schülerlabors eingegangen. Daran anschließend wird eine didaktische und methodische Analyse der einzelnen Stationen dargelegt. Im nachfolgenden Kapitel 5 wird die Durchführung des Schülerlabors „Climate Escape“, die mit zwei

Schülergruppen à zwei Personen stattfand, näher beschrieben und dabei aufgetretene Schwierigkeiten aus Sicht der Betreuer und Lernenden näher erläutert. Im Schlussteil folgt eine Evaluation der praktischen Durchführung sowie ein allgemeines Fazit und Ausblick. Im Anhang sind zudem alle wichtigen Dokumente, die einzelnen Aufgaben, die Fragebögen und weitere Aspekte der Arbeit und Projekts betreffend angefügt.

2. Theoretische Grundlagen der Klimaphysik

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die theoretischen Grundlagen, auf denen die Stationen des Schülerlabors basieren. Diese wurden bei der Konzeption der Lernaufgaben altersgerecht didaktisch reduziert.

2.1. Einführung in die Klimatologie

2.1.1. Wetter und Klima

Um einen Einblick in die Klimatologie zu gewinnen, müssen zuerst einmal wichtige Grundbegriffe, wie Wetter und Klima, definiert und voneinander differenziert werden. Das Wort „Wetter“ stammt von dem althochdeutschen „wetar“ ab und bedeutet übersetzt „Wind, Wehen“ (vgl. Duden o.J.). Diese Übersetzung hat insofern heute noch Gültigkeit, als dass es sich bei „Wind“ um ein kurzfristiges und spürbares Ereignis handelt. Nur ist der Wind ein kleiner Teilaspekt von dem Begriff, der heutzutage als Wetter bezeichnet wird. In der Meteorologie wird „Wetter“ als kurzfristiger und messbarer Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort benannt (LATIF 2009a: 11). Unter dem Begriff „kurzfristig“ versteht man Zeitskalen im Bereich von Minuten bis Tagen. Der Zustand der Atmosphäre wird mithilfe von verschiedenen Messgrößen, den Klimaelementen, gemessen. Hierzu gehören unter anderem Temperatur, Luftfeuchte, Niederschlag und Wind, aber auch Strahlungsgrößen, Schadstoffkonzentrationen und viele weitere (SCHÖNWIESE 1994: 56).

Der Begriff „Klima“ wird oft als durchschnittlicher Zustand der Atmosphäre über einen langen Zeitraum definiert. Eine eng gefasste Definition des Begriffes Klima wird von vielen Autoren kritisiert (vgl. SCHÖNWIESE 1994: 50; LATIF 2009a: 11). In der Literatur gibt es zahlreiche Definitionen, die sich je nach fachlichen Aspekten unterscheiden. SCHÖNWIESE hat versucht eine allgemeingültige Definition folgendermaßen zu formulieren:

„Klima ist die für einen Standort, eine definierbare Region oder ggf. auch globale statistische Beschreibung der relevanten Klimaelemente, die für eine nicht zu kleine zeitliche Größenordnung die Gegebenheiten und Variationen der Erdatmosphäre hinreichend charakterisiert. [...]“ (SCHÖNWIESE 2003: 56).

Diese Definition bedarf einiger kurzen Erläuterungen. Unter einer statistischen Beschreibung der Klimaelemente versteht man nicht nur den Mittelwert der Klimaelemente, sondern auch beispielsweise deren Varianzen oder die Wahrscheinlichkeiten für Extremwetterereignisse (SCHÖNWIESE 2003: 56). Um diese statistischen Eigenschaften mit bestimmter Genauigkeit und Verlässlichkeit beschreiben zu können, benötigt man einen langen Beobachtungszeitraum. Die World Meteorological Organization (WMO) hat einen solchen Mindestbeobachtungszeitraum auf 30 Jahre festgelegt (SCHÖNWIESE 2003:

51). Damit die Daten der einzelnen Wetterstationen untereinander und auch zeitlich miteinander verglichen werden können, hat die WMO Normalperioden (climatic normals) definiert von 1991-2020, 1961-1990, 1931-1960 usw. (SCHÖNWIESE 2003: 51).

In den beiden Definitionen spielt der Begriff der Atmosphäre eine kennzeichnende Rolle als Ort, an dem sich Wetter- und Klimaphänomene abspielen. Aus diesem Grund ist eine genauere Betrachtung dieses Teilsystems der Geosphäre von wichtiger Bedeutung.

2.1.2. Aufbau und Zusammensetzung der Atmosphäre

Wie bereits erwähnt, ist die Atmosphäre die Komponente des Erdsystems, in der Wetter- und Klimaprozesse stattfinden (vgl. WEISCHET und ENDLICHER 2012: 41). Unter der Atmosphäre versteht man „eine von der Gravitationskraft eines Himmelskörpers festgehaltene Gashölle“ (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 39). In dieser Arbeit wird unter dem Begriff „Atmosphäre“ speziell die Atmosphäre der Erde verstanden.

Diese Atmosphäre setzt sich aus verschiedenen Bestandteilen zusammen. Hierzu zählen die Hydrometeoren, d.h. Wasser im festen und flüssigen Aggregatzustand in Form von Schnee, Eis, Wolkentröpfchen etc., die Aerosole und die unsichtbaren Gase. Unter den Aerosolen versteht man „feste und zum Teil auch flüssige, anorganische und organische Schwebpartikel (z.B. Mineralbruchstücke, Pollen, Salzkristalle, Ruß)“ (ebd.). Die unsichtbaren Gase setzen sich aus Wasserdampf und den permanenten Gasen, welche die trockene, reine Luft bilden, zusammen. Die Hauptbestandteile dieses Gasgemisches sind Stickstoff, Sauerstoff, Argon und Kohlenstoffdioxid. Hinzu kommen noch viele weitere Spurengase (ebd.). Die Volumenanteile und die Verweilzeiten der einzelnen Gase sind aus Tab. 1 zu entnehmen.

Zu der Tab. 1 sind folgende beiden Ergänzungen zu machen: Die Anteile an Ozon und Wasserstoff sind zeitlich und räumlich sehr variabel (vgl. WEISCHET und ENDLICHER 2012: 39). Das gleiche gilt auch für die Verweilzeiten, die von chemischen Reaktionen und Stoffflüssen zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre, Pedosphäre und Biosphäre abhängen (vgl. SCHÖNWIESE 2003: 23f.).

Die unterschiedlichen Gase sind in der Atmosphäre (genauer in der Homosphäre) gleichanteilig durchmischt und nicht nach ihren unterschiedlichen Massen geschichtet (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 39). Diese turbulente Durchmischung der Gase kommt durch die vielen Zirkulationssysteme auf lokaler und globaler Ebene zustande (LATIF 2009a: 21). Für den Klimawandel spielen vor allem die Spurengase, wie Kohlenstoffdioxid, Methan und Distickstoffoxid, eine wichtige Rolle, da sie durch ihre Treibhauswirksamkeit den Wärmehaushalt der Erde beeinflussen und relativ lange Verweilzeiten in der Atmosphäre

aufweisen. Die Veränderung ihres Anteils in der Atmosphäre durch den Menschen ist die Hauptursache des anthropogenen Klimawandels (SCHÖNWIESE 2003: 24).

Tab. 1: Zusammensetzung trockener und reiner Luft (SCHÖNWIESE 2003: 23)

¹⁾Werte aus dem Jahr 2018 (WMO 2019: 2)

²⁾ kein einheitlicher Wert verfügbar, Verweilzeit des anthropogenen Anteils ca. 120 a

Gas	Volumenanteil	Verweilzeit
Stickstoff N_2	78,084 %	> 1000 a
Sauerstoff O_2	20,946 %	> 1000 a
Argon Ar	0,934 %	> 1000 a
Kohlenstoffdioxid CO_2	408 ppm ¹⁾	5 – 15 a ²⁾
Neon Ne	18,18 ppm	> 1000 a
Helium He	5,24 ppm	> 1000 a
Krypton Kr	1,14 ppm	> 1000 a
Xenon X	0,09 ppm	> 1000 a
Ozon O_3	0,05-0,015 ppm	< 4 m
Wasserstoff H_2	0,52 ppm	2 a
Methan CH_4	1,87 ppm ¹⁾	15 a
Distickstoffoxid N_2O	0,33 ppm ¹⁾	120 a

Nachdem die Zusammensetzung der Atmosphäre genauer betrachtet wurde, ist es notwendig den vertikalen Aufbau und dessen Besonderheiten näher zu erläutern, da dieser die klimatologischen Verhältnisse auf der Erde maßgeblich beeinflusst. Die Vertikalausdehnung der Atmosphäre kann gegliedert werden nach (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 42):

- der chemischen Zusammensetzung
- der elektrischen Ladung der Atome und Moleküle (Ionenkonzentration)
- der Temperatur und dem Reibungseinfluss

Eine Gliederung nach der Zusammensetzung findet in Homosphäre und Heterosphäre statt. In der Homosphäre sind die einzelnen Gase noch gleichanteilig durchmischt. Ab einer Höhe zwischen 80 und 100 km geht die Homo- in die Heterosphäre über. Hier herrscht eine Aufschichtung der Gase nach ihrem Molekulargewicht vor. Das heißt, die schwerste Substanz befindet sich aufgrund der Gravitation ganz unten und die leichteste ganz oben (vgl. WEISCHET und ENDLICHER 2012: 39ff.; SCHÖNWIESE 2003: 21).

Eine weitere Möglichkeit der Gliederung ist nach der Ionenkonzentration in Neutrosphäre, Ionosphäre und Protonosphäre. Die Neutrosphäre bildet den Bereich der Atmosphäre, in dem größtenteils keine ionisierten Atome und Moleküle vorliegen. Ab einer Höhe von ca. 70 bis 80 km schließt die Ionosphäre

an, die eine hohe Ionenkonzentration aufweist. Im Anschluss in einer Höhe von etwa 1000 bzw. 2000 km folgt die Protonosphäre. In diesem Bereich der Atmosphäre bilden Wasserstoffkerne (Protonen) die überwiegende Teilchenkonzentration (ebd.).

Die dritte mögliche Einteilung und auch die relevanteste für die Klimatologie ist die Gliederung nach Temperatur und Reibungseinfluss (siehe Abb. 2). Das unterste Stockwerk bildet die Troposphäre. Diese wird nach unten begrenzt durch die Erdoberfläche und nach oben durch die Tropopause. In der Troposphäre ist neben einer Abnahme des Luftdrucks auch eine Abnahme der Temperatur im zeitlichen und räumlichen Mittel mit der Höhe festzustellen (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 42). Während die Temperatur auf der Erdoberfläche im Durchschnitt 15°C beträgt, sind es am oberen Ende der Troposphäre nur noch -60°C (LATIF 2009a: 17). Der hypsometrische Temperaturgradient schwankt räumlich und zeitlich sehr stark und beträgt im Mittel zwischen 0,5 und 0,6°C pro 100 m (vgl.

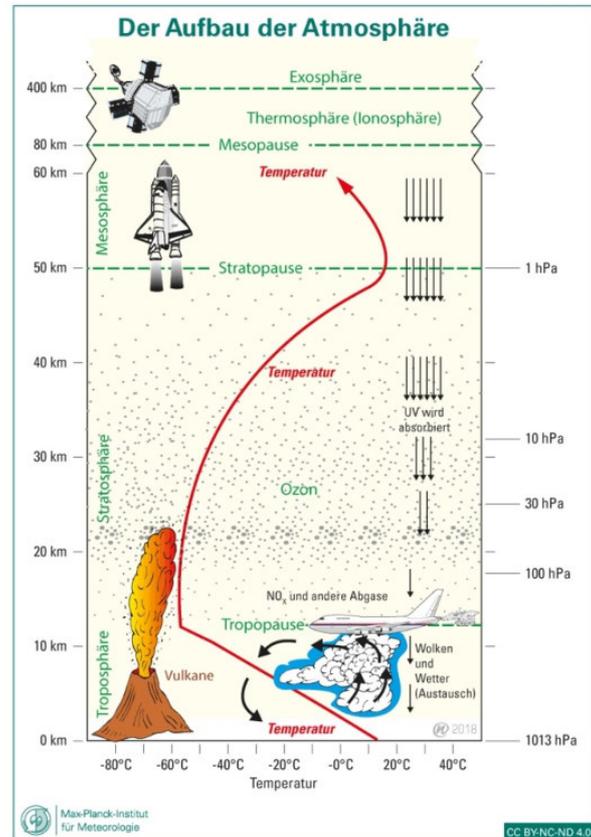


Abb. 2: Vertikaler Aufbau der Atmosphäre (MPI für Meteorologie)

WEISCHET und ENDLICHER 2012: 42). Diese Sphäre ist vor allem für Wetter und Klima relevant, da sie circa 80% der Luftmasse und den gesamten Wasserdampf enthält (LATIF 2009a: 17).

Die Grenzschicht zwischen Tropo- und Stratosphäre bildet die Tropopause. Diese befindet sich im Durchschnitt in einer Höhe von rund 11 km (SCHÖNWIESE 2003: 20). Diese Höhe ist aber unter anderem stark abhängig von der geographischen Breite, der Jahreszeit und den Wettervorgängen in der Troposphäre (vgl. LATIF 2009a: 17; WEISCHET und ENDLICHER 2012: 43). So befindet sich die Tropopause über dem Äquator in 16 bis 17 km und an den Polen nur in 8 bis 9 km Höhe (vgl. WEISCHET und ENDLICHER 2012: 42). Auch die Temperatur unterscheidet sich stark nach der geographischen Breite. An den Polen weist die Tropopause Temperaturen von -45°C und in den äquatornahen Gebieten von bis zu -80°C auf (LATIF 2009a: 17).

Das zweite Stockwerk bildet die Stratosphäre. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass über große vertikale Distanzen Isothermie herrscht bis dann ab etwa 20 km eine allmähliche Temperaturzunahme stattfindet (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 43). In einer Höhe von ungefähr 50 km ist die Temperatur

wieder auf 0°C angestiegen (LATIF 2009a: 17f.). Die Erwärmung der Stratosphäre kann durch die Ozonschicht erklärt werden, die ihr Konzentrationsmaximum in 30 km Höhe hat. Das Ozon absorbiert die kurzwelligeren Bereiche des Sonnenspektrums, was eine Spaltung der chemischen Bindungen (Photodissoziation) und eine Erwärmung der Atmosphäre zur Folge hat (ebd.). Diese Prozesse der Photodissoziation des Sauerstoffs und der Rekombination zu Ozon finden auf Höhe der Stratopause in 50 km statt. Eine starke Ozonkonzentration in 30 km Höhe ist deshalb festzustellen, dass die schwereren Ozonmoleküle absinken und sich sammeln (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 44).

Oberhalb dieser isothermischen Grenzschicht befindet sich die Mesosphäre, die sich bis zu einer Höhe von circa 80 km erstreckt. In diesem Stockwerk herrscht eine vertikale Temperaturabnahme vor bis zu einem Minimum von -100°C in 80 km Höhe. Dieses Minimum bildet die Mesopause und damit die Grenze der Mesosphäre (LATIF 2009a: 17). Das anschließende Stockwerk bildet die Thermosphäre mit einem Höhenbereich von ca. 80 bis 400 km. In diesem Bereich ist die Teilchendichte so gering, dass eine Temperaturmessung nicht mehr möglich ist, sondern nur die Strahlungsenergien bestimmt werden können (ebd.). Das letzte Stockwerk bildet die Exosphäre, in der die Atmosphäre sukzessive in den interplanetarischen Raum übergeht. Aus diesem Grund kann keine obere Grenzfläche festgelegt werden (SCHÖNWIESE 2003: 18). Man kann nur feststellen, dass bei einer Höhe von 1000 km die Gravitationskraft der Erde nicht ausreicht, um die Teilchen an die Atmosphäre zu binden, sodass die Diffusion in den interplanetarischen Raum überwiegt (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 44).

2.1.3. Kohlenstoffkreislauf

Obwohl Kohlenstoffdioxid nur als Spurengas mit einer Häufigkeit von weniger als einem Promille in der Atmosphäre vorkommt, hat es einen großen Einfluss auf den anthropogenen Treibhauseffekt und damit auf den Klimawandel. In der Erdkruste stellt Kohlenstoff immerhin das 13. häufigste Element dar und kommt besonders in den Ozeanen vor. Dabei durchläuft Kohlenstoff einen globalen Kreislauf durch Atmosphäre, Hydrosphäre, Pedosphäre und Biosphäre. Einige Komponenten dieses Kreislaufes agieren für einen bestimmten Zeitraum als Speicher für Kohlenstoff, wie der Ozean, die Böden und die Vegetation. Ein solcher Zeitraum kann von Minuten bis zu tausenden von Jahren betragen (vgl. MPG 2010).

Abbildung: Der globale Kohlenstoffkreislauf für die 1990er-Jahre
LATIF, M. (2009a): Klimawandel und Klimadynamik. Stuttgart: 41.

Abb. 3: Kohlenstoffkreislauf (LATIF 2009a: 41)

Abbildung 3 zeigt schematisch und idealisiert den globalen Kohlenstoffkreislauf. Bei den Zahlenwerten in der Abbildung handelt es sich um die globale Bilanz des atmosphärischen Kohlenstoffdioxids für die 1990-er Jahre. Diese Werte sind in Gigatonnen Kohlenstoff angegeben und wurden aus instrumentellen Messungen und Residuenbildung bestimmt. In der Abbildung werden Reservoirs durch Rechtecke und Flüsse zwischen den Reservoirs durch Pfeile dargestellt. Reservoirs und Flüsse des Kohlenstoffs, der durch anthropogene Eingriffe in den Kreislauf gelangt ist, sind in rot markiert. Zu beachten ist, dass diese Bilanz durch natürliche Klimaschwankungen, wie durch Änderungen der Ozeanzirkulationen, verfälscht werden kann (vgl. LATIF 2009a: 41f.).

Aus Abb. 3 geht hervor, dass die natürlichen Kohlenstoffflüsse zwischen Ozean, Atmosphäre und Land im Allgemeinen im Gleichgewicht sind. So beträgt der Kohlenstofffluss von der Atmosphäre in den oberen Ozean 70 Gt pro Jahr und in die andere Richtung 70,6 Gt pro Jahr. Diese Balance, die viele Jahrhunderte lang nahezu konstant war, wird durch den Einfluss des Menschen gestört (LATIF 2009a: 41). Seit der Industrialisierung um 1800 ist der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre stark angestiegen. Dieser Anstieg ist zu 75% auf die Verbrennung von fossilen Brennstoffen und zu 25% auf Landnutzungsänderungen, vor allem durch Brandrodungen, zurückzuführen (LATIF 2009a: 40). Auf diese Weise gelangen in den 1990-er Jahren 8 Gt Kohlenstoff jährlich in die Atmosphäre. 2011 lag allein schon der Wert durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen bei 9,5 Gt C pro Jahr (IPCC 2013: 16). Von dem Kohlenstoff in der Atmosphäre werden 60% durch Ozean (2,2 Gt C/Jahr) und Landbiosphäre (1,0 Gt C/Jahr) aufgenommen (vgl. MPG 2010; LATIF 2009a: 41). Die marine CO₂-Aufnahme und die Verfrachtung in tiefere Ozeanschichten werden im Abschnitt 2.4.3. „Ozeanversauerung und Erwärmung der Ozeane“ spezifisch diskutiert. Die typischen Vertreter für Landbiosphärensenken sind der Amazonas-Regenwald und

die borealen Nadelwälder. Typische Ozeansenken sind der Nordatlantik und das Südpolarmeer (MPG 2010).

Bei der Betrachtung der Flüsse ist festzustellen, dass die verschiedenen globalen Senken nicht ausreichen, um einen Kohlenstoffanstieg in der Atmosphäre zu verhindern (LATIF 2009a: 44). So nimmt der Kohlenstoffgehalt in der Atmosphäre nach der Abb. 41 jährlich um 3,2 Gt C zu (LATIF 2009a: 41). Zusammenfassend ist zu sagen, dass tiefe Kenntnisse über den Kohlenstoffkreislauf wichtig sind, um die Ursachen des Klimawandels erklären und die Folgen besser abschätzen zu können.

2.2. Strahlungsgesetze und Spektralbereiche

2.2.1. Schwarzkörperstrahlung

Um den Strahlungshaushalt der Erde sowie den Treibhauseffekt näher beschreiben zu können, sind fundierte Kenntnisse der Strahlungsgesetze unabdingbar. Die Quelle für die Energie des Strahlungshaushalt bildet fast ausschließlich die Sonne. Die Sonne kann annähernd als Schwarzer Strahler betrachtet werden (DEMTRÖDER 2000: 77). Unter einem Schwarzen Strahler versteht man einen idealen Temperaturstrahler. Das heißt, dass die abgestrahlte Energie nur von der Temperatur des Körpers abhängt (vgl. MERTINS und GILBERT 2011: 240; RAITH et al. 2001: 146). Die Absorptionseigenschaften von realen Körpern werden mit dem spektralen Absorptionsgrad beschrieben (LÜDERS und VON OPPEN 2012: 474):

$$\alpha(\lambda) = \frac{\text{absorbierte Strahlungsleistung}}{\text{einfallende Strahlungsleistung}}$$

Bei einem Schwarzen Strahler ist dieser Absorptionsgrad $\alpha(\lambda) = 1$ sowie gleichermaßen auch sein Emissionsgrad $\epsilon(\lambda) = 1$, der definiert wird durch (ebd.):

$$\epsilon(\lambda) = \frac{\text{emittierte Strahlungsleistung}}{\text{Strahlungsleistung eines schwarzen Strahlers}}$$

Ein annähernd idealer Schwarzer Strahler kann mit einem Hohlraum realisiert werden, in dem sich ein kleines Loch befindet (siehe Abb. 4). Das Loch absorbiert die eintretende Strahlung vollständig unabhängig von deren Wellenlänge. Die Wände des Hohlraums stehen mit dem Inneren im thermischen Gleichgewicht, weshalb die absorbierte Energie gleich der emittierten Energie entspricht (MERTINS und GILBERT 2011: 240). Wenn man die Schwarzkörperstrahlung in kleine

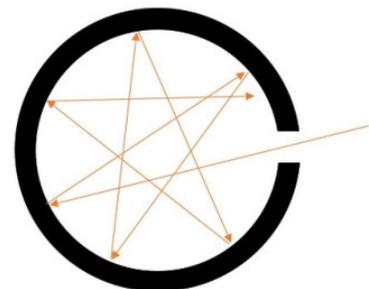


Abb. 4: Hohlraumstrahler (eigene Darstellung)

Wellenlängenbereich zerlegt erhält man die spektrale Intensitätsverteilung, die nur von der Temperatur des Körpers abhängt und durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben werden kann (vgl. LÜDERS und VON OPPEN 2012: 474; MERTINS und GILBERT 2011: 240).

2.2.2. Planck'sches Strahlungsgesetz

MAX PLANCK stellte Anfang des 20. Jahrhunderts eine Interpolationsformel auf, die bei kleinen Wellenlängen in die Wien'sche Formel und bei großen Wellenlängen in die Rayleigh-Jeans-Formel übergeht (vgl. LÜDERS und VON OPPEN 2012: 476; DEMTRÖDER 2000: 76). Diese Formel stimmte sehr gut mit den experimentellen Befunden überein. PLANCK leitete sie über die damals noch völlig unbekannt Quantenhypothese her. Dieser revolutionäre Ansatz ging davon aus, dass atomare Oszillatoren Energie in Quanten emittieren und absorbieren. Diese Quanten sind abhängig von der Frequenz ν ihrer Eigenschwingung und dem ganzzahligen Vielfachen eines Minimalquants $E = h\nu$ mit $h =$ Planck'sches Wirkungsquantum (LÜDERS und VON OPPEN 2012: 476).

Das Planck'sche Strahlungsgesetz kann über den Zusammenhang zwischen Entropie und Wahrscheinlichkeit und der Quantenhypothese hergeleitet werden, worauf hier nicht näher eingegangen wird (ebd.). Es ist gegeben durch (vgl. DEMTRÖDER 2000: 78; BORRMANN 2019):

$$B(\lambda, T) = 8\pi hc^2 \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

mit h : Planck'sches Wirkungsquantum, c : Lichtgeschwindigkeit, λ : Wellenlänge, T : Temperatur

$B(\lambda, T)$ ist die spektrale spezifische Ausstrahlung. Darunter versteht man die Leistung, die ein schwarzer Körper senkrecht zu einer Oberfläche als elektromagnetische Wellen abstrahlt. Damit zeigt das Planck'sche Strahlungsgesetz, dass jeder Körper elektromagnetische Strahlung emittiert, wie zum Beispiel die Erde (BORRMANN 2019). In Abb. 5 ist eine graphische Darstellung des Planck'schen Strahlungsgesetzes für unterschiedliche Temperaturen dargestellt.

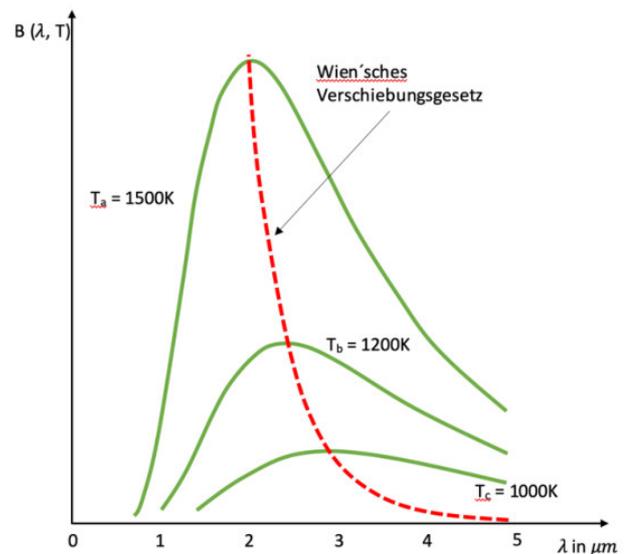


Abb. 5: Planck'sche Strahlungskurve (eigene Darstellung nach TIPLER 2019: 654)

Mit der Beziehung $c = \lambda \cdot \nu$ kann das Planck'sche Strahlungsgesetz in Abhängigkeit zur Frequenz ν umgeformt werden (DEMTRÖDER 2000: 77):

$$B(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Aus diesem Strahlungsgesetz können weitere Strahlungsgesetze hergeleitet werden, welche in den nächsten Kapiteln diskutiert werden.

2.2.3. Wien'sches Verschiebungsgesetz

Das Wien'sche Verschiebungsgesetz stellt einen Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur des Schwarzen Strahlers und der Wellenlänge, an der sich das Ausstrahlungsmaximum seiner spektralen Intensitätsverteilung befindet, her. Dieser bereits 1893 postulierte Zusammenhang kann mit dem Planck'schen Strahlungsgesetz in Einklang gebracht werden, indem das Maximum der Intensitätsverteilung bestimmt wird (vgl. MERTINS und GILBERT 2011: 240). Das bedeutet, dass das Planck'sche Strahlungsgesetz nach der Wellenlänge abgeleitet und Null gesetzt werden muss:

$$\frac{dB(\lambda, T)}{d\lambda} = 8\pi hc^2 \frac{d}{d\lambda} \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} = 0$$

Nach Verwendung der Produkt- und Kettenregel ergibt sich:

$$-\frac{5}{\lambda^6} + \frac{1}{\lambda^7} \frac{hc}{kT} \frac{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}}{\left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1\right)} = 0$$

$$-5 + \frac{1}{\lambda} \frac{hc}{kT} \frac{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}}{\left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1\right)} = 0$$

Substitution von $x = \frac{hc}{kT\lambda}$ ergibt:

$$-5 + x \frac{e^x}{(e^x - 1)} = -5 + x \frac{1}{1 - e^{-x}} = 0$$

Nach einer Umformung kann diese Differentialgleichung numerisch gelöst werden (TATUM: 4):

$$x = 5 (1 - e^{-x}) = 4,965$$

$$4,965 = \frac{hc}{kT\lambda}$$

Damit ist das Wien'sche Verschiebungsgesetz gegeben durch:

$$\lambda_{max} = 4,965 \frac{hc}{k\lambda T} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot K}{T} = \frac{b}{T}$$

mit T : absolute Temperatur des Schwarzen Körpers, b : Wien'sche Verschiebungskonstante ($2,898 \text{ mm} \cdot K$), λ_{max} : Wellenlänge des Ausstrahlungsmaximums

Das Wien'sche Verschiebungsgesetz sagt damit aus, dass je niedriger die Temperatur eines Strahlers ist, desto größer ist die Wellenlänge des Ausstrahlungsmaximums.

2.2.4. Stefan-Boltzmann-Gesetz

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz von 1884 stellt einen Zusammenhang zwischen der Strahlungsleistung eines Schwarzen Körpers und seiner Oberflächentemperatur her. Es kann auch aus dem Planck'schen Strahlungsgesetz hergeleitet werden, indem über den gesamten Wellenlängenbereich integriert wird (MERTINS und GILBERT 2011: 241).

Die Integration des Planck'schen Strahlungsgesetzes ergibt (vgl. DEMTRÖDER 2000: 79):

$$\int_{\nu=0}^{\infty} B(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \int_{\nu=0}^{\infty} \frac{\nu^3}{e^{\left(\frac{h\nu}{kT}\right)} - 1} d\nu$$

Man substituiert den Exponenten der e-Funktion mit

$$x = \frac{h\nu}{kT}$$

und das Differential mit

$$d\nu = \frac{kT}{h} dx$$

Daraus folgt:

$$\begin{aligned} B(T) &= \frac{8\pi h}{c^3} \left(\frac{kT}{h}\right)^4 \int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \\ &= \frac{4\pi^5 k^4}{15h^3 c^3} T^4 \end{aligned}$$

Die Strahlungsdichte der emittierten Strahlung eines infinitesimal kleinen Oberflächenelements dF ist gegeben durch:

$$S^*(T) = \frac{c}{4\pi B(T)} = \frac{\pi^4 k^4}{15h^3 c^2} T^4$$

Die gesamte Strahlungsdichte in einem Halbraum kann über die Integration des Raumwinkelbereichs $d\Omega = 2\pi$ bestimmt werden.

$$S(T) = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} T^4 = \sigma T^4$$

mit $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$: Stefan-Boltzmann-Konstante und T : Oberflächentemperatur

Zur Bestimmung der Strahlungsleistung $P(T)$ muss die Strahlungsdichte mit der Fläche A multipliziert werden. Daraus ergibt sich:

$$P(T) = \sigma A T^4$$

STEFAN hat das Gesetz 1879 postuliert und ging von einer Gültigkeit für einen beliebigen Strahler aus. BOLTZMANN erkannte später, dass das Gesetz nur einen Schwarzen Strahler gültig ist (LÜDERS und VON OPPEN 2012: 475). Bei Nicht-Schwarzen Strahlern muss zusätzliche der Emissionsgrad ϵ berücksichtigt werden (MERTINS und GILBERT 2011: 241):

$$P(T) = \epsilon \sigma A T^4$$

2.2.5. Spektralbereiche der elektromagnetischen Strahlung

Aus den Strahlungsgesetzen folgt, dass jeder Körper elektromagnetische Strahlung in Form eines kontinuierlichen Spektrums aussendet. Der Wellenlängenbereich dieses Spektrums ist nach den Planck'schen Strahlungsgesetzen abhängig von der Temperatur des Körpers. Die unterschiedlichen Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung können in verschiedene Spektralbereiche unterteilt werden. Folgende Spektralbereiche sind von besonderer klimatologischer Relevanz (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 47):

- infraroter Spektralbereich (IR): $0,78 \mu\text{m} - 1 \text{mm}$
- sichtbares Licht: $0,38 \mu\text{m} - 0,78 \mu\text{m}$
- ultravioletter Spektralbereich (UV): $10 \text{nm} - 0,38 \mu\text{m}$



Abb. 6: Spektralbereiche der elektromagnetischen Strahlung (eigene Darstellung)

2.3. Der Strahlungshaushalt der Erde

2.3.1. Solare Einstrahlung

Fast die gesamte Energie, die das Wetter und damit auch das Klima antreibt, stammt von der Sonne. Diese Energie gelangt in Form von elektromagnetischer Strahlung auf die Erde (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 32). Wie bereits beschrieben, handelt es sich bei der Sonne um einen annähernd Schwarzen Strahler, weshalb ihr spektrales Ausstrahlungsvermögen durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben werden kann.

Die Oberflächentemperatur der Sonne beträgt 5785 K (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 47). Mithilfe des Wien'schen Verschiebungsgesetzes lässt sich bestimmen, dass die Sonne ihr Ausstrahlungsmaximum im sichtbaren Wellenlängenbereich besitzt:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T_{Sonne}} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{5785 \text{ K}} = 0,5 \mu\text{m}$$

Die Strahlungsleistung der Sonne kann durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz bestimmt werden und beträgt (BORRMANN 2019):

$$P_{Sonne} = \sigma A_{Sonne} T_{Sonne}^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \cdot 6,09 \cdot 10^{18} \text{m}^2 \cdot (5777)^4 = 3,85 \cdot 10^{26} \text{W}$$

Mithilfe dieser Strahlungsleistung kann die Solarkonstante I_0 der Erde berechnet werden. Die Solarkonstante „ist die Energieflussdichte (Strahlungsleistung pro Fläche) der von der Sonne kommenden Strahlung, die oberhalb des Atmosphäreneinflusses bei mittlerem Sonnenabstand von einer senkrecht zur Strahlung ausgerichteten Fläche empfangen wird“ (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 33). Hätte die Erde keine Atmosphäre, welche die Strahlung absorbiert und streut, könnte diese Solarkonstante auch am Erdboden gemessen werden.

Die Solarkonstante kann bestimmt werden, indem man eine Kugel um die Sonne mit dem Radius „Abstand Erde-Sonne“ betrachtet, der von der gesamten Sonnenstrahlungsleistung durchströmt wird (siehe Abb. 7). Der Strahlungsanteil, der auf einen Quadratmeter dieser Kugel auftrifft, entspricht der Solarkonstanten (SCHWARZ 2009: 15).

$$I_0 = \frac{P_{\text{Sonne}}}{A_{\text{Kugel}}} = \frac{P_{\text{Sonne}}}{4\pi r_{S-E}} = \frac{3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4\pi \cdot 149 \cdot 10^6 \text{ km}} \approx 1360 \text{ W/m}^2$$

mit $r_{S-E} = 149 \cdot 10^6 \text{ km}$: Abstand Erde-Sonne

Sie ist sehr konstant und kann über große Zeiträume von Jahrtausenden Schwankungen in der Größenordnung von ungefähr 1 W/m^2 aufweisen. Diese Variationen sind schon ausreichend, um natürliche Klimaschwankungen auszulösen (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 33).

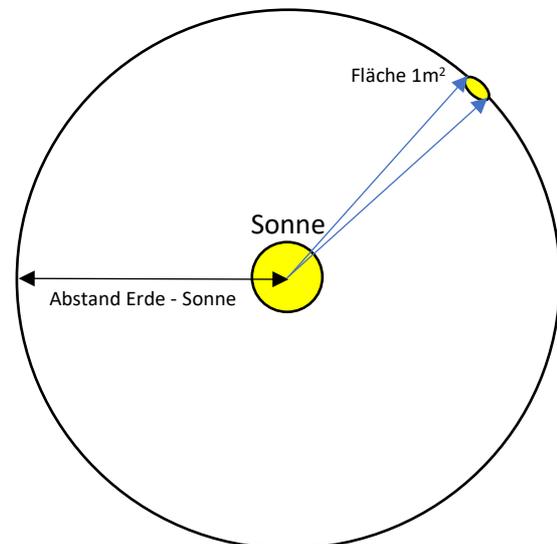


Abb. 7: Veranschaulichung zur Bestimmung der Solarkonstanten (eigene Darstellung)

Das bedeutet, dass die Erde auf ihrer Kreisfläche mit dem Erdradius eine Strahlungsleistung von $\pi r_{\text{Erde}}^2 I_0 = 1,73 \cdot 10^{11} \text{ W}$ auffängt. Das entspricht einer durchschnittlichen solaren Einstrahlung, bezogen auf die ganze Kugeloberfläche ($4\pi r_{\text{Erde}}^2$) der Erde, von:

$$E_{\text{in,oben}} = \frac{\pi r_{\text{Erde}}^2 I_0}{4\pi r_{\text{Erde}}^2} = \frac{I_0}{4} \approx 340 \text{ W/m}^2$$

2.3.2. Energieverteilung der solaren Strahlung am Grunde der Atmosphäre

Das Strahlungsspektrum der solaren Einstrahlung kann mithilfe des Planck'schen Strahlungsgesetzes dargestellt werden. Abbildung 8 zeigt die Planck-Kurven der solaren Strahlungsspektren im Weltraum und am Grunde der Atmosphäre im Vergleich zur Schwarzkörperstrahlung. Hierbei sind in bestimmten Energie- bzw. Wellenlängenbereichen tiefe Einbrüche zu erkennen.

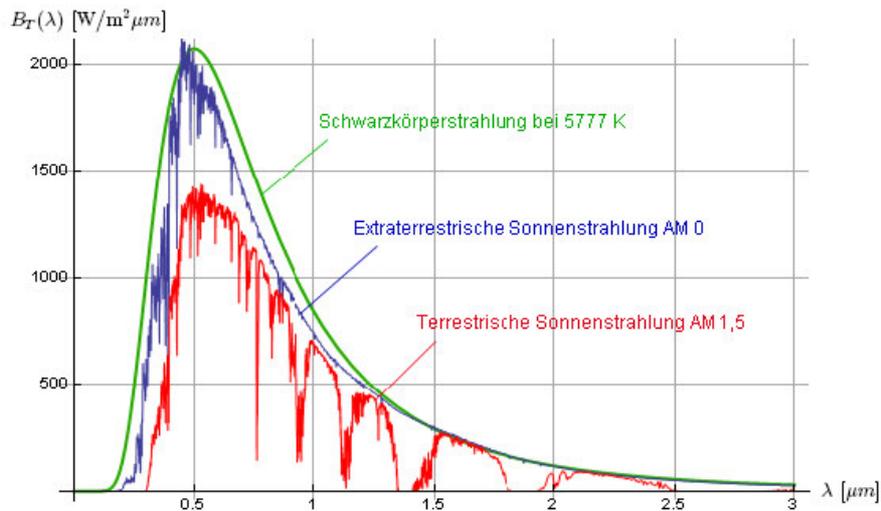


Abb. 8: Solare Strahlungsspektren (SIRTl 2010: 8, Messdaten von NREL's Electricity, Resources and Building Systems Integration Center)

Grund dafür ist, dass die Atmosphäre für die solare Strahlung semitransparent ist. Die Strahlung weist einen Energieverlust in Form einer Schwächung der Gesamtenergie und einer weitestgehend partiellen Auslöschung in einem bestimmten Spektralbereich auf. Diese Auslöschung betrifft vor allem den infraroten und ultravioletten Bereich. Die Ursache für diese Energieverluste liegt primär in der diffusen Reflexion und der selektiven Absorption durch die Gase in der Atmosphäre (vgl. WEISCHET und ENDLICHER 2012: 47ff.).

Unter der diffusen Reflexion versteht man eine allseitige Streuung der Strahlung in der Atmosphäre. Dabei bleibt die Wellenlänge der Strahlung erhalten; lediglich die Fortpflanzungsrichtung wird verändert. Auf diese Weise wird ein Teil der Strahlung in Richtung Weltraum reflektiert. Für die diffuse Reflexion sind neben Luftmolekülen auch Aerosole und Hydrometeore verantwortlich. Dabei wird vor allem Licht des sichtbaren Strahlungsbereichs reflektiert (ebd.).

Dagegen wird bei der selektiven Absorption Strahlung vom absorbierenden Molekül aufgenommen und in Wärmeenergie umgewandelt. „Selektiv“ bedeutet, dass nur Strahlung eines bestimmten Wellenlängenbereichs absorbiert wird und die anderen Wellenlängen reflektiert oder transmittiert werden. Im ultravioletten Bereich wird die Strahlung vor allem von Ozon absorbiert und im infraroten Bereich durch Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf (ebd.).

2.3.3. Albedo

Nachdem die solare Strahlung die Atmosphäre durchquert hat, trifft sie auf die Erdoberfläche, wo erneut ein Teil der Strahlung reflektiert wird. Als Maß dieser Reflexion dient die Albedo. Der Begriff „Albedo“ kommt von dem lateinischen Wort „albus“ und bedeutet übersetzt „weiß“. Im Allgemeinen „beschreibt die Albedo den prozentualen Anteil an diffus reflektierter Strahlung beim Auftreffen auf eine

nicht selbst leuchtende und nicht spiegelnde Fläche“ und wird deshalb auch als Reflexionsvermögen bezeichnet (MARTIN 2001a). In der Meteorologie wird die Albedo der Erdoberfläche betrachtet. Die Albedo der Erdoberfläche α wird definiert als „Verhältnis von an der Erdoberfläche reflektierter Solarstrahlung R zu einfallender Globalstrahlung G “ (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 63). Dabei bleibt bei der Reflexion die Wellenlänge der einfallenden Strahlung erhalten.

$$\alpha = \frac{R}{G} = \frac{R}{(I_S + I_H)}$$

mit $G = (I_S + I_H)$ (Globalstrahlung), I_S (direkte kurzwellige Sonneneinstrahlung), I_H (diffuse kurzwellige Himmelstrahlung) und R (reflektierter Teil der Solarstrahlung)

Die Albedo kann Werte von 0 bis 1 annehmen (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 64f.). Ein Albedowert von 0 bedeutet, dass die Globalstrahlung an der Erdoberfläche vollständig absorbiert wird und es zu keiner Reflexion kommt. Ein solchen Körper bezeichnet man als „absolut schwarzen Körper“. Dagegen bedeutet ein Albedowert von 1, dass die Globalstrahlung vollständig reflektiert wird. Man definiert einen solchen Körper als „absolut weißen Körper“ (MARTIN 2001a).

Die Albedo ist von verschiedenen Faktoren abhängig: Wellenlänge und Einfallswinkel der Strahlung sowie Beschaffenheit und Oberflächenfarbe der bestrahlten Fläche (vgl. MARTIN 2001a). Mit abnehmender Wellenlänge und zunehmenden Einfallswinkel nimmt die Albedo zu. Die Abhängigkeit der Albedo vom Einfallswinkel ist besonders stark bei glatten Oberflächen, wie zum Beispiel Wasser, da diese einen hohen Anteil an spiegelnder Reflexion besitzen (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 64). Bei hochstehender Sonne beträgt die Albedo von Wasser nur 5 – 10 % und bei tiefstehender Sonne 50–80 % (vgl. SCHÖNWIESE 2003: 123). Für die Oberflächenfarbe kann man sagen, dass mit zunehmender Helligkeit der Farbe auch die Albedo ansteigt. Das wird auch in Tab. 2 deutlich, in der die durchschnittliche Albedo für verschiedene terrestrische Oberflächen bei solarer Einstrahlung in einem Wellenlängenbereich von 0,3 bis 4 μm aufgelistet ist (vgl. SCHÖNWIESE 2003: 123).

Tab. 2: Durchschnittliche Albedo für verschiedene terrestrische Oberflächen: bei solarer Einstrahlung (0,3 – 4 μm Wellenlänge) (SCHÖNWIESE 2003: 123)

Oberfläche	Albedo in %
Planetarische Albedo	30
Erdoberfläche (terrestrische Albedo)	15
Bewölkung	23
Neuschnee	75 – 95
Altschnee	40 – 70
Gletscher	20 – 45
Meereis	30 – 40
Sandboden	20 – 40
Gestein (Felsen)	10 – 40
Steppe	20 – 30
Grasland, landwirtschaftl. Kulturen	15 – 30
Siedlungen	15 – 20
Laub- und Mischwald	10 – 20
Ackerboden	5 – 20
Tropischer Regenwald	10 – 20
Nadelwald	5 – 12
Wasser bei hochstehender Sonne	5 – 10
Wasser bei tiefstehender Sonne	50 – 80
Dunkler Boden (z.B. Braunerde)	5 – 10

Bei Modellrechnungen wird mit der durchschnittlichen Albedo der Erde gerechnet. Hierbei unterscheidet man in planetarische und terrestrische Albedo: Die planetarische Albedo ist die durchschnittliche Albedo der Erde und schließt die Bewölkung und Atmosphäre mit ein. Sie wurde durch Satellitenmessungen bestimmt und auf einen Durchschnittswert von 30% im Jahresmittel geschätzt. Dabei ist zu beachten, dass dieser Wert zeitlichen Schwankungen unterliegt (MARTIN 2001a). Die terrestrische Albedo dagegen bezeichnet die durchschnittliche Albedo der Erdoberfläche ohne die atmosphärische Albedo. Sie wurde auf einen Wert von circa 15% bestimmt (MARTIN 2001a).

Die Albedo hat damit einen direkten Einfluss auf den Strahlungshaushalt und den Klimawandel der Erde. Beim Climate Engineering wird versucht dem anthropogenen Klimawandel durch Erhöhung der terrestrischen Albedo entgegenzuwirken. Die Ideen reichen vom Eintrag stratosphärischer Aerosolpartikel bis hin zu riesigen, weißen Planen in Wüstengebieten, um die planetarische Albedo zu erhöhen und die Klimaerwärmung zu vermindern (vgl. LAWRENCE et al. 2018: 3). Da es viele Unsicherheiten in der Technologie und der Effektivität gibt sowie ethische Bedenken und auch die Auswirkungen auf die Biosphäre nicht richtig abgeschätzt werden können, sind solche Maßnahmen sehr umstritten (LAWRENCE 04.08.2019). Im kleineren Maßstab findet eine solche Form des Climate Engineering bereits Anwendung. In Städten werden bewusst Dächer mit hellen Farben oder sogenannte Cool Roofs, die eine Albedo von über 80% besitzen, verwendet (siehe Abb. 9). Das hat zwar keine globalen Auswirkungen, da die Siedlungsflächen weniger als 1% der Erdoberfläche betragen, aber dafür eine positive Auswirkung auf das Stadtklima. Im Sommer heizen sich Städte wegen ihrer vielen versiegelten Asphaltflächen stark auf, was sich negativ auf Lebensqualität der Bewohner*innen auswirkt. Die Gestaltung von hellen Flächen kann einer solchen Aufheizung entgegenwirken und laut Berechnungen die Umgebungstemperatur um 1,5°C senken, wenn alle Gebäude über solche Dächer verfügen (MÖNTER und SCHLITT 2014: 18).

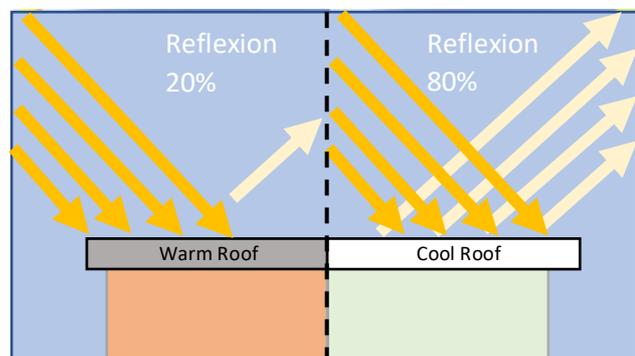


Abb. 9: Cool Roofs (eigene Darstellung nach Santa Monica Mirror 2017)

2.3.4. Temperatur der Erde ohne Treibhauseffekt

Der Anteil der solaren Strahlung, welcher von Atmosphäre und Erdoberfläche absorbiert wird, sorgt für eine Erwärmung der Erde im Vergleich zum Weltraum. Diese Erwärmung der Erdoberfläche lässt sich bestimmen auf Grundlage folgender Annahme:

„Die Einstrahlung von der Sonne auf die Erde und die thermische Ausstrahlung von der Erde in den Weltraum müssen in gleichen Zeiteinheiten auch gleich groß sein“ (SCHWARZ 2009: 15). Diese Annahme entspricht dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz.

Der Anteil der solaren Strahlung, welcher von Atmosphäre und Erdoberfläche absorbiert wird, entspricht der durchschnittlichen Sonneneinstrahlung in der oberen Atmosphäre $E_{in,oben} = \frac{I_0}{4}$ abzüglich des Anteils α , die wieder in den Weltraum reflektiert wurden:

$$E_{in,unten} = \frac{I_0}{4} (1 - \alpha)$$

Bei α handelt es sich um die planetarische Albedo mit einem Wert von 0,3. Die thermische Ausstrahlung der Erde kann mithilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes beschrieben werden:

$$E_{out} = \epsilon \sigma T_{Erde}^4 \approx \sigma T_{Erde}^4$$

Da es sich bei der Erde um keinen idealen Schwarzen Strahler handelt, muss theoretisch der Emissionsgrad ϵ berücksichtigt werden. Da dieser bei der Erde bei ca. 95% liegt, kann er bei der Berechnung vernachlässigt werden (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 76). Daraus folgt:

$$\begin{aligned} E_{in} &= E_{out} \\ I_0(1 - \alpha) &= 4\sigma T_{Erde}^4 \end{aligned}$$

Stellt man diese Formel um, ergibt sich folgende Temperatur für die Erdoberfläche (vgl. BORRMANN 2019):

$$T_{Erde} = \sqrt[4]{\frac{I_0(1 - \alpha)}{4\sigma}} = 245,82 \text{ K} = -18,33^\circ\text{C}$$

Die Oberflächentemperatur der Erde ohne Berücksichtigung des Treibhauseffekts ist also nur abhängig von der Solarkonstanten sowie der planetarischen Albedo. Die Größe der Oberfläche spielt dabei keine Rolle.

2.3.5. Natürlicher Treibhauseffekt

Würde die Temperatur der Erdoberfläche, wie eben berechnet, -18°C betragen, wäre auf der Erde kein Leben möglich gewesen. Mithilfe von Wetterstationen, die über die ganze Erde verteilt sind, kann man die mittlere globale Temperatur der Erde bestimmen. Diese liegt 33°C höher, nämlich bei $+15^\circ\text{C}$. Für diesen Temperaturanstieg ist der natürliche Treibhauseffekt verantwortlich (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 79).

Hierbei muss beachtet werden, dass der Begriff „Treibhauseffekt“ irreführend ist, da ein Treibhaus den Wärmeaustausch unterbindet und damit physikalisch gesehen eine andere Funktionsweise hat. Der Begriff ist daher eher als Analogon zu verstehen, da in einem Treibhaus auch die Luft erwärmt wird (SCHÖNWIESE 2003: 118).

Wie bereits beschrieben, strahlt die Erde elektromagnetische Strahlung aus. Mithilfe des Wien'schen Verschiebungsgesetzes kann bestimmt werden, dass das Emissionsmaximum im infraroten Bereich liegt:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T_{Erde}} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{245,82 \text{ K}} = 11,8 \mu\text{m}$$

Die infrarote Erdstrahlung trifft beim Durchlaufen der Atmosphäre auf unterschiedliche Gasmoleküle. Während die Hauptbestandteile der Atmosphäre Stickstoff und Sauerstoff keine Absorptionseigenschaften im infraroten Bereich aufweisen, ist dies bei einigen Spurengasen der Fall. Sie besitzen wellenlängenabhängige Absorptionseigenschaften im infraroten Bereich (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 76f.). Zu diesen treibhausrelevanten Spurengasen gehören Wasserdampf (H_2O), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O) sowie Ozon (O_3). Dabei sind Wasserdampf mit etwa 66% und Kohlenstoffdioxid mit etwa 30% für den natürlichen Treibhauseffekt verantwortlich (LATIF 2009a: 57).

Abbildung 10 zeigt die globale und über das Jahr gemittelte Energiebilanz der Erde. Während der linke Teil der Abbildung in den vorherigen Kapiteln näher erläutert wurde, wird im Folgenden Bezug zu dem rechten Teil der Abbildung genommen (LATIF 2009a: 56).

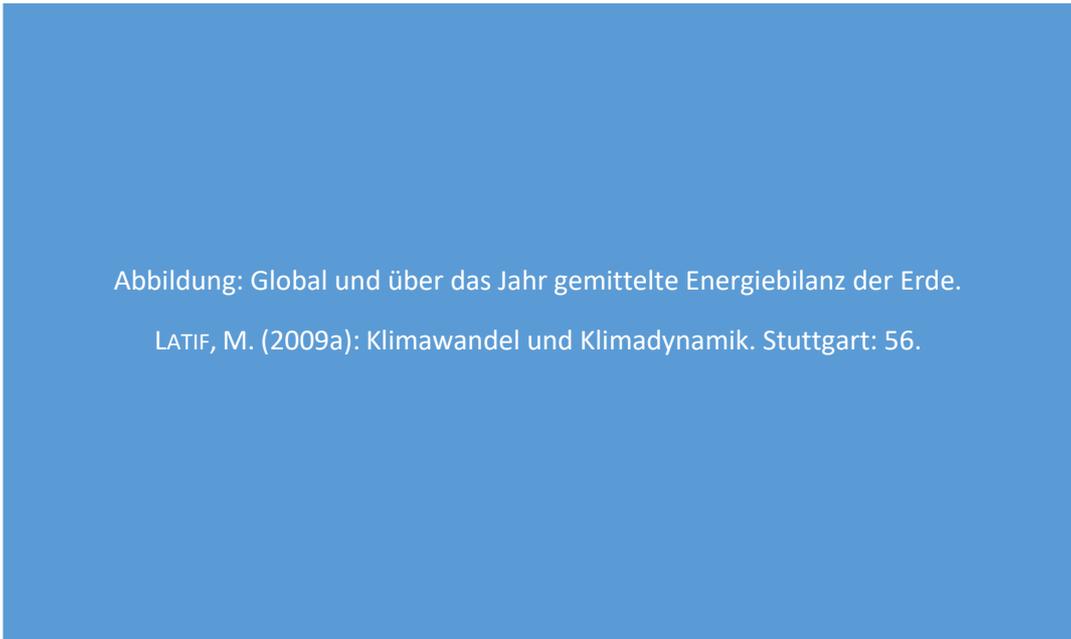


Abbildung: Global und über das Jahr gemittelte Energiebilanz der Erde.

LATIF, M. (2009a): Klimawandel und Klimadynamik. Stuttgart: 56.

Abb. 10: Global und über das Jahr gemittelte Energiebilanz der Erde (LATIF 2009a: 56)

Der Anteil der terrestrischen Infrarotstrahlung, welcher von keinem Treibhausgas absorbiert wird, gelangt zurück in den Weltraum und ist somit für den Strahlungshaushalt der Erde fortan unbedeutend. Dieser beträgt ca. 40 W/m^2 . Dagegen sorgt der absorbierte Anteil für eine Energieaufnahme innerhalb der Atmosphäre. Dort kommt es wieder zu einer Emission im infraroten Bereich, da Luftmoleküle auf lange Zeit betrachtet keine Energie speichern können und sonst der erste Hauptsatz der Thermodynamik verletzt würde. Diese infrarote Strahlung wird nicht in eine bestimmte Richtung, sondern allseitig ausgesandt. Das bedeutet, dass die Strahlung, die sich in den oberen Halbraum bewegt (ca. 195 W/m^2), in den Weltraum ausgestrahlt wird, wohingegen die Strahlung, die in den unteren Halbraum geht (ca. 324 W/m^2), wieder zur Erdoberfläche gelangt. Diese Strahlung wird als atmosphärische Gegenstrahlung bezeichnet (vgl. WEISCHET und ENDLICHER 2012: 76f.; LATIF 2009a: 56f.).

Auf diese Weise kommt an der Erdoberfläche mehr Strahlung an, was dazu führt, dass die Erdoberfläche zum Ausgleich mehr Energie abgeben muss (ca. 492 W/m^2), um ein Gleichgewicht herzustellen. Damit steigt die Temperatur der Erdoberfläche auf 15°C an (MÜLLER und VAN BIEN 2009: 62; LATIF 2009a: 56f.). Ein Teil der Wärme wird zudem noch durch Konvektion (ca. 24 W/m^2) und Evapotranspiration (ca. 78 W/m^2) in die Atmosphäre abgeleitet (LATIF 2009a: 56f.). Die im vorherigen Kapitel berechneten -18°C entsprechen der Strahlungstemperatur, die an der oberen Atmosphäre von der Erde in den Weltraum abgegeben wird. Das bedeutet, dass die äußere Atmosphäre wie ein Temperaturstrahler von -18°C wirkt (MÜLLER und VAN BIEN 2009: 62).

2.3.6. Eigenschaften von Treibhausgasen

Damit es sich bei einem Gas um ein klimarelevantes Treibhausgas handelt, muss es zwei Eigenschaften aufweisen: Die erste Eigenschaft ist, dass das Gas lange genug in der Atmosphäre verweilen muss, damit es sich global unabhängig vom Emissionsort ausbreiten kann. Ein Gas kann sich erst dann global ausbreiten, wenn die Verweilzeiten mehr als zwei Jahre betragen. Die Verweilzeit von Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre beträgt 0 bis 5 Jahre. Eine Ausnahme bildet der Wasserdampf mit einer sehr kurzen Verweilzeit von nur 10 Tagen. Dieser ist trotzdem global wirksam, da die Wasseroberfläche der Erde ca. 70% beträgt und man damit nicht von einem punktuellen Emissionsort ausgehen kann (vgl. SCHÖNWIESE 1996: 14f.; WEISCHET und ENDLICHER 2012: 82).

Die zweite Eigenschaft, welche die Gase aufweisen müssen, ist, dass sie terrestrische Infrarotstrahlung absorbieren. Moleküle können auf verschiedene Weise Energie aufnehmen. Zum einen durch elektrische Anregung und zum anderen durch eine Änderung des Schwingungs- oder Rotationszustandes des Moleküls. Die Energie der terrestrischen Infrarotstrahlung liegt im Bereich von Schwingungsübergängen von Molekülen. Dagegen kann es bei elektromagnetischer Strahlung im sichtbaren Bereich zu

elektronischen Anregungen und im Mikrowellenbereich zu Rotationen von Molekülen kommen. Das heißt, dass Infrarotstrahlung nur von Molekülen absorbiert werden kann, wenn die Energie der Strahlung der Energiedifferenz zwischen den quantenmechanischen Zuständen des Moleküls entspricht (vgl. SIRTIL 2010: 9).

Um das Schwingungsverhalten der Moleküle genauer zu charakterisieren, müssen die verschiedenen Freiheitsgrade betrachtet werden. Jedes Atom eines n -atomigen Moleküls weist drei Freiheitsgrade der Bewegung auf. Das macht insgesamt $3n$ Freiheitsgrade. Ein nichtlineares Molekül besitzt $3n-6$ Schwingungsfreiheitsgrade, da drei Freiheitsgrade für die Translation des Schwerpunktes und drei Freiheitsgrade für die Rotation um die drei Hauptträgerachsen durch den Schwerpunkt benötigt werden. Bei linearen Molekülen sind es sogar $3n-5$ Schwingungsfreiheitsgrade, da eine Rotation des Moleküls um die Molekülachse keiner wirklichen Rotation des Kerngerüsts entspricht (DEMTRÖDER 2000: 320f.).

Bei einer Auslenkung der Atomkerne des Moleküls aus ihrer Gleichgewichtslage werden diese zu harmonischen Schwingungen angeregt. Solche Schwingungen lassen sich immer als Linearkombination von $3n-6$ bzw. $3n-5$ Normalschwingungen darstellen. Normalschwingungen zeichnen sich dadurch aus, dass alle Atomkerne gleichzeitig durch die Ruhelage gelangen und der Gesamtimpuls sowie der Gesamtdrehimpuls des Kerngerüsts gleich null sind (ebd.).

Damit ein Treibhausgas-Molekül terrestrische Infrarotstrahlung absorbieren kann, muss sich das elektrische Dipolmoment beim Molekül durch die Schwingung ändern. Symmetrische Schwingungen, bei denen der Ladungsschwerpunkt erhalten bleibt, besitzen kein elektrisches Dipolmoment und können deshalb keine Infrarotstrahlung absorbieren. Zweiatomige homonukleare Moleküle wie Stickstoff und Sauerstoff können beispielsweise nur symmetrische Schwingungen ausführen und spielen deshalb für den Treibhauseffekt keine Rolle (vgl. SIRTIL 2010: 10f.).

Abbildung 11 zeigt die Normalschwingungen des linearen Treibhausgases Kohlenstoffdioxid und des nichtlinearen Treibhausgases Wasserdampf. Man unterscheidet zwei verschiedene Arten von Schwingungen. Zum einen die Streckschwingung (auch Valenzschwingung), bei der das Molekül entlang der Kernverbindungsachsen schwingt und die Biegeschwingung (auch Deformationsschwingung), bei welcher der Bindungswinkel deformiert wird (ebd.).

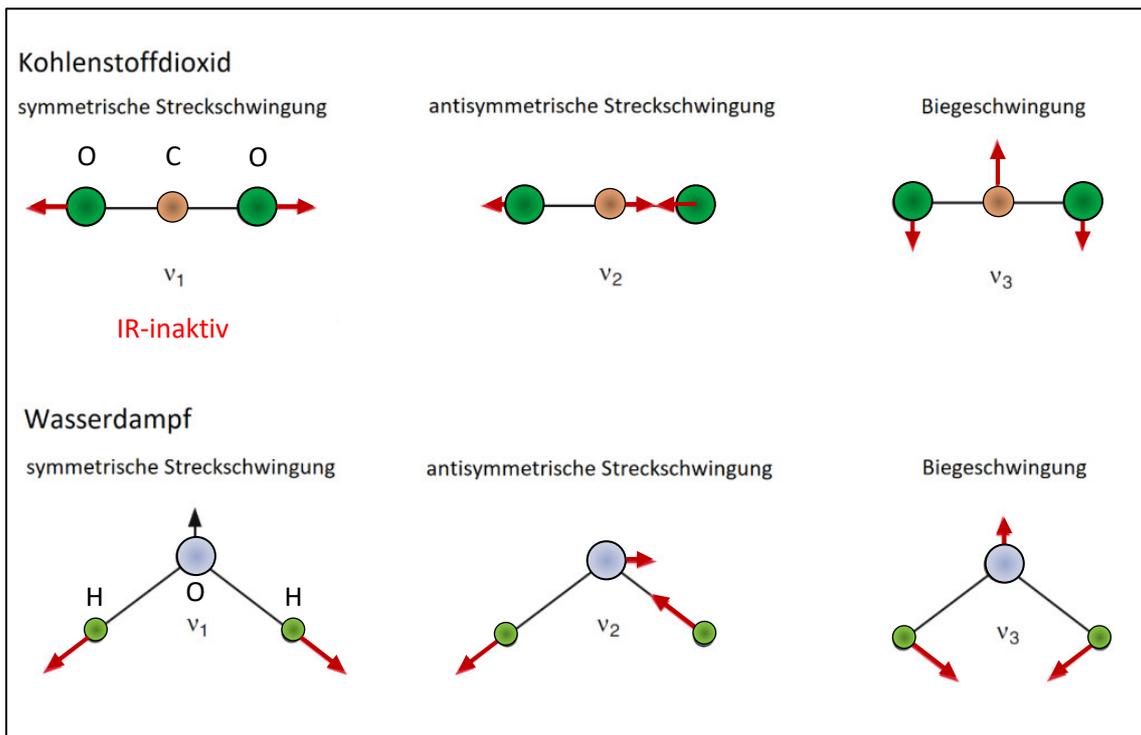


Abb. 11: Normalschwingungen von Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf (eigene Darstellung nach DEMTRÖDER 2016: 321)

Aufgrund seines symmetrischen Aufbaus besitzt Kohlenstoffdioxid kein permanentes elektrisches Dipolmoment. Führt dieses eine symmetrische Streckschwingung aus, kommt es im Gegensatz zur antisymmetrischen und Biegeschwingung zu keiner Verschiebung des Ladungsschwerpunktes. Das bedeutet, dass diese Schwingung keine Infrarotteilchen absorbieren kann (ebd.).

Wasserdampf hat dagegen wegen seiner gewinkelten Struktur von $194,5^\circ$ ein permanentes Dipolmoment. In diesem Fall kommt es bei einer symmetrischen Streckschwingung zur Verschiebung des Ladungsschwerpunktes. In diesem Fall sind alle Normalschwingungen IR-aktiv (ebd.).

2.3.7. Kohlenstoffdioxid

Kohlenstoffdioxid kann auf unterschiedliche Weise entstehen, durch den Abbau von abgestorbener Biomasse, durch Sauerstoffatmung von Organismen sowie bei der Verbrennung von Holz und fossilen Energieträgern (HAGEMANN 2005: 10).

Wie bereits beschrieben handelt es sich bei CO_2 , wegen seines molekularen Aufbaus, um ein Treibhausgas. Dieses weist Absorptionslinien und -banden (siehe Abb. 12) zwischen $2,3$ und $3,0 \mu\text{m}$, zwischen $4,2$ und $4,4 \mu\text{m}$ und zwischen 12 und $16 \mu\text{m}$ auf (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 52). In den Bereichen etwas unter $4,5 \mu\text{m}$ und zwischen 14 und $16 \mu\text{m}$ ist die bereits vorhandene Menge in der Atmosphäre bereits zu 100% als Absorber wirksam. Ein erhöhter Kohlenstoffdioxidgehalt würde bei diesen Wellenlängen zu keiner verstärkten Absorption führen. Dagegen handelt es sich bei den Bereichen

13 und 14 μm und 10,5 μm um ungesättigte Absorptionsbanden, bei denen es bei einer CO_2 -Erhöhung in der Atmosphäre zu einer verstärkten Absorption kommen kann (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 80f.).

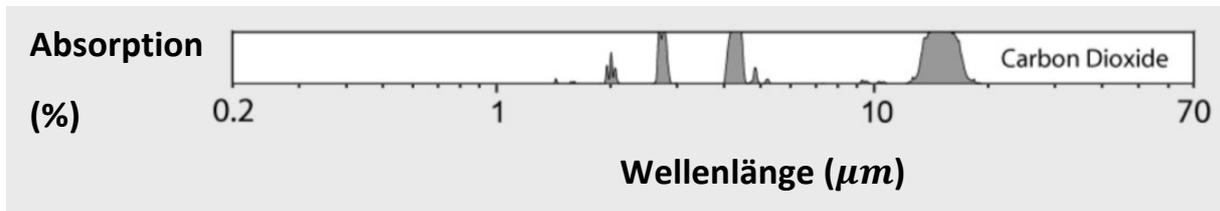


Abb. 12: Gesamtabsorption von Kohlenstoffdioxid (Wikimedia Commons 2016)

Abbildung 13 zeigt den Anstieg des Kohlenstoffdioxidgehaltes in der Atmosphäre zwischen den Jahren 1750 und 2010. Während die Kohlenstoffdioxidkonzentration vor der Industrialisierung um 1800 noch 280 ppm betrug, hat sich der Wert bis zum Jahre 2011 auf 391 ppm erhöht. Das entspricht einem Anstieg um 40%. Die jährlichen CO_2 -Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Zementproduktion betragen 2011 $9,5 \pm 0,8$ GtC pro Jahr. Damit liegen sie 54% über dem Niveau von 1990. Insgesamt wurden durch den Menschen im Zeitraum 1750 bis 2011 ca. 555 ± 110 GtC freigesetzt (IPCC 2013: 15f.).

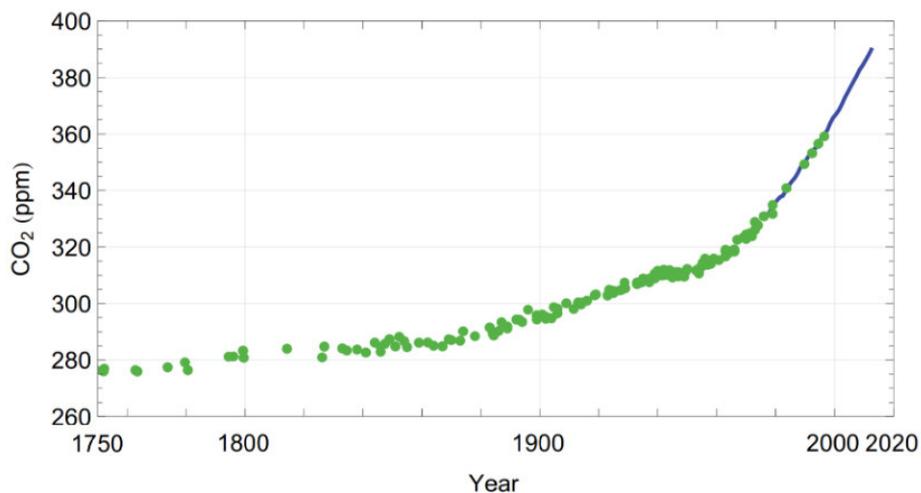


Abb. 13: Atmospheric CO_2 concentrations history over the industrial era, determined from air enclosed in ice cores and firn air (colour symbols) and from direct atmospheric measurements (blue lines, measurements from the Cape Grim observatory (CIAIS und SABINE 2013: 493)

2.3.8. Wasserdampf

Ein weiteres Treibhausgas ist der Wasserdampf. Er entsteht bei der Verdunstung, wenn das flüssige Wasser der Hydrosphäre seinen Aggregatzustand zu gasförmig wechselt und in die Atmosphäre gelangt. Abbildung 14 stellt die Absorptionsbanden in Abhängigkeit der Wellenlänge dar. Wasserdampf absorbiert die Infrarotstrahlung oberhalb 14 μm nahezu vollständig. Des Weiteren weist er zwischen

5 und 8 μm , zwischen 2,5 und 3 μm und zwischen 1 und 2 μm Absorptionsbanden auf (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 52).

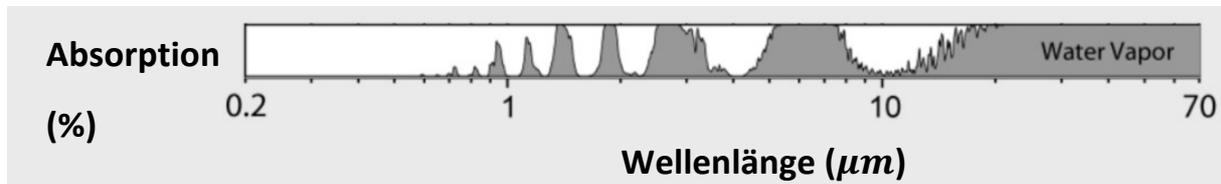


Abb. 14: Gesamtabsorption von Wasserdampf (Wikimedia Commons 2016: 49)

Wie bereits beschrieben, ist der Beitrag von Wasserdampf zum natürlichen Treibhauseffekt wesentlich höher als der von CO_2 . Der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre ist seit der Industrialisierung um 1800 nicht angestiegen, weshalb sein bisheriger Einfluss auf den anthropogenen Treibhauseffekt vernachlässigbar ist (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 82). Dennoch spielt Wasserdampf als indirekter Verstärkungsfaktor eine sehr wichtige Rolle beim anthropogenen Treibhauseffekt. Darauf wird im Abschnitt 2.3.11. „Positive Rückkopplungseffekte und Kipppunkte“ genauer eingegangen.

Die Verweilzeit von Wasserdampf in der Atmosphäre ist mit 10 Tagen ziemlich kurz und seine Menge in der Atmosphäre hängt stark von der Temperatur des jeweiligen Ortes ab (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 82). Das hat zur Folge, dass der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre örtlich und zeitlich stark schwanken kann. Das kann beispielsweise dazu führen, dass über Trockengebieten gar keine Absorption von Infrarotstrahlung durch Wasserdampf zustande kommt (Geographie aktuell und Schule 2014: 77).

2.3.9. Anthropogener Treibhauseffekt

Betrachtet man das Klima der letzten Jahrtausende, kann man feststellen, dass dieses annähernd stabil war. Doch seit der Industrialisierung kommt es global zu einer raschen Erwärmung, wofür der Mensch verantwortlich ist. Die Ursachen liegen an einem starken Anstieg der Weltbevölkerung sowie einem exponentiell steigenden Energiebedarf pro Mensch (SCHÖNWIESE 2009: 4). 80% der Weltprimärenergie-nutzung geht auf die Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas zurück. Auf diese Weise gelangen jährlich etliche Milliarden Tonnen CO_2 in die Atmosphäre (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 84). Dabei entfallen 95% der Emissionen auf die Industrie- und Schwellenländer der Nordhemisphäre (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 81f.). Neben Kohlenstoffdioxid, welches circa 60% des anthropogenen Treibhauseffekts ausmacht, kommt noch ein Anstieg weiterer Treibhausgase wie Methan, Distickstoffoxid, FCKW und Ozon hinzu (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 82).

Diese anthropogen erzeugten Treibhausgase führen dazu, dass sich die natürliche Spurengaskonzentration in der Atmosphäre ändert. Zusätzlich freigesetzte Spurengase haben eine Erhöhung der Gegenstrahlung und damit eine Temperaturerhöhung zur Folge, was als anthropogener Treibhauseffekt bezeichnet wird (HAGEMANN 2005: 10). Im Vergleich zu 1900 hat der anthropogene Treibhauseffekt im Jahre 2012 bereits zu einer zusätzlichen Erwärmung der Atmosphäre von ca. $(1 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ geführt (IPCC 2013: 4). Bei dieser globalen Erwärmung handelt es sich nicht nur um eine Erhöhung der Mitteltemperaturen, sondern auch um eine höhere Variabilität, worunter man extremere Ausschläge versteht (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 309).

Vermutungen, dass die gemessene globale Temperaturerhöhung durch natürliche Einflüsse zustande kam, kann mithilfe von Klimamodellen ausgeschlossen werden. Zudem gibt es zwei wichtige Indizien, die für einen anthropogen verursachten Klimawandel sprechen. Erstens hat sich die Intensität der am oberen Ende der Atmosphäre einfallenden Sonnenstrahlung, kaum verändert im Vergleich zum globalen Temperaturanstieg. Zweitens konnte durch Messungen gezeigt werden, dass es neben einer Erwärmung der Troposphäre auch zu einer Abkühlung der Stratosphäre kommt, da dort die Emissionen durch Kohlenstoffdioxid im Vergleich zur Absorption überwiegt. Bei einer natürlichen Erwärmung aufgrund verstärkter Sonneneinstrahlung wäre keine Abkühlung in der Stratosphäre zu erwarten (LATIF 2009b: 7).

2.3.10. Zukünftige Entwicklung

Um die Folgen des anthropogenen Klimawandels für die Zukunft abzuschätzen, werden in der Wissenschaft Modellrechnungen vorgenommen. Dabei wird versucht die zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen und die damit verbundene die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre abzuschätzen. Dabei werden beispielsweise unterschiedliche Wachstumsraten der Weltwirtschaft und die Einführung effizienterer und nachhaltigerer Technologien berücksichtigt. Daraus können Werte bestimmt werden, die dann in die Modellrechnung eingesetzt werden (WEISCHET und ENDLICHER 2012: 311f.).

Im 5. Sachstandsbericht der IPCC wurden vier Szenarien entwickelt, die als Repräsentative Konzentrationpfade (RCP) bezeichnet werden. Die unterschiedlichen Szenarien werden nach ihrem ungefähren totalen Strahlungsantrieb im Jahr 2100 bezeichnet als: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 und RCP 8.5 (IPCC 2013: 34). Hierbei wird der Strahlungsantrieb als „*Maß für den Einfluss, den ein Faktor auf die Änderung des Gleichgewichts von einfallender und abgehender Energie im System Erde–Atmosphäre hat*“, verstanden (SCHWARZ 2009: 13).

Die RCP-Szenarien repräsentieren die mögliche Bandbreite der Klimapolitik des 21. Jahrhunderts. Während es sich bei RCP 2.6 um ein Minderungsszenario handelt, liegt bei RCP 4.5 und RCP 6.0 jeweils ein Stabilisierungsszenario und bei RCP 8.5 ein Szenario mit sehr hohen Treibhausgasemissionen vor (IPCC 2013: 34).

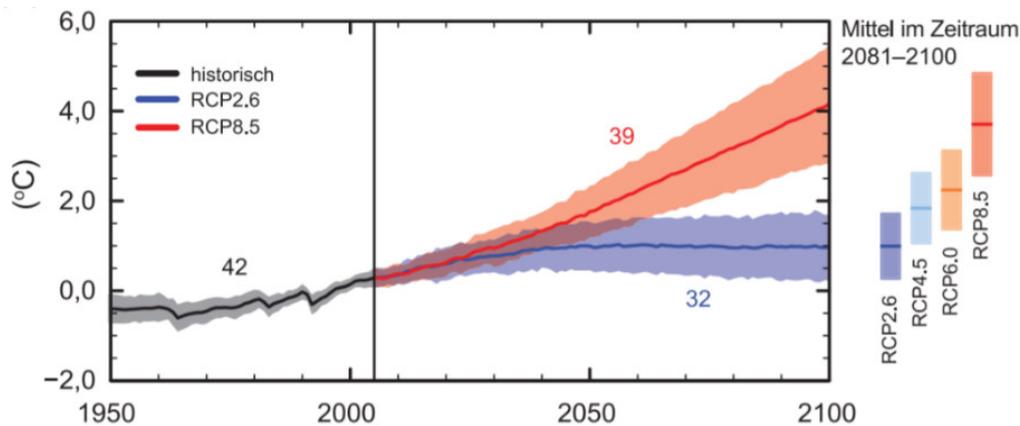


Abb. 15: CMIP5 Multimodell-simulierte Zeitreihen von 1950 bis 2100 für die Änderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur bezogen auf 1986-2005 (IPCC 2013: 25)

Abbildung 15 zeigt die Änderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur. Der IPCC geht in ihren Szenarien davon aus, dass bezogen auf 1850-1900 die globale Erdoberflächentemperatur im Jahre 2100 bei den Szenarien RCP 4.5, 6.0 und 8.5 die 1,5°C-Grenze des Pariser Klimaabkommens überschritten sein wird. Dabei werden bei den einzelnen Szenarien folgende Temperaturanstiege erwartet: RCP 2.6: $(1 \pm 0,7)^{\circ}\text{C}$, RCP 4.5 $(1,9 \pm 0,8)^{\circ}\text{C}$, RCP 6.0: $(2,0 \pm 0,7)^{\circ}\text{C}$ und RCP 8.5 $(3,7 \pm 1,1)^{\circ}\text{C}$ (IPCC 2013: 24). Vor allem Szenario RCP 8.5 kann weitreichende Folgen für die Menschheit haben, da auch die 2°C-Grenze überschritten wird. Sollte dies geschehen, können Kippelemente und positive Rückkopplungsprozesse ausgelöst werden, die den Klimawandel zusätzlich verstärken.

2.3.11. Positive Rückkopplungsprozesse und Kipppunkte

Unter einem klimarelevanten, positiven Rückkopplungsprozess versteht man einen sich selbst verstärkenden Prozess, der eine globale Klimaerwärmung zusätzlich antreibt. Typische Beispiele sind die Eis-Albedo-Rückkopplung und die Wasserdampf-Rückkopplung (MARTIN 2001b).

Bereits eine leichte Veränderung der planetarischen bzw. terrestrischen Albedo kann schwerwiegende Folgen haben. Kommt es durch die Klimaerwärmung zu einem Schmelzen der Gletscher in Arktis und Antarktis, kann dies den Rückkopplungsprozess auslösen, der als Eis-Albedo-Rückkopplung bezeichnet wird. Die Schrumpfung der Gletschermaße führt zu einer geringeren Reflexion und somit einer verstärkten Absorption der Globalstrahlung an der Erdoberfläche. Die Folge daraus ist, dass die Erdoberfläche stärker erwärmt wird und damit das Schmelzen der Eismassen verstärkt wird (MARTIN 2001b).

Ein weiteres Beispiel ist die Wasserdampf-Rückkopplung. Wenn sich die Atmosphäre durch den anthropogenen Treibhauseffekt weiter erwärmt, steigt auch die Verdunstung und damit der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre an. Da es sich bei Wasserdampf um ein Treibhausgas handelt, wird der Treibhauseffekt verstärkt. Diese zusätzliche Erwärmung lässt dann wiederum den Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre steigen (Abb. 16). Damit wirkt der Wasserdampf als indirekter Verstärkungsfaktor für den anthropogenen Treibhauseffekt (Geographie aktuell und Schule 2014: 48).

Neben solchen positiven Rückkopplungseffekten gibt es auch noch sogenannte Kippunkte. Das Klimasystem der Erde ist nicht linear, weshalb es zu unumkehrbaren Änderungen kommen kann, wenn bestimmte Schwellenwerte, auch Kippunkte genannt, überschritten werden. Dabei handelt es sich um Großrisiken, deren Eintrittswahrscheinlichkeit ab einer bestimmten

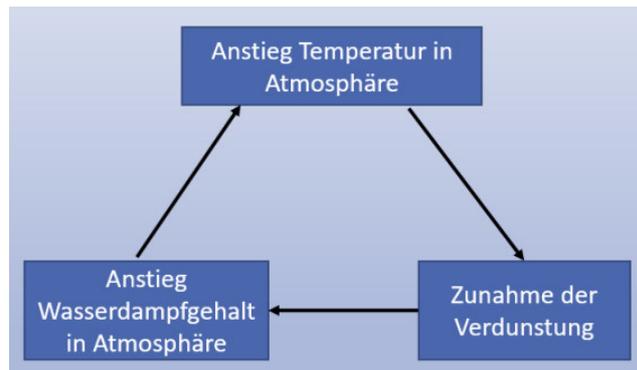


Abb. 16: Wasserdampf-Rückkopplung (eigene Darstellung)

Temperaturerhöhung stark ansteigt. Wird ein solcher Kippunkt überschritten, können unwiderrufliche Veränderungen einsetzen mit unvorhersehbaren Schäden für Mensch und Natur (LATIF 2009b: 8).

LATIF schreibt dazu: „Es gibt einen Konsens dahingehend, die Erwärmung bei möglichst niedrigem Niveau zu stabilisieren und den mittleren globalen Temperaturanstieg bis 2100 auf unter 2°C gegenüber der vorindustriellen Zeit zu begrenzen, um bestimmte Schwellenwerte nicht zu überschreiten und damit einen gefährlichen Klimawandel zu vermeiden“ (ebd.).

Ein Beispiel für ein solches Ereignis, das beim Überschreiten eines Kippunktes ausgelöst werden kann, ist das Auftauen der Permafrostböden. Unter einem Permafrostboden versteht man „Boden oder Sediment, dessen Temperatur mindestens zwei Jahre in Folge bei oder unter 0°C liegt und somit dauerhaft gefroren ist“ (UBA 2006: 2). Permafrostböden bilden mächtige Senken für Methan und Kohlenstoff. Kommt es zu einem Auftauen dieser Böden infolge des anthropogenen Klimawandels, werden beide Gase an die Atmosphäre abgegeben. Da es sich bei diesen, um Treibhausgase handelt, wird eine Klimaerwärmung zusätzlich verstärkt (vgl. UBA 2006: 2ff.). Da die Permafrostböden aufgrund der globalen Erwärmung nicht mehr ihren Ausgangspunkt erreichen können, agieren diese nicht mehr als Senken für Treibhausgase.

2.4. Folgen des Klimawandels

In den vorherigen Kapiteln wurden vor allem die physikalischen Grundlagen von Klima und Klimawandel sowie ein Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur diskutiert. In diesem Kapitel soll näher auf weitere Folgen für Mensch und Natur eingegangen werden. Es gibt eine Vielzahl von Auswirkungen des Klimawandels auf Mensch und Umwelt. Hierfür wären beispielsweise zu nennen (vgl. LAWRENCE 2019):

- Veränderung der Niederschläge
- Versauerung und Erwärmung der Ozeane
- Anstieg des Meeresspiegels
- Schmelzen von Eisschilden und Gletschern
- Verschiebung von Klimazonen
- Änderungen in Häufigkeit, Entstehungsort und Intensität von Extremereignissen
- Veränderung von Meeresströmungen
- sozioökonomische Auswirkungen und politische Spannungen

In den nächsten Abschnitten werden das Schmelzen des Meereises, der Eisschilde und Gletscher sowie die Versauerung und Erwärmung der Ozeane näher beschrieben, da diese im Schülerlabor inhaltlich behandelt werden.

2.4.1. Schmelzen des Meereises

Der Klimawandel sorgt in den polaren Gebieten für einen Anstieg der Temperaturen, was ein Schmelzen von Gletschern, aber auch des Meereises verursacht. Unter Meereis versteht man gefrorenes Meerwasser, das auf dem Ozean schwimmt. Es bildet sich im Winter, wenn niedrige Temperaturen herrschen. Im Sommer bei höheren Temperaturen schmilzt es zum Teil und die Gesamtfläche des Meereises geht zurück (HEINEMANN 2015: 4).

Meereis ist in der Arktis sowie in der Antarktis zu finden. Die Ausdehnung liegt in der Arktis im Jahresgang zwischen 7 und 15 Millionen Quadratkilometern und in der Antarktis im Jahresgang zwischen 3 und 18 Millionen Quadratkilometern. Diese Werte spiegeln die Größe der Schwankungen im Jahresgang wider (ebd.). Eine Abnahme des Meereises hat vor allem Auswirkungen auf die Albedo. Ein Anstieg des Meeresspiegels ist vernachlässigbar, da das Volumen des vom Meereis verdrängten Meerwassers nahezu dem Volumen des Meereises entspricht. „Vernachlässigbar“ bedeutet, dass es zu

einem minimalen Anstieg im Mikrometerbereich kommt, da das Meereis einen geringen Salzgehalt aufweist und damit eine kleinere Dichte besitzt (HANTEL 2016: 159).

Während in der Antarktis das Meereis im Jahresmittel um 1,2 bis 1,8% pro Jahrzehnt zunimmt, ist in der Arktis eine Abnahme von 3,5 bis 4,1% pro Jahrzehnt zu beobachten. Das den Sommer überdauernde Meereis in der Arktis nimmt sogar im Bereich von 9,4 bis 13,6% pro Jahrzehnt ab (IPCC 2013: 13). Betrachtet man die zukünftige Entwicklung, wird nach dem Szenario RCP8.5 erwartet, dass bereits vor 2050 der arktische Raum im September nahezu bis vollständig eisfrei sein wird (siehe Abb. 17). Für die anderen Szenarien kann dazu keine vertrauenswürdige Prognose gemacht werden. Auch über die Entwicklung des Meereises in der Antarktis können die Klimamodelle keine Aussage machen (IPCC 2013: 29).

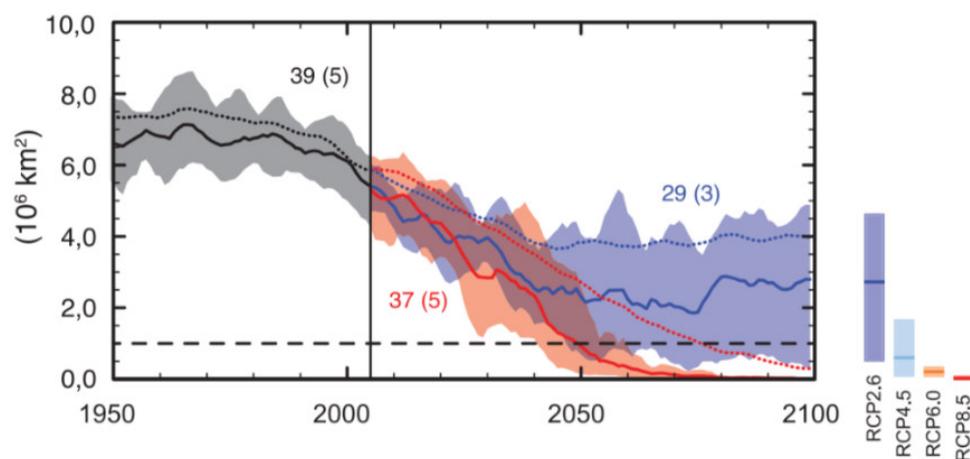


Abb. 17: CMIP5 Multimodell-simulierte Zeitreihen von 1950 bis 2100 für die Ausdehnung des nordhemisphärischen Meereises im September (gleitendes 5-Jahre-Mittel) (IPCC 2013: 25)

2.4.2. Gletscherschmelzen und Meeresspiegelanstieg

Weitere Auswirkungen, die im gesellschaftlichen Diskurs zum Klimawandel oft aufgegriffen werden, sind das Schmelzen der Gletscher und Eisschilde sowie der Anstieg des Meeresspiegels. Es gibt zwei Mechanismen, die durch die Erderwärmung in Gang gesetzt wurden und zu einem Anstieg des Meeresspiegels relativ zum Erdmittelpunkt führen. Zum einen ist das die thermische Expansion und zum anderen das Schmelzen der Gletscher und Eisschilde. Diese Mechanismen können zusammen circa 75% des beobachteten mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs erklären. Für die anderen 25% sind tektonische Prozesse verantwortlich (IPCC 2013: 15).

Unter der thermischen Expansion der Ozeane versteht man eine Ausdehnung des Meerwassers. Da die obere Ozeanschicht stärker als die unteren Schichten erwärmt wird, dehnt sich diese am stärksten aus. Dabei bleibt die Ozeanmasse gleich, da das Wasser nur seine Dichte verringert und damit das Wasservolumen zunimmt. Da das Salzwasser des Ozeans mit einem typischen Salzgehalt von 35 Promille seinen Gefrierpunkt bei ca. $-1,8^{\circ}\text{C}$ hat, zeigt es keine Dichteanomalie (vgl. HEINEMANN 2015: 4;

MARZEION 2019: 18). Das hat zur Folge, dass eine Erwärmung des Ozeanwassers immer zu einer Ausdehnung führt. Der Meeresspiegelanstieg durch thermische Expansion ist nicht an jedem Ort gleich, sondern hängt stark von Wassertemperatur und deren relativer Erwärmung ab (KANWISCHER und KOHLY 2006: 16f.). Die Wassertemperatur ist insofern relevant, da der Volumenausdehnungskoeffizient abhängig von der Temperatur ist. Tabelle 3 zeigt die Werte des Koeffizienten für 0°, 20° und 100°C. Die thermische Expansion betrug zwischen 1993 und 2015 im Durchschnitt ($1,36 \pm 0,40$) mm pro Jahr und zwischen 2006 und 2015 ist sie sogar auf ($1,4 \pm 0,3$) mm pro Jahr angestiegen (OPPENHEIMER 2019: 336).

Tab. 3: Wärmeausdehnungskoeffizient für Wasser (KLOSE 2016: 129)

Temperatur	Wärmeausdehnungskoeffizient
0°C	$-0,08 \cdot 10^{-3}/K$
20°C	$0,209 \cdot 10^{-3}/K$
100°C	$2,881 \cdot 10^{-3}/K$

Die zweite Ursache für den Anstieg des Meeresspiegels ist das Schmelzen der Gletscher. Man unterteilt die Gletscher der Erde in die kontinentalen Eisschilde Grönlands und der Antarktis sowie in die Gebirgsgletscher der Hochgebirge. Weltweit ist ein Schmelzen dieser Gletscher als Folge der globalen Erderwärmung festzustellen, wobei es sehr seltene Ausnahmen gibt, bei denen es regional zu einem Wachstum der Gletscher kommt. Dieses Wachstum ist aber nicht als Gegenargument der globalen Erderwärmung zu sehen, sondern vielmehr als eine Folge dieser. Ein Gletscherwachstum ist durch einen vermehrten Schneefall bedingt, welcher seine Ursache in einem klimawandelbedingten Anstieg der Winterniederschläge hat (vgl. KOTZTIN 2019: 27f.). Dieses Phänomen ist vor allem in der Antarktis zu beobachten, weshalb das Abschmelzen des antarktischen Eisschildes insgesamt sehr gering ausfällt. So beträgt der Meeresspiegelanstieg durch das Schmelzen der antarktischen Eismassen zwischen 1993 und 2015 im Jahresdurchschnitt ($0,29 \pm 0,18$) mm und im Zeitraum zwischen 2006 und 2015 im Jahresdurchschnitt ($0,43 \pm 0,09$) mm. Bei dem grönländischen Eisschild sind die Abschmelzraten wesentlich höher. Hier betrug der Anteil am Meeresspiegelanstieg zwischen 1993 und 2015 ($0,46 \pm 0,25$) mm pro Jahr und zwischen 2006 und 2015 ($0,77 \pm 0,05$) mm pro Jahr. Auch bei den Gletschern außerhalb von Antarktis und Grönland ist ein starkes Abschmelzen zu erkennen. Ihre Anteile zum Meeresspiegelanstieg betragen zwischen 1993 und 2015 ($0,56 \pm 0,22$) mm pro Jahr und zwischen 2006 und 2015 ($0,61 \pm 0,08$) mm pro Jahr (OPPENHEIMER 2019: 336).

Wenn alle Gletscher auf der Erde abschmelzen, würde es zu einem Meeresspiegelanstieg von ca. 60 m kommen (KOTZTIN 2019: 29). Ein solcher extremer Anstieg des Meeresspiegels ist bis zum Jahre 2100 nicht zu erwarten. Der IPCC geht von einem mittleren globalen Meeresspiegelanstieg für 2081 bis 2100 im Vergleich zu 1986 bis 2005 im Bereich von ($0,40 \pm 0,15$) m für das Szenario RCP 2.6 und im Bereich von ($0,75 \pm 0,23$) m für das Szenario RCP 8.5 aus (siehe Abb. 18). Bei dem Szenario RCP 8.5 ist mit einem Meeresspiegelanstieg im Zeitraum 2081 bis 2100 von (12 ± 4) mm pro Jahr zu rechnen. Bei den verschiedenen RCP-Szenarien für das 21. Jahrhundert beträgt der Anteil der thermischen Expansion

am Meeresspiegelanstieg zwischen 30 und 55% und der Anteil der Gletscherschmelze zwischen 15 und 35%. Hierbei wird deutlich, dass die thermische Expansion überwiegt (vgl. IPCC 2013: 29f.).

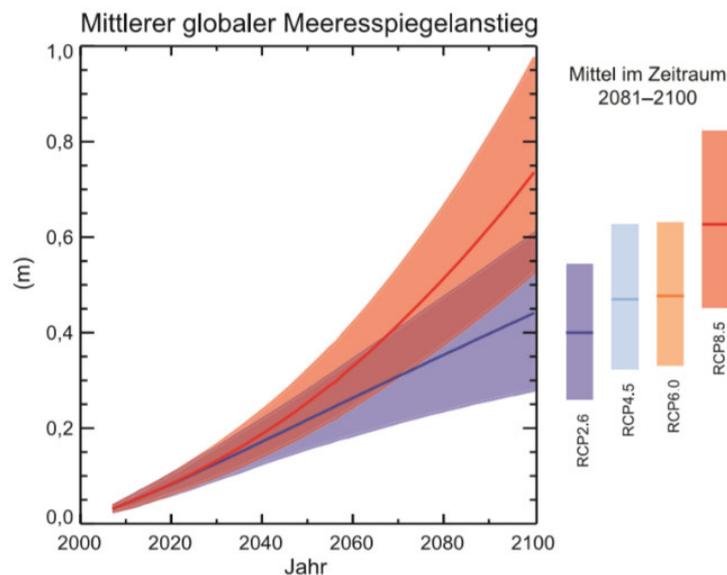


Abb. 18: Projektionen des mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs im 21. Jahrhundert bezogen auf 1986-2005, aus einer Kombination der CMIP5-Modellgruppe und prozessbasierten Modellen, für RCP2.6 und RCP 8.5 (IPCC 2013: 30)

Dieser Meeresspiegelanstieg hat eine Vielzahl von globalen Auswirkungen. Es kommt vor allem zu einer Erhöhung des Wasserstandes und damit verbunden zu Überschwemmungen der Küstenbereiche. Dies ist katastrophal, da die Küstenregionen als Lebensraum für eine Vielzahl von Menschen dienen. Bei einem Anstieg von 0,5 m wäre die Lebensgrundlage von ca. 92 Millionen Menschen gefährdet und bei einem Anstieg von 1 m wären es sogar über 118 Millionen (BERGE 2009: 76). Vor allem sind Insel- und Küstenstaaten ohne größere Erhebungen gefährdet, wie beispielsweise die Malediven, Vietnam, Bangladesch oder die Niederlande. Der Anstieg des Meeresspiegels birgt noch weitere Gefahren, unter anderem die Erosion von Küsten, Salzwassereindrang in das Grundwasser und die Zunahme von Extremwasserständen (KANWISCHER und KOHLY 2006: 16). Bei dem letztgenannten konnte ein logarithmischer Zusammenhang zwischen dem Wasserstand und der Wiederkehrperiode von Sturmfluten festgestellt werden (MARZEION 2019: 21).

2.4.3. Ozeanversauerung und Erwärmung der Ozeane

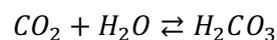
Die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels betreffen nicht nur die Höhe des Meeresspiegels, sondern auch die chemische Zusammensetzung der Ozeane. Der CO₂-Anstieg in der Atmosphäre bewirkt eine Vergrößerung der Partialdruckdifferenz des Kohlenstoffdioxids zwischen Atmos- und Hydrosphäre. Das hat eine Ausgleichsbewegung zur Folge, da die Moleküle immer an Stellen mit geringerem Partialdruck diffundieren. Da der Ozean meistens den geringeren Partialdruck aufweist, gelangt

CO₂ von der Atmosphäre ins Meer. Nur in wenigen wärmeren Regionen läuft dieser Prozess auch umgekehrt ab, sodass CO₂ vom Ozean in die Atmosphäre abgegeben wird (vgl. BIOACID 2012: 4).

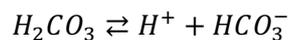
Auf diese Weise gelangen jährlich etwa 2 Gigatonnen CO₂ in die Oberflächenschicht des Ozeans, was etwa 30% der anthropogenen Kohlenstoffdioxid Emissionen entspricht. In den Ozeanen werden momentan circa 38 000 Gigatonnen Kohlenstoffdioxid gespeichert (LATIF 2009a: 174). Diese Tatsache macht die Ozeane zu dem zweitgrößten Speicher für atmosphärisches CO₂ (WITTLICH 2012: 31). So wird durch den Ozean als natürliche Senke der anthropogene Treibhauseffekt abgeschwächt. Die „Weltmeere dienen also als global aktives, klimaregulierendes Korrektiv“ (WITTLICH 2012: 27).

Das im Ozean gelöste CO₂ wird in zwei Kohlenstoffreservoirs unterteilt: DIC (dissolved inorganic carbon) und DOC (dissolved organic carbon) (vgl. BIOACID 2012: 33). Unter dem gelösten anorganischen Kohlenstoff (DIC) versteht man das im Wasser gelöste Kohlenstoffdioxid CO₂, Hydrogenkarbonate HCO₃⁻ und Karbonat-Ionen CO₃²⁻ (ebd.). Das DIC gelangt von der Oberflächenschicht des Ozeans mit der Ozeanzirkulation in die tieferen Bereiche in einer Zeitspanne von Jahrzehnten bis Jahrhunderte (LATIF 2009a: 174). Der gelöste organische Kohlenstoff (DOC) ist der Kohlenstoff, der von Phytoplankton durch Photosynthese in Form organischer Substanz gebunden wird. Diese Algen werden von Plankton gefressen und gelangen als Kotballen in tiefere Meeresschichten. Nicht gefressene, abgestorbene Algen verkleben sich mit Kalkschalen und -gehäusen und sinken dadurch auch in die Tiefsee ab. Bakterien setzen beim Transport und am Meeresboden das Kohlenstoffdioxid wieder frei. Auf diese Weise wird Kohlenstoff in tiefere Ozeanschichten befördert und die obere Ozeanschicht kann CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen (BIJMA und BURHOP 2010: 18).

Das CO₂, das nicht organisch gebunden wird, ist im Meerwasser chemisch aktiv. Es reagiert mit dem Meerwasser und es kommt zur Bildung von Kohlensäure.

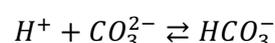


Die Kohlensäure ist sehr instabil und spaltet sich auf in H⁺-Ionen und Hydrogenkarbonat-Ionen.



Die Zunahme der Konzentration der Wasserstoff-Ionen führt zu einer Absenkung des pH-Wertes, was einer Versauerung entspricht.

Zudem können die H⁺-Ionen wiederum mit Karbonat-Ionen, die sich im Ozean befinden, reagieren, wodurch Hydrogenkarbonat-Ionen entstehen.



So bilden die Karbonat-Ionen einen Puffer gegen die Versauerung der Ozeane (vgl. BIJMA und BURHOP 2016: 16; BIOACID 2012: 6; SCHULZ und RIEBESELL 2012: 160f.)

Der durchschnittliche pH-Wert der Ozeane liegt bei einem Wert von 8,2 (BIJMA und BURHOP 2016: 16). Man konnte seit Beginn der Industrialisierung feststellen, dass der pH-Wert um circa 0,1 Einheiten gesunken ist (LATIF 2009a: 175). Bei der zukünftigen Entwicklung des pH-Wertes gibt es je nach Szenario unterschiedliche Berechnungen (siehe Abb. 19). Bei dem Szenario RCP2.6, welches von einer starken Emissionsverminderung in den nächsten Jahren ausgeht, sinkt der pH-Wert nicht unterhalb von 8. Das Szenario RCP4.5 mit einem Maximum der CO₂-Emissionen bis 2040 geht von einer Abnahme des pH-Wertes auf einen Wert von 7,9 aus. Bei dem RCP8.5. Szenario sinkt, aufgrund der bis 2100 steigenden Treibhausgasemissionen, der pH-Wert sogar bis auf 7,4 ab (DKRZ o.J.). Die beiden Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 unterschreiten einen pH-Wert von 8,0 im oberen Ozean, den der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) als Leitplanke festsetzt: „Um unerwünschte bzw. riskante Veränderungen der marinen Nahrungsnetze [...] zu verhindern, sollte der pH-Wert der obersten Meeresschicht (Deckschicht) in keinem größeren Ozeangebiet [...] um mehr als 0,2 Einheiten gegenüber dem vorindustriellen Wert von im Mittel 8,18 absinken“ (WBGU 2006: 75).

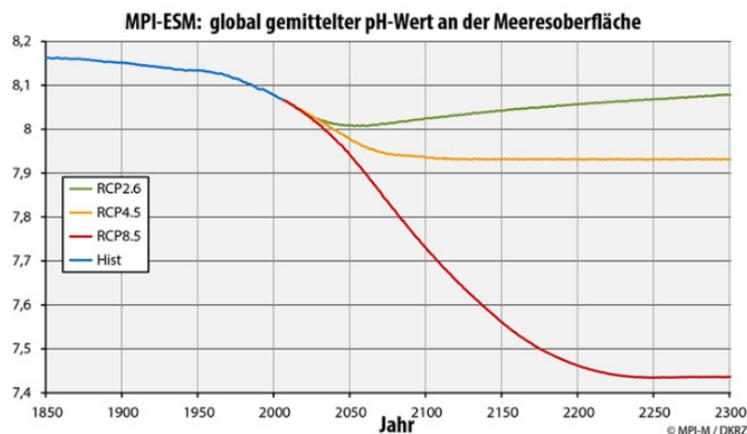


Abb. 19: Global gemittelter pH-Wert an der Meeresoberfläche (DKRZ a o.J.)

Die Löslichkeit von CO₂ und damit auch die Versauerung ist abhängig von Faktoren wie Druck, Temperatur und Salzgehalt der Meere (vgl. WITTLICH 2012: 27). Der Einfluss der Temperatur auf Löslichkeit von CO₂ in Wasser kann durch das Prinzip von Le Chatelier (Prinzip vom kleinsten Zwang) erklärt werden. Das Prinzip besagt: Wenn bei exothermen Reaktionen zusätzliche Wärmeenergie hinzugeführt wird, kommt es zu einer Verschiebung des chemischen Gleichgewichtes in Richtung des Ausgangsstoffes. Auf diese Weise wird der Zwang vermindert. Das bedeutet für eine Temperaturerhöhung des Meerwassers, dass ein äußerer Zwang auf die Lösungsreaktion einwirkt, weshalb das Gleichgewicht in Richtung Kohlenstoffdioxid verschoben wird. In Folge der Erwärmung gast der Ozean demnach CO₂ in die Atmosphäre aus. Bei einer Temperaturabsenkung dagegen verschiebt sich das Gleichgewicht in Richtung Kohlensäure. Damit steigt die Löslichkeit von CO₂ (ebd.). Dieses Prinzip hat sowohl in

räumlicher als auch in zeitlicher Hinsicht weitreichende Folgen auf die globalen Ozeane. Aus räumlicher Perspektive sind die Polregionen viel stärker von der Ozeanversauerung betroffen als die tropischen und subtropischen Meere. In diesen polaren Regionen kommt es schon heute teilweise zur Korrosion der kalkbildenden Organismen (BIOACID 2012: 4). In zeitlicher Hinsicht kommt es zu einer positiven Ozean-Kohlenstoffdioxid-Rückkopplung. Wenn die Aufnahmekapazität der Ozeane aufgrund ihrer Erwärmung sinkt, wird ihre Eigenschaft als natürliche Senke verringert. Das hat zur Folge, dass mehr CO₂ in der Atmosphäre verbleibt und dadurch der anthropogene Treibhauseffekt verstärkt wird. Das bewirkt wiederum eine zusätzliche Erwärmung der Meere (WITTLICH 2012: 27).

Die Verringerung der CO₂-Aufnahmekapazität der Ozeane konnte bereits bei Messungen festgestellt werden: Zwischen den Jahren 1800 und 1994 wurden vom Ozean 28-34 %, dagegen zwischen den Jahren 1980 und 1999 nur 26 % von den anthropogenen Treibhausemissionen aufgenommen (LATIF 2009a: 177f.). In einem Szenario, bei dem die anthropogenen Treibhausemissionen konstant bleiben, würde im Jahr 2100 die Aufnahmekapazität der Ozeane um circa 60 % im Vergleich zu heute sinken (BIJMA und BURHOP 2010: 18).

Der anthropogene Einfluss auf das Ökosystem Ozean kann unvorhersehbare Folgen haben. Vor allem die Reduzierung der Karbonat-Ionen-Konzentration führt bei kalkbildenden Organismen zu einer verminderten Kalkbildung bis teilweise zu Fehlbildungen in den Kalkskeletten (LATIF 2009a: 176). Das Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung schreibt dazu: „im Südpolarmeer haben Forscher bereits Plankton entdeckt, dessen Schalen 35% leichter sind als Vergleichsfunde aus Sedimentkernen aus der Zeit vor der Industrialisierung“ (BIOACID 2012: 3). Zudem kommt es durch einen Anstieg des Kohlenstoffes im Wasser zu einer Verringerung der Temperaturtoleranz einiger Meerestiere (LATIF 2009a: 178). Das führt zu einer Abnahme der Meeresorganismen, wie beispielsweise des Planktons. Dieser steht ganz unten in der Nahrungskette und bildet somit die Futterquelle für alle anderen Meeresorganismen. Dies kann verheerende Folgen auf die Biodiversität des Ozeans haben (BIJMA und BURHOP 2010: 16).

Besonders betroffen von den Folgen des Klimawandels sind die Korallenriffe. Neben der Korrosion durch die Versauerung der Ozeane, kommt die Korallenbleiche als weiteres Problem hinzu (siehe Abb. 20). Unter der Korallenbleiche versteht man ein Ausblassen der Korallen bei erhöhter Wassertemperatur bis hin zu dessen Absterben (vgl. RICHTER 2019: 16f.).



Abb. 20: Korallenbleiche im Réunion (Wikimedia Commons 2006)

Eine umstrittene Möglichkeit, um die Ozeane wieder zu entsäuern, ist eine sogenannte Ozeandüngung. Dies wurde bereits in Form einer Eisendüngung getestet. Drei dieser Experimente (Eisenex, EIFEX und LOHAFEX) wurden vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Kooperation mit anderen wissenschaftlichen Instituten durchgeführt (LEUJAK et a. 2012: 349ff.). Bei einer solchen Düngung wird Eisen in den Ozean gegeben, um damit eine großräumige Algenblüte zu erzeugen. Dieses Phytoplankton bindet durch Photosynthese das Kohlenstoffdioxid in der obersten Wasserschicht und sinkt danach in tiefere Schichten ab. Die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf den Klimawandel und die Meeresversauerung zu quantifizieren, gestaltete sich bei den Versuchen als schwierig. Vor allem müsste eine Düngung über lange Zeiträume von über 100 Jahren erfolgen (ebd.). Zudem gibt es zahlreiche Risiken für Mensch und Umwelt, die mit einer solchen Methode des Climate Engineering einhergehen. Es kann Auswirkungen auf die Artenzusammensetzung haben, zu toxischen Algenblüten und sauerstoffarmen Zonen führen sowie das Nahrungsnetz verändern (ebd.). Aus diesen Gründen bestehen derzeit große Zweifel, ob die Meeresdüngung eine erfolgsversprechende Maßnahme gegen den Klimawandel und die Ozeanversauerung darstellt.

3. Didaktische und methodische Grundlagen

3.1. Allgemeiner Aufbau des Schülerlabors

Das Schülerlabor besteht aus sechs Stationen sowie einer Einführungs- und Abschlussphase. Wenn alle Schüler*innen alle Stationen durchlaufen sollen, ist es am günstigsten die Durchführung auf zwei Tage aufzuteilen. Sollen nur drei Stationen durchgeführt werden, ist ein Versuchstag ausreichend. Tabelle 4 zeigt den zeitlichen Ablauf exemplarisch für Gruppe A für zwei Versuchstage. Für die Stationen 1, 4, 5 und 6 ist eine Zeitdauer von 90 Minuten eingeplant. Dagegen beträgt die Zeitdauer bei Station 2, 3 und 3b nur 60 Minuten. Da diese drei Stationen inhaltlich aufeinander aufbauen, sollten sie hintereinander absolviert werden. Zwischen jeder Station gibt es eine 5-Minuten-Pause. Diese erfüllt zum einen den Zweck, dass sich die Schüler*innen kurz erholen und ggf. eine Kleinigkeit Essen und Trinken können und zum anderen müssen die Assistent*innen in dieser Zeit alle Stationen „resetteten“, also für die nächste Gruppe wieder in den Ausgangszustand überführen. Neben den 5-Minuten-Pausen gibt es, wie bei den anderen Schülerlaboren üblich, eine ausgedehnte Mittagspause. Für die Einführung und den Abschluss wird eine Zeitdauer von 30 Minuten eingeplant.

Tab. 4: zeitlicher Ablauf des Schülerlabors für Gruppe A

Zeitplan	
Tag 1	
9.00 - 9.30	Einführung
9.30 - 11.00	Station 1: Albedo
11.05 - 12.05	Station 2: Treibhauseffekt
12.05 - 12.35	Station 3: Eigenschaften von Treibhausgasen (Teil 1)
12.35 - 13.30	Mittagspause
13.30 - 14.00	Station 3: Eigenschaften von Treibhausgasen (Teil 2)
14.00 - 15.00	Station 3b: Anthropogener Treibhauseffekt
Tag 2	
9.00 - 10.30	Station 4: Meeresspiegelanstieg
10.35 - 12.05	Station 5: Ozeanversauerung
12.05 - 13.00	Mittagspause
13.00 - 14.30	Station 6: Nachhaltigkeit
14.30 - 15.00	Abschluss

Bei einer Gruppe handelt es sich um eine Einheit von drei bis fünf Schülerinnen und Schülern. Dadurch ist es bei fünf Gruppen theoretisch möglich, insgesamt 25 Schüler*innen im Schülerlabor gleichzeitig zu beschäftigen. Das bietet die Möglichkeit, dass auch größere Schulklassen das Schülerlabor absolvieren können. Die Mindestteilnehmerzahl beträgt dagegen nur zwei Schüler, sodass nur Gruppe A besetzt wäre. Da jede Station nur einmal existiert, kann jede Station gleichzeitig nur von einer Gruppe belegt werden. Das heißt, dass Gruppe A mit Station 1, Gruppe B mit Station 2, Gruppe C mit Station 4, usw. beginnt. Der Ablaufplan der einzelnen Gruppen ist in Tabelle 5 aufgeführt. Aus diesem Grund war es wichtig, die Stationen so zu gestalten, dass diese inhaltlich möglichst wenig aufeinander aufbauen. Zwar ist die Reihenfolge von Gruppe A, die aus thematischer Sicht sinnvollste, aber aus didaktischer Sicht werden keine Kompetenzen und Inhalte für nachfolgende Stationen benötigt. Eine

Ausnahme bildet, wie bereits erwähnt Station 2, 3 und 3b, die auch aus didaktischer Sicht in dieser Reihenfolge absolviert werden sollten.

Tab. 5: Abfolge der Stationen für die Gruppen A bis E

Gruppe A	Gruppe B	Gruppe C	Gruppe D	Gruppe E
Station 1	Station 2	Station 4	Station 5	Station 6
Station 2	Station 3	Station 5	Station 6	Station 1
Station 3	Station 3b	Station 6	Station 1	Station 2
Station 3b	Station 4	Station 1	Station 2	Station 3
Station 4	Station 5	Station 2	Station 3	Station 3b
Station 5	Station 6	Station 3	Station 3b	Station 4
Station 6	Station 1	Station 3b	Station 4	Station 5

Die Stationen 1 bis 3 beschäftigen sich thematisch mit den physikalischen Grundlagen des Klimawandels und die Stationen 4 bis 6 mit dessen Folgen und den Handlungsmöglichkeiten diesem entgegenzuwirken. Obwohl die Stationen inhaltlich grundlegend unterschiedlich sind, weist ihr Aufbau aus methodischer und didaktischer Sicht die gleiche Struktur auf. Diese Struktur wird in den nachfolgenden Abschnitten genauer beschrieben.

3.2. Schülerlabor als Escape Room

Eine Besonderheit des Schülerlabors ist die Gestaltung der einzelnen Stationen als einen sogenannten Escape Room. Escape Rooms existieren in Deutschland vor allem in kommerzieller Form, üblicherweise ohne dabei einen bestimmten Bildungsinhalt vermitteln zu wollen. Viele Schüler*innen haben bereits in ihrer Freizeit einen solchen Raum besucht und verbinden damit ein positives Erlebnis. Die Internetplattform von Escape-Rooms Gießen definiert einen solchen Raum folgendermaßen: *„Der Escape Room ist ein realitätsgetreu nachgebauter thematischer Raum, in dem die Spieler in der vorgeschriebenen Zeit [...] unterschiedliche Rätsel lösen müssen, um den Raum als Sieger verlassen zu können [...] Die Rätsel sprechen verschiedene Fähigkeiten an – benutzt werden müssen Köpfchen, Phantasie, Geschick, Logik und Kombinationsgabe. Wie im echten Leben gibt es niemanden, der alles weiß und kann [...] Einzelkämpfer und einsame Helden haben wenig Chancen – nur wenn die Gruppe als Team zusammenarbeitet, kann sie gewinnen“* (vgl. Escaperooms Gießen o.J.).

Aus dieser Beschreibung werden die Vorteile deutlich, die ein solches Spieleformat bietet. Dazu gehören die Förderung von kooperativem Lernen, das Fördern verschiedener Kompetenzen, wie etwa Kommunikation, Fachwissen, Erkenntnisgewinnung oder logisches Denken (siehe WODZINSKI 2004). Zudem bilden sie einen Ort für ein Gruppenerlebnis, das kontextorientiertes und kognitiv aktivierendes Lernen einschließen kann. Unter der Kontextorientierung versteht man die Verknüpfung von fachlichen Inhalten mit nicht fachlichen, sinnstiftenden Inhalten, wie hier mit einem Escape-Room-Szenario (vgl. DUSKE 2017: 20). Durch diese Verbindung wird bei den Schülerinnen und Schülern Interesse und Motivation für die Thematik geschaffen. Das wirkt sich wiederum positiv auf die Zielrichtung, die Ausdauer und die Intensität ihres Verhaltens aus (vHAVERSATH 2012: 144). Bei dem kognitiv aktivierenden Lernen sollen die Schüler*innen mental sowie emotional zu vertiefenden und zunehmend selbstgesteuerten Lernprozessen angeregt werden (Lehr-Lern-Forschungslabor Universität Mainz o.J.).

Das Konzept des Escape Rooms lässt sich zudem ideal in ein Schülerlabor integrieren, da zum einen die Schüler*innen einen neuen Raum betreten, der vorher für sie mit Arbeitsmaterialien und Versuchen präpariert wurde und zum anderen sie dort in Kleingruppen an verschiedenen Versuchsstationen arbeiten. Der Unterschied des Climate Escape zu den kommerziellen Escape Rooms ist die gezielte Verbindung mit einem Bildungsinhalt aus dem Lehrplan in Form von Educational Gaming. Die Schüler*innen haben somit Spaß beim Lösen der Rätsel und Knacken der Schlösser und erlernen eher nebenbei die neuen physikalischen Inhalte und Kompetenzen. Abbildung 21 zeigt ein solches Rätsel des Escape Rooms. Hierbei werden Kenntnisse über den pH-Wert wiederholt. Eine detaillierte Beschreibung der Wirkung von Educational Games auf das Lernverhalten von Schüler*innen kann aus der Dissertation von MICHAEL K. FILSECKER WAGNER (2014) entnommen werden.

Im Kontext des Escape Rooms stellen die einzelnen Stationen des Schülerlabors die einzelnen Abteilungen eines verlassenen Forschungslabors dar. Die Hintergrundgeschichte wird wie folgt beschrieben:

*„In den Kellerräumen der Universität Mainz befindet sich ein streng geheimes Forschungslabor. Die Wissenschaftler*innen dieses Labors haben sich zur Aufgabe gesetzt, den anthropogenen Klimawandel und dessen Auswirkungen zu untersuchen. Sie stellen wichtige Forschungsergebnisse zusammen für den nächsten Klimakongress. Leider kam es zu einem Zwischenfall im Labor. Eine*

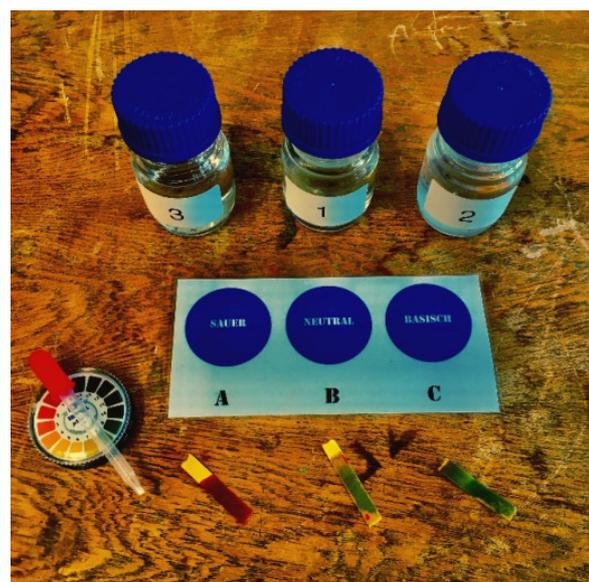


Abb. 21: Escape-Room-Rätsel zur pH-Wert Bestimmung aus Station 5 (eigene Aufnahme)

*Organisation aus Klimawandel-Leugnern hat das Labor gestürmt. Die Wissenschaftler*innen haben noch versucht einen Teil ihrer Forschungsdaten vor den Angreifern zu verstecken. Aber leider wurde ein Großteil der Daten vernichtet und die Wissenschaftler*innen verschleppt. Aus diesem Grund wurde eine Gruppe von Nachwuchs-Wissenschaftler*innen in das Labor geschickt, um die Forschungsdaten zu rekonstruieren und die Geheimakte zu finden. Diese soll ein Abbild von der Person beinhalten, die maßgeblich dazu beitragen kann, den Klimawandel zu verhindern.“*

Bei der Hintergrundgeschichte wird deutlich, dass es sich bei dem Schülerlabor um einen großen Escape Room handelt, der in sechs inhaltlich abgeschlossene Unterräume unterteilt werden kann. Aus diesem Grund wird der Einführungs- und Abschlussphase eine große Rolle zugeschrieben, da sie die einzelnen Unterräume zu einem Großen und Ganzen verbinden. Die Teilnehmer*innen nehmen im Schülerlabor nicht mehr die Rolle als Schüler*innen, sondern als Nachwuchswissenschaftler*innen ein. Dieser Titel soll die Schüler*innen zusätzlich motivieren, da ihnen so bereits gewisse naturwissenschaftliche Kompetenzen zugeschrieben werden, aber sie trotzdem noch nicht alles Wissen müssen und mögliche Fehler toleriert werden.

3.3. Bildungsgehalt des Schülerlabors

Die Inhalte der einzelnen Stationen wurden nach den „Fünf Grundfragen von KLAFKI“ ausgewählt. Diese fünf Grundfragen wurden von dem Pädagogen WOLFGANG KLAFKI verfasst, um den Bildungsgehalt eines Bildungsinhaltes zu ermitteln. Unter dem Bildungsinhalt wird in der pädagogischen Fachliteratur die zugrundeliegende Thematik verstanden. Die Zuschreibung eines Bildungsgehaltes geschieht durch Befriedigung der „Fünf Grundfragen von KLAFKI“ und legitimiert letztendlich den Bildungsinhalt (vgl. RINSCHENDE 2007: 412):

1. **Exemplarität:** *Welchen größeren bzw. welchen allgemeinen Sinn- oder Sachzusammenhang vertritt und erschließt dieser Inhalt?*

Die verschiedenen Stationen greifen unterschiedliche Aspekte des Klimawandels exemplarisch heraus. So werden beispielsweise nicht alle Folgen des Klimawandels behandelt, sondern es wird sich auf zwei festgelegt, die in der Klimawandeldebatte eine wichtige Rolle einnehmen. Auch die einzelnen Stationen, die Teilaspekte des Klimawandels darstellen, greifen auf die exemplarische Herangehensweise zurück. Dies kann an Station 5, Ozeanversauerung, verdeutlicht werden. Hier wird exemplarisch das Great Barrier Reef in Australien aufgegriffen, an dem die Ozeanversauerung erarbeitet wird. Aus physikalischer Sichtweise kann auch eine exemplarische Herangehensweise festgestellt werden. Physikalische Inhalte, wie die

Energieerhaltung oder das Stefan-Boltzmann-Gesetz, werden in diesem Schülerlabor am Beispiel des Klimawandels herausgearbeitet.

2. **Gegenwartsbedeutung:** *Welche Bedeutung haben der betreffende Inhalt bzw. die an diesem Thema zu gewinnende Erfahrung, Erkenntnis, Fähigkeit und Fertigkeit bereits im geistigen Leben der Kinder meiner Klasse, welche Bedeutung sollte er darin haben?*

Der Inhalt dieses Schülerlabors spielt aus einer gesellschaftlichen Perspektive eine sehr relevante Rolle. Die Schüler*innen werden in ihrem Alltag sowie durch die mediale Darstellung häufig mit dem Klimawandel konfrontiert. Aus diesem Grund ist es wichtig, sich fundierte Kenntnisse über das Thema anzueignen, damit sie sich ihre eigene Meinung bilden und die Aussagen anderer Personen bewerten können. Die physikalischen Inhalte, hier wäre exemplarisch die Energieerhaltung zu nennen, bilden zudem wichtige Grundlagen für den weiteren Physikunterricht. Die Energieerhaltung stellt ein Basiskonzept dar, das bei nachfolgenden Inhalten immer wieder aufgegriffen wird.

3. **Zukunftsbedeutung:** *Worin liegt die Bedeutung des Themas für die Zukunft der Kinder?*

Die Zukunft eines jeden Menschen ist unweigerlich mit der Zukunft der Erde verknüpft. Vor allem für die Schüler*innen ist dieser Zusammenhang von großer Bedeutung, da sie ein fortgeschrittenes Stadium des Klimawandels erfahren werden. Aufgrund der Komplexität der Einflussparameter kann das genaue Ausmaß für zukünftige Entwicklungen nur grob kalkuliert werden. Es ist jedoch klar, dass Handlungsbedarf besteht. Aus dem Namen, der durch Schüler*innen entstandenen Protestbewegung Fridays for Future, wird diese Forderung nach einem klimabewussten Handeln der Weltbevölkerung deutlich.

4. **Struktur:** *Wie ist der Inhalt strukturiert?*

Das Schülerlabor greift bereits vorhandene schulische Kenntnisse zum Thema „Optik und Licht“ sowie „Energieerhaltung“ auf und knüpft daran an. Betrachtet man die Struktur des Schülerlabors, kann man folgendes zum inhaltlichen Aufbau sagen: Den Einstieg bildet die Geschichte vom verlassenen Forschungslabor, das aus mehreren Stationen besteht. Bearbeitet man die Stationen nach der Reihenfolge von Gruppe A, ist eine inhaltliche Struktur zu erkennen. Station 1 bis 3 erklären den Strahlungshaushalt der Erde einschließlich des Treibhauseffekts. Station 4 und 5 behandeln die Folgen, die aus den vorherigen Stationen resultieren. Und die letzte Station versucht diese Probleme zu lösen, indem sie unterschiedliche Handlungsmöglichkeiten aufzeigt. Mit den Codeschnipseln, die in den einzelnen Stationen zu finden sind, kann das Abschlussrätsel gelöst werden und ein Fazit aus dem Schülerlabor gezogen werden.

5. **Zugänglichkeit:** *Welches sind die besonderen Fälle, Phänomene, Situationen, Versuche, in oder an denen die Struktur des jeweiligen Inhaltes den Kindern dieser Bildungsstufe, dieser Klasse interessant fragwürdig, zugänglich, begreiflich „anschaulich“ werden kann?*

Eine Zugänglichkeit zum Thema „Klimawandel“ wird zum einen durch die Gestaltung des Schülerlabors als Escape Room geschaffen sowie durch eine exemplarische Problemstellung zu Beginn jeder Station. Zum anderen wird der Inhalt durch die Gestaltung der Versuche gut zugänglich gemacht. Hierbei wurde darauf geachtet, dass diese so modellhaft wie möglich gestaltet sind, um den Transfer von Realität auf Modell zu erleichtern. Aus diesem Grund wurde auch auf typische Laborversuche weitgehend verzichtet und stattdessen verschiedene Dioramen entworfen.

Betrachtet man die Grundfragen von KLAFKI, konnte die Bedeutsamkeit des Bildungsinhaltes des gesamten Schülerlabors aus gesellschaftlicher und wissenschaftlicher Sicht gerechtfertigt werden.

3.4. Das Lehr-Lern-Modell

Im nächsten Schritt soll die didaktische Struktur der einzelnen Stationen genauer herausgearbeitet werden. Hierbei diene das Lehr-Lern-Modell von LEISEN sowie der experimentelle Algorithmus als Vorlage (vgl. LEISEN 2010: 2ff.; MÖNTER und OTTO 2016: 10). LEISEN versteht unter einem Lehr-Lern-Modell *„ein theoretisches Konstrukt zur Professionalisierung des Lehrens mit dem Ziel, dass Lerner wirksam und gut lernen“* (LEISEN 2018: 2).

Abbildung 22 zeigt den schematischen Aufbau dieses Modells. Lerner*innen treten mit einem bestimmten Vorwissen und bestimmten Kompetenzen in den Lernprozess ein. Die Lerner*innen absolvieren eine Chronologie von Lernschritten und entwickeln dabei Kompetenzen. Dieser Lernprozess wird materiell und personal von der Lehrkraft gesteuert. Bei dem Schülerlabor dient dieses Modell als Grundstruktur bei den einzelnen Stationen. Hierbei gibt es einige Abweichungen, da das Modell für den Unterricht sowie den damit einhergehenden Grenzen und Möglichkeiten und nicht für die Stationenarbeit eines Schülerlabors entwickelt wurde. Das zeigt sich vor allem bei der personalen Steuerung, da das Schülerlabor von einem „digitalen Moderator“ geleitet wird und dieser in der Regel keine individuelle Rückmeldung geben kann. Zwar stehen auch Assistent*innen vor Ort zu Verfügung, aber es gibt mehr Stationen als Assistent*innen, weshalb auch hier eine gezielte Rückmeldung bei jeder Station kaum möglich ist.

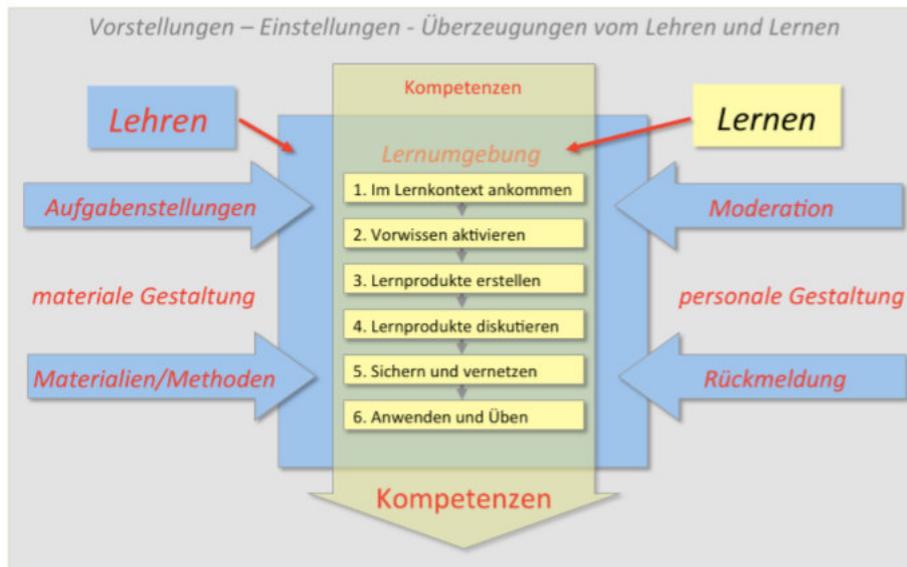


Abb. 22: schematischer Aufbau des Lehr-Lern-Modells (LEISEN 2018: 2)

Das Schülerlabor orientiert sich an folgenden Lernschritten:

1. Im Lernkontext ankommen:

Beim ersten Lernschritt werden die Teilnehmer*innen in den Kontext der Station eingebunden. Es wird eine Problemstellung herausgearbeitet, die beim Bearbeiten der Station gelöst werden soll. Diese Problemstellung dient meistens auch als Forschungsfrage für die Versuche.

2. Vorwissen aktivieren und Vorstellungen entwickeln:

Im nächsten Schritt geht es um die Aktivierung des Vorwissens. Dies gestaltet sich oft als schwierig, da das Schülerlabor von Schüler*innen aus verschiedenen Schulen und teilweise aus verschiedenen Bundesländern besucht wird. Das hat zur Folge, dass das Vorwissen stark nach Klasse und Schüler*in variiert. Als ungefähre Orientierung dienten die Lehrpläne für Naturwissenschaften und Gesellschaftswissenschaften des Landes Rheinland-Pfalz. In dieser Phase geht es darum, gezielt durch Aufgaben, bekannte Sachverhalte, die für die Bearbeitung der Station notwendig sind, wieder präsent in den Köpfen der Schüler*innen zu bringen. Zudem finden in diesem Lernschritt zwei Phasen des experimentellen Algorithmus statt: Zum einen die Modellbildung, d.h. der Transfer von der Realität auf das Modell, und zum anderen die Hypothesenbildung.

3. Lernprodukte erstellen:

Bei diesem Lernschritt werden den Schüler*innen durch kognitiv aktivierende Aufgaben neue Kompetenzen vermittelt (siehe Abschnitt 3.3). Sie erhalten abwechslungsreich ausgearbeitete Informationsquellen in Form von Erklärvideos, Texten, Versuchen und Diagrammen. Die Durchführung der Hauptversuche ist dieser Phase zuzuschreiben. Die im Versuch gewonnenen

Erkenntnisse werden anschließend interpretiert. Hierbei geschieht ein Rücktransfer, der in der experimentellen Lernumgebung des Modellraums gewonnenen Informationen, zum allgegenwärtigen Realraum. Mit Abschluss dieser Phase gilt der experimentelle Algorithmus als vollzogen. Die Sicherung der neu gewonnenen Erkenntnisse geschieht im nächsten Schritt durch die Erarbeitung eines materiellen Lernprodukts. Die methodische Umsetzung dieses Produkts unterscheidet sich bei jeder Station. So erfolgt die Sicherung beispielsweise durch zusammenfassende Berichte, das Erstellen von Schaubildern oder Wirkungsgefügen oder auch Briefe, die an das Zukunfts-Ich gerichtet sind. In dem Schülerlabor wird das Erstellen des Lernprodukts als „Hauptaufgabe“ der einzelnen Stationen betrachtet. Durch ihren offenen Aufgabencharakter unterscheiden sich die Hauptaufgaben von den sonstigen Lernaufgaben. Ein übergeordnetes Ziel aller Hauptaufgaben ist das Reflektieren und Zusammenfassen der Inhalte der einzelnen Stationen.

4. Lernprodukte diskutieren:

Im schulischen Kontext werden in dieser Phase die neuen Erkenntnisse des Lernproduktes im Plenum diskutiert. Durch das autonome Arbeiten in Kleingruppen im Schülerlabor kann dieser Lernschritt nicht in gleicher Weise stattfinden. Da diese Phase jedoch essenziell für den Lernprozess ist, findet sie an anderer Stelle Beachtung. So erfolgt die gemeinsame Diskussion im Plenum, nachdem alle Stationen durchlebt wurden. Diese Abweichung in der chronologischen Abfolge ist dem speziellen Charakter des Schülerlabors geschuldet. Ein Modell, das für schulischen Unterricht konzipiert wurde, wie das Lehr-Lern-Modell nach LEISEN kann nur unter Berücksichtigung solcher Modifikationen als Grundlage für die Planung eines Schülerlabors dienlich sein.

5. Sichern und vernetzen:

Diese Phase sieht das Sichern des neuen Wissens und dessen Vernetzen mit bekannten Sachverhalten vor. An dieser Stelle erfolgt im Schülerlabor eine weitere Abweichung zum Lehr-Lern-Modell. So konnte die Sicherung der neuen Erkenntnisse, durch geringfügige Modifikationen, bereits bei der Erarbeitung und Diskussion des Lernprodukts erreicht werden. Die Dekontextualisierung und Implementierung in den Unterricht dieser Lernprodukte unterliegt der Aufgabe der Lehrkraft in der nachfolgenden Unterrichtsstunde und kann durch die Restriktionen des Schülerlabors nicht geleistet werden.

6. Anwenden und Üben:

Die letzte Phase hat die Aufgabe, das Neugelernte auf einen neuen Kontext anzuwenden und es dadurch nachhaltig im Langzeitgedächtnis zu festigen. Dafür stehen bei jeder Station eins bis zwei Aufgaben zur Verfügung. Da deren Bearbeitung oft nicht mehr im zeitlichen Rahmen des Schülerlabors möglich ist und sie nicht zwingend notwendig sind, um den Lernprozess abzuschließen, wurden sie als Zusatzaufgaben formuliert. Sie bilden meistens einen Übergang von der Naturwissenschaft zur Gesellschaftswissenschaft. Aufgrund der veränderten Umsetzung des Lehr-Lern-Modells im Schülerlabor wird bei dieser Phase im Folgenden von Phase 4 gesprochen.

3.5. Kriterien kompetenzorientierter Lernaufgaben

Nachdem die didaktische Grundstruktur der einzelnen Stationen beschrieben wurden, wird jetzt genauer auf die einzelnen Lernaufgaben eingegangen. Damit es sich bei den Lernaufgaben um Aufgaben handelt, welche die Kompetenzen der Schüler*innen erweitern und diese kognitiv aktivieren, wurde eine Reihe von Gütekriterien bei der Konzeption berücksichtigt (vgl. DGFG 2014: 30f.; COLDITZ et al. 2007: 14ff.):

1. Konfrontation der Schüler*innen mit einer Frage- bzw. Problemstellung:

Zu Beginn jeder Station steht eine Frage- bzw. Problemstellung, die zum Teil erst durch unterschiedliche Aufgaben entwickelt werden muss. Mit den Erkenntnissen und Kompetenzen, die bei der Bearbeitung der Station erworben wurden, kann am Ende der Station die Fragestellung beantwortet werden. Eine solche Fragestellung schafft einen Anreiz die Station zu bearbeiten und dient vor allem dazu, bei den Schülerinnen und Schülern zu Beginn Interesse und Motivation zu schaffen, die Station zu bearbeiten. Die Fragestellungen sind zudem gezielt in den Kontext des Schülerlabors eingebunden.

2. Verwendung unterschiedlicher Aufgabentypen

Bei dem Schülerlabor wurde darauf geachtet, dass alle drei Aufgabentypen (geschlossen, halb-offen und offen) verwendet werden. Eine offene Aufgabe unterscheidet sich von einer geschlossenen Aufgabe durch die Tatsache, dass den Schüler*innen die Lösungselemente nicht bekannt sind und es keinen klar definierten Lösungsweg gibt. Bei der halboffenen Aufgabe gibt es dagegen eine klar definierte Lösung, aber es erfolgt ebenfalls keine Vorgabe der

Lösungselemente. Die in den verschiedenen Lernphasen verwendeten Aufgabentypen, sind meistens halbgeschlossene Aufgaben und geschlossene Aufgaben. Diese beiden Aufgabentypen eignen sich sehr gut für das Konzept des Escape-Room, da die richtige Antwort vorher festgelegt ist. Auf diese Weise kann die Lösung genutzt werden, um zur nächsten Aufgabe weiterzuleiten. Der Nachteil ist vor allem bei den geschlossenen Aufgabentypen, dass eine hohe Ratewahrscheinlichkeit vorhanden ist und die Selbständigkeit der Schüler*innen eingeschränkt wird. Nur für die Haupt- und Zusatzaufgaben wurden meistens offene Aufgaben verwendet, wodurch es eine Vielzahl an möglichen Lösungen gibt. Diese Lösungen werden an die Assistent*innen weitergeleitet und in der Abschlussphase besprochen. Der offene Aufgabentyp ist besonders wichtig zur Förderung von Sprach- und Beurteilungskompetenzen (vgl. HIEBER 2011: 18).

3. Vorwissen der Schüler*innen und dessen Aktivierung

Aufgaben, die bereits in der Schule erlernte Inhalte als „neues Wissen“ vermitteln sollen, aktivieren die Schüler*innen nicht kognitiv und sorgen sogar für Demotivation. Genauso verhält es sich mit Aufgaben, die auf Vorwissen aufbauen, welches die Schüler*innen noch nicht in der Schule behandelt haben. Aus diesem Grund orientiert sich die Entwicklung der Stationen stark an den rheinland-pfälzischen Lehrplänen, damit die Schüler*innen so wenig wie möglich über- bzw. unterfordert werden (vgl. MBWWK 2014; MBWWK 2016). Da aber auch Schulklassen aus anderen Bundesländern das Schülerlabor besuchen und man nicht allgemein davon ausgehen kann, dass die Schüler*innen alle Inhalte des Lehrplans bereits beherrschen, gibt es bei fast jeder Aufgabe Hilfestellungen, die diese Schüler*innen beim Lösen der Aufgaben unterstützen.

4. Verwendung von drei Anforderungsbereichen

Bei den Aufgaben des Schülerlabors wurde versucht, alle drei Anforderungsbereiche in jeder Station zu berücksichtigen. Dies wurde auch bis auf Station 2 und 3 bei jeder Station umgesetzt. Unter den drei Anforderungsbereichen versteht man Folgende (KMK 2004: 13):

- Anforderungsbereich 1 (Reproduktion) bezieht sich auf Wiedergeben und Beschreiben von Fachinhalten und das reproduktive Benutzen von Arbeitstechniken.
- Anforderungsbereich 2 (Transfer) umfasst die selbständige Erarbeitung von Fachinhalten und das Anwenden von erlernten Kompetenzen auf neue Kontexte.
- Anforderungsbereich 3 (Reflexion und Problemlösung) bezieht sich auf eine Reflexion von neuen Problemstellungen, Methoden und Erkenntnissen, um auf diese Weise zu neuen Deutungen, Beurteilungen und Handlungsoptionen zu gelangen.

5. Verwendung von Operatoren

Bei den Lernaufgaben wurde auf W-Fragen verzichtet und stattdessen, die dem Anforderungsbereich entsprechenden, Operatoren verwendet. Operatoren sind Verben, die eine Handlung initiieren, und damit die Anforderungen an die Schüler*innen beim Bearbeiten der Aufgabe festlegen (ZSL Baden- Württemberg o.J.).

6. Bezug des Inhaltes auf einen Kontext und auf die Lebenswelt der Schüler*innen

Der Kontext wird im Schülerlabor durch die Geschichte des verlassenen Forschungslabor gegeben und bei allen Stationen aufgegriffen (siehe Abschnitt 3.2.). Zusätzlich wurden bei den Stationen bewusst reale Orte betrachtet, wie beispielsweise das Great Barrier Reef bei der Ozeanversauerung, die als Kontexte dienen, um daran die Sachverhalte zu erarbeiten. Ein direkter Bezug zum Alltag der Schüler*innen gestaltete sich für das Schülerlabor teilweise als schwierig, da die Prozesse des Klimawandels sich über lange Zeiträume und selten im direkten Umfeld der Schüler*innen vollziehen.

7. Ansprechen von unterschiedlichen Kompetenzen

Ziel des naturwissenschaftlichen Lernens ist es, dass die Schüler*innen die Fähigkeiten erlernen, sich selbständig neues Wissen anzueignen, Methoden anzuwenden, Probleme zu lösen und Fachinhalte zu bewerten und zu reflektieren. Deshalb ist es wichtig, unterschiedliche naturwissenschaftliche Kompetenzen zu fördern. Im Schülerlabor wurden nach den Bildungsstandards der Physik folgende Kompetenzen berücksichtigt: Fachwissen anwenden, Methoden/Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und Bewerten/Beurteilen (vgl. DFG 2004: 7ff.; MBWWK 2010: 9ff.).

8. Anteile an kooperativem Lernen

Die Stationen wurden alle so konzipiert, dass sie in Kleingruppen von zwei bis fünf Personen bearbeitet werden sollen, wodurch ein Raum für kooperatives Lernen geschaffen wird. Auf diese Weise wird bei den Schülerinnen und Schülern nicht nur die Teamfähigkeit gefördert, sondern unter anderem auch Kommunikationskompetenz, Selbstmanagement, Konfliktfähigkeit und Entscheidungsfähigkeit (WODZINSKI 2004: 5).

9. Basiskonzepte

Um Wissen systematisch und kumulativ aufzubauen, wird in der naturwissenschaftlichen Schulbildung mit Basiskonzepten gearbeitet. Da das Schülerlabor interdisziplinär gestaltet ist,

wurden bei der Konzeption die Basiskonzepte für den naturwissenschaftlichen Unterricht verwendet (vgl. MBWWK 2010: 12f.). Darunter fallen folgende Basiskonzepte:

- System
- Struktur-Eigenschaft-Funktion
- Stoff-Teilchen-Materie
- Chemische Reaktionen
- Wechselwirkung
- Energie
- Entwicklung

10. Progressive Arbeitsmaterialgestaltung

Bei den Aufgaben wurde bei jeder Station darauf geachtet, dass die Aufgaben aufeinander aufbauen. Das heißt, sie stehen miteinander in einem Gesamtzusammenhang und steigern langsam ihr Schwierigkeitsniveau und ihren Anforderungsbereich. Auf diese Weise wird eine Überforderung der Schüler*innen, durch zu anspruchsvolle Aufgaben zu Beginn der Station und die daraus resultierende Demotivation minimiert.

11. Didaktische Reduktion

Die komplexe Theorie der Klimaphysik wurde durch Reduktion und Vereinfachung altersgemäß für die Schüler*innen aufbereitet. Auf diese Weise wird der Klimawandel überschaubar und begreifbar gemacht (ARNOLD o.J.). Die Umsetzung der didaktischen Reduktion an den einzelnen Stationen wird in den Abschnitten „didaktische und methodische Analyse“ der jeweiligen Station genauer beschrieben.

Wie diese Kriterien bei den einzelnen Stationen umgesetzt wurden, wird in den nächsten Kapiteln genauer diskutiert.

3.6. Lernstile und Binnendifferenzierung

Ein weiterer zentraler Aspekt, der bei der Konzeption des Schülerlabors berücksichtigt wurde, ist die Tatsache, dass die Schüler*innen einer Lerngruppe in ihrer Leistungsfähigkeit, in ihrer Begabung und in ihrer Art und Weise zu lernen sehr heterogen sind (vgl. UHLENWINKEL 2008: 4ff.; BAHR 2013: 4ff.). Dies betrifft auch die Lerngruppen, die das Schülerlabor besuchen. Diese weisen aufgrund der vielen

Einflussparameter wie Schulform, Fachlehrer, Klassenstufe, Region und Bundesland einen unterschiedlichen Kompetenz- und Wissensstand auf.

Dies wurde erstens dadurch berücksichtigt, dass versucht wurde, bei jeder Station unterschiedliche Lernstile anzusprechen. Der Lernstil bezeichnet die Art und Weise, wie das Gehirn neue Informationen am leichtesten aufnehmen und gedanklich verarbeiten kann (UHLENWINKEL 2008: 5). Nach UHLENWINKEL gibt es vier unterschiedliche Arten von Lernstilen (ebd.):

1. Die verbal-sprachlichen Lerner lernen am besten durch Lesen, Schreiben und Erklären. Diese werden im Schülerlabor durch Sachtexte, das Schreiben von Texten oder das Aufnehmen eines Erklärvideos gefördert.
2. Die logisch-mathematischen Lerner sind gut im logischen Denken und erkennen schnell Muster und Beziehungen. Dies wird im Schülerlabor durch die Arbeit mit Diagrammen und einfachen Rechnungen, wie beispielsweise dem Anstieg des Meeresspiegels, gefördert.
3. Die visuell-räumlichen Lerner sind sehr kreativ und arbeiten gerne mit Bildern und Filmen. Zudem verfügen sie über ein ausgeprägtes räumliches Orientierungsvermögen. Neben der Verwendung von zahlreichen Bildern und Grafiken wurden für das Schülerlabor Erklärvideos aufgenommen, die den Sachverhalt anschaulich vermitteln.
4. Die physisch-kinästhetischen Lerner mögen es sich zu bewegen. Sie lernen am besten mit Experimenten, Modellen und Rollenspielen. Auch für diese Lerner bietet das Schülerlabor eine vielfältige Auswahl, wie zahlreiche Modellversuche, Spiele und interaktive Visualisierungsmodelle.

Zweitens wurde bei jeder Station auf eine Binnendifferenzierung geachtet. Eine Binnendifferenzierung kann auf verschiedene Art und Weise umgesetzt werden (vgl. BAHR 2013: 5): Zum einen findet eine Differenzierung durch Unterstützung statt. Unterhalb fast jeder Lernaufgabe gibt es die Möglichkeit, einen oder mehrere Tipps auszuwählen. Auf diese Weise werden lernschwächere Schüler*innen weniger überfordert und können selbständig die Lösung zur Aufgabe finden. Zum anderen findet eine Differenzierung nach der Quantität der Aufgaben statt. Für die schnellen, leistungsstärkeren Schüler*innen stehen an jeder Station Zusatzaufgaben zur Verfügung. Dagegen wurden für die langsameren, leistungsschwächeren Schüler*innen „Überspringerseiten“ eingebaut. Diese Seiten ermöglichen es den Schüler*innen einzelne Lernaufgaben, die weniger relevant für den Lernprozess sind, zu überspringen. So haben auch diese Schüler*innen die Möglichkeit, die Hauptaufgabe zu bearbeiten und die

Dr. Menzel:

Zeigt euer Timer weniger als 30 Minuten an?

Ja

Nein

Abb. 23: „Überspringerseite“

Station erfolgreich abzuschließen. Das wirkt sich wiederum positiv auf die Motivation der Schüler*innen aus. Abbildung 23 zeigt eine solche Seite. Je nachdem, wie viel Zeitdeputat diese noch besitzen, werden sie zu einer anderen Seite weitergeleitet, ohne dass sie es direkt mitbekommen.

4. Konzeption der Stationen

Bis jetzt wurde grob der allgemeine Aufbau des Schülerlabors aus didaktischer Sicht beschrieben. Es wurde versucht, diese Vorgaben bei den einzelnen Stationen umzusetzen, worauf in den nachfolgenden Abschnitten genauer eingegangen wird.

4.1. Einstiegsphase

Bevor die Schüler*innen mit der Bearbeitung der Stationen beginnen, gibt es eine dreißigminütige Einstiegsphase. Diese besteht aus der Begrüßung, einem Einstiegsvortrag, einem Video zum Escape-Room-Szenario und der Gruppeneinteilung. Der Einstiegsvortrag soll den Schüler*innen zu Beginn erst einmal einen Überblick über das Schülerlabor verschaffen. Die einzelnen Folien des Vortrages sind dem Anhang zu entnehmen (siehe Anhang V.III.). Der Vortrag greift folgende inhaltlichen Themen auf:

- kurze Erläuterung zu Besonderheiten und der Entstehungsgeschichte des Schülerlabors
- die Rolle des Klimawandels in der Gesellschaft und damit Legitimierung der Wichtigkeit des Themas
- Aktivierung des Vorwissens der Schüler*innen zu den Grundlagen von Klima und Klimawandel
- kurze Vorstellung der Stationen
- technische Hinweise
- Sicherheitsbelehrung

Die Aktivierung des Vorwissens der Schüler*innen dient dazu, dass sich diese am Vortrag beteiligen sollen und dadurch aufmerksamer zuhören. Des Weiteren können die Assistent*innen einen Überblick davon bekommen, welches Vorwissen die Schüler*innen bereits besitzen. Hierfür werden vier Fragen gestellt: „Was ist Wetter? Was ist Klima?“, „Könnt ihr Ursachen für den menschengemachten Klimawandel nennen?“ und „Könnt ihr Folgen des menschengemachten Klimawandels nennen?“. Auf der nächsten Folienseite befinden sich dann die möglichen Antworten.

Bei der kurzen Vorstellung der Stationen werden diese nur grob beschrieben und mit ihrem fiktiven Abteilungsnamen aus dem Escape-Room-Szenario vorgestellt. Dabei ist wichtig, dass man an dieser Stelle keine Informationen vorwegnimmt. Bei Station 5 beispielsweise erforschen die Schüler*innen den Einfluss von CO₂ auf das Ozeanwasser, weshalb die Station „Abteilung für Ozeanwasserchemie“ heißt. Der Begriff „Ozeanversauerung“ wird dabei bewusst vermieden, da die Schüler*innen erst während der Durchführung erarbeiten, dass der Ozean versauert. Bei den technischen Hinweisen wird der

Umgang mit dem iPad erläutert. Dies beinhaltet, unter anderem, wie man einen QR-Code scannt oder eine Datei per AirDrop verschickt.

Nach dem Vortrag startet das Escape-Room-Szenario mit einem Video, das den Leiter der Forschungseinrichtung zeigt. Dieser nimmt das Video für die Nachwuchswissenschaftler*innen auf, kurz bevor die Klimawandel-Leugner den Raum stürmen. Dabei wird die Hintergrundgeschichte erzählt, die bereits in Abschnitt 3.2 beschrieben wurde. Danach teilen sich die Schüler*innen in ihre Kleingruppen auf und begeben sich zu den Stationen.

4.2. Station 1: Albedo

Die erste Station trägt den Titel „Überwachungszentrale für Wetterstationen“. Sie beschäftigt sich mit der Albedo und ihrem Einfluss auf den Klimawandel. Abbildung 24 zeigt den Aufbau der Station mit dem Versuch und den Elementen des Escape Rooms. Um eine adäquate fachliche und didaktische Herangehensweise erarbeiten zu können, mussten vorweg die zugrundeliegenden Lernziele definiert werden.



Abb. 24: Aufbau Station 1 (eigene Aufnahme)

4.2.1. Lernziele

Der angestrebte Lernzugewinn der Station wurde mit folgenden Grob- und Feinlernzielen definiert. Das Groblernziel ist den Lernaufgaben der gesamten Station übergeordnet. Die Feinlernziele sind die Teilziele der einzelnen Phasen (vgl. Kircher 2019: 91f.). Hinter jedem Lernziel befindet sich in Klammern der entsprechende Anforderungsbereich (AFB). Eine Erklärung der einzelnen Anforderungsbereiche befindet sich in Abschnitt 3.5.

Groblernziel:

Die Schüler*innen können den Einfluss der Albedo auf den Klimawandel beurteilen (AFB 3).

Feinlernziele:

Die Schüler*innen können ...

... unterschiedlichen Modelllandschaften einen realen Landschaftstyp zuordnen (AFB 1).

... können mithilfe der Werte für die durchschnittliche einfallende und reflektierte Strahlung die terrestrische Albedo berechnen (AFB 2).

... unterschiedliche Landschaften mithilfe von Bildern in einer Reihenfolge von hoher bis niedriger Albedo bzw. von hoher bis niedriger Oberflächentemperatur anordnen (AFB 2).

... mithilfe von zwei Luxmetern die Lichtstärke messen und die Albedo einer Modelllandschaft berechnen (AFB 2).

... mithilfe einer Wärmebildkamera die Oberflächentemperatur unterschiedlicher Modelllandschaften messen (AFB 2).

... einen Zusammenhang zwischen Oberflächenfarbe und Albedo bzw. zwischen Oberflächentemperatur und Albedo vermuten und diesen mithilfe einer Messung überprüfen (AFB 2).

... unterschiedlichen Landschaftstypen ihren Flächenanteil auf der Erdoberfläche mithilfe einer Weltkarte zuordnen (AFB 2)

... den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur aufgrund einer kompletten Eisschmelze und Rodung der Wälder mithilfe eines Programmes bestimmen (AFB 2).

... in einem kurzen Bericht die Auswirkungen, welche die Veränderung der Landschaft auf die globale Albedo und den globalen Klimawandel haben kann, beurteilen (AFB 3).

Zusatzaufgaben

Die Schüler*innen können ...

... den Rückkopplungseffekt der Eis-Albedo-Rückkopplung mit eigenen Worten erläutern (AFB 2).

... in der Gruppe diskutieren, wie man ein Modelldorf gestalten muss, damit die Albedo so hoch wie möglich ist (AFB 3).

4.2.2. Fachliche Analyse der Versuche

Zur Umsetzung dieser Lernziele wurde ein Versuch konzipiert. An diesem sollen die Schüler*innen herausarbeiten, dass unterschiedliche Landschaften aufgrund ihrer Oberflächenfarbe die solare Einstrahlung unterschiedlich stark reflektieren und sich daher die Oberflächen unterschiedlich erwärmen (siehe Abschnitt 2.3.3).

Um dies anschaulich am Modellversuch zeigen zu können, wurden vier Dioramen gebaut (siehe Abb. 25). Diese vier Dioramen stellen jeweils einen Landschaftstyp dar. Dabei wurden folgende Landschaften ausgewählt: Eis, Vegetation, Acker und Siedlung.

Grund dafür ist, dass sich diese Landschaften in der Realität aufgrund ihrer dominierenden Oberflächenfarbe stark in ihrer Albedo unterscheiden. Des Weiteren handelt es sich hierbei um zwei Naturlandschaften und zwei Landschaften, die durch den Menschen geschaffen wurden. Die Landschaft wurde so gestaltet, dass jeweils eine Farbe überwiegt. Bei der Konzeption und baulichen Umsetzung der Modelllandschaften wurde bei der Farbwahl darauf geachtet, ein möglichst authentisches optisches Abbild der Natur zu schaffen unter gleichwertiger Berücksichtigung der physikalischen Repräsentativität der im Experiment erhobenen Daten. Dabei wurde versucht andere Farben in den Modellen so gering wie möglich zu halten, da diese eine andere Albedo aufweisen und deshalb einen Messfehler bewirken können. Lediglich die Autos in



Abb. 25: Modelllandschaften
(eigene Aufnahme)

der Siedlungslandschaft oder der Traktor bei der Ackerlandschaft weisen eine andere Farbe auf.

Für die Messung und Bestimmung der Albedo der Landschaften wird ein „Albedometer“, bestehend aus zwei Luxmetern, verwendet (siehe Abb. 26). Für die bessere Handhabung wurden die beiden Luxmeter miteinander verbunden. Dafür wurde die Elektronik verlängert und eine Kabelführung mithilfe des 3D-Druckers gedruckt. Deshalb sind auch die beiden Sensoren fest ausgerichtet. Mithilfe eines Luxmeters lässt sich die Beleuchtungsstärke messen, die durch die Einheit Lux definiert wird. Bei der Beleuchtungsstärke handelt es sich um den einfallenden Lichtstrom pro beleuchtete Fläche. Um die Albedo bestimmen zu können, misst ein Sensor eines Luxmeters in Richtung der einfallenden Strahlung und der andere Sensor in Richtung der reflektierten Strahlung (siehe Abb. 26). Da es sich bei der Albedo um das Verhältnis zwischen einfallender und reflektierter Strahlung handelt, kann diese einfach mithilfe folgender Formel bestimmt werden:

$$\text{Albedo [\%]} = \frac{\text{reflektierte Sonnenstrahlung}}{\text{einfallende Sonnenstrahlung}} \cdot 100$$

Ein weiteres Element des Versuchs sind die vier Halogenleuchten und deren Halterung (siehe Abb. 27). Die Halterung wurde so konzipiert, dass sich über jeder Modelllandschaft mittig eine baugleiche 150 Watt Halogenleuchte befindet. So wird sichergestellt, dass die einfallende Strahlung bei jeder Landschaft die gleiche Beleuchtungsstärke und den gleichen Wellenlängenbereich ausweist. Zudem wurde an die Lampenhalterung eine Befestigung für das Albedometer montiert, damit immer auf einer festen Höhe gemessen wird. Diese Halterung ist um 360° drehbar, sodass über jeder Kiste gemessen werden kann. Tabelle 6 zeigt Messwerte, die bei der Albedomessung der unterschiedlichen Dioramen bei einer Höhe des Messgerätes von 27 cm aufgenommen wurden:

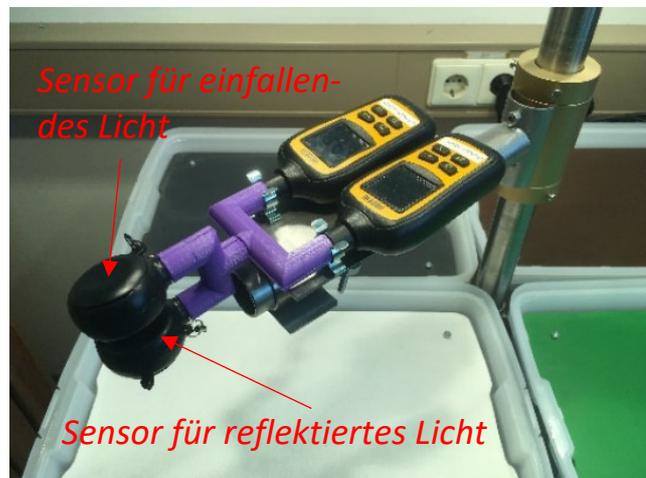


Abb. 26: Albedometer bestehend aus zwei Luxmetern (eigene Aufnahme)



Abb. 27: Versuch „Albedo“ mit Lampenhalterung (eigene Aufnahme)

Tab. 6: Probemessungen der Albedo der vier Modelllandschaften (Messhöhe 27 cm)

Landschaft	Siedlung	Acker	Vegetation	Eis
Messung 1	10	9	12	35
Messung 2	9	10	11	34
Messung 3	8	11	12	33
Messung 4	8	10	12	35
Messung 5	7	11	14	35
Messung 6	8	15	15	29
Messung 7	10	11	18	36
Messung 8	8	8	10	35
Messung 9	11	9	10	37
Messung 10	9	10	12	42
Mittelwert	$8,8 \pm 1,2$	$10,4 \pm 1,8$	$12,6 \pm 2,3$	$35,1 \pm 3,1$

Vergleicht man die Messwerte aus Tab. 6 mit den realen Albedowerten aus Tab. 2 fällt auf, dass die Messwerte im Rahmen der Messungenauigkeiten eine gute Näherung an die Literaturwerte darstellen. Die Abfolge in der Größenordnung der Albedowerte konnte naturgetreu nachgestellt werden.

Bei der Messung treten zahlreiche Messfehler auf, woraus die Streuung der Werte resultiert. Der größte Einfluss auf die Messung entsteht dadurch, dass nicht immer genau an der gleichen Stelle über den Kästen gemessen wurde. Die Messhöhe ist dagegen fest und nimmt deshalb keinen Einfluss auf die Messung. Ein weiterer Fehler kommt durch Streulicht der Deckenlampen und durch Sonnenlicht, das durch die Fenster in den Raum scheint, zustande. Auch die vier Leuchten können leichte Unterschiede in Helligkeit und Position aufweisen, was zu einem Messfehler führt. Nicht zu vergessen ist, dass die Werte auf dem Messgerät schwanken. Diese Schwankungen sind aber sehr gering, weshalb sie auf den Albedowert einen Fehler von weniger als 1 Prozent verursachen. Ein weiterer Messfehler bildet schließlich die Oberflächenstruktur und -beschaffenheit, die bei jeder Landschaft unterschiedlich ist und zudem davon ausgegangen wird, dass man nicht bei jeder Messung genau über der gleichen Stelle misst.

Um zu zeigen, dass auch die Farbe der Oberfläche relevant ist, wurden in den Deckeln der vier Kästen Holzbretter mit unterschiedlichen Farben (weiß, grün, braun und grau) angebracht. Diese Farben entsprechen den jeweiligen Farben der Modelllandschaften. Auch hier kann mithilfe des Albedometers die Albedo bestimmt werden. Tabelle 7 zeigt Messwerte, die bei der Albedomessung der Holzoberflächen bei einer Höhe des Messgerätes von 14 cm aufgenommen wurden.

Tab. 7: Probemessungen der Albedo der vier Holzoberflächen (Messhöhe 14 cm)

Landschaft	Grau	Braun	Grün	Weiß
Messung 1	9	10	15	36
Messung 2	11	9	15	31
Messung 3	12	11	10	40
Messung 4	8	9	10	30
Messung 5	9	11	13	30
Messung 6	9	8	14	31
Messung 7	13	13	8	40
Messung 8	11	9	11	38
Messung 9	9	9	15	39
Messung 10	8	13	13	33
Mittelwert	9,9 ± 1,6	10,2 ± 1,7	12,4 ± 2,4	34,8 ± 4,0

Vergleicht man die Messwerte aus Tab. 7 mit der vorherigen Messung (siehe Tab. 6), fällt auf, dass sie im Rahmen des Fehlers übereinstimmen. Mit diesen Messungen konnte der Einfluss der Oberflächenfarbe auf das Reflexionsverhalten der Strahlung demonstriert werden. Im nächsten Schritt soll gezeigt werden, dass sich aufgrund der Energieerhaltung die unterschiedlichen Landschaften verschieden stark erwärmen. Das heißt, je mehr Strahlung die Landschaft absorbiert, desto höher ist ihre Temperatur. Um dies anschaulich zu zeigen, wird eine Infrarotkamera verwendet, welche die von den Landschaften emittierte Infrarotstrahlung registriert, analysiert und mithilfe der in der Theorie beschriebenen Strahlungsgesetze (siehe Abschnitt 2.2), die Temperatur der Oberfläche bestimmt. Bei dem Versuch dient eine Infrarotkamera von Seek thermal als Messgerät, die an die Lampenhalterung montiert werden kann (siehe Abb. 28). Auf diese Weise wird ebenfalls für eine einheitliche Höhe gesorgt. Tabelle 8 zeigt eine Probemessung der Oberflächentemperatur mit der Infrarotkamera in einer Höhe von 27 cm über den Dioramen.



Abb. 28: Wärmebildkamera (eigene Aufnahme)

Tab. 8: Probemessungen der Oberflächentemperatur der vier Dioramen (Messhöhe 14 cm)

Landschaft	Siedlung	Acker	Vegetation	Eis
Messung 1	28	27	26	24
Messung 2	28	27	24	23
Messung 3	28	27	26	23
Messung 4	27	26	24	24
Messung 5	28	28	26	23
Messung 6	29	27	26	24
Messung 7	27	27	26	25
Messung 8	26	28	26	23
Messung 9	29	28	25	24
Messung 10	28	27	26	24
Mittelwert	27,8 ± 0,9	27,2 ± 0,6	25,5 ± 0,8	23,7 ± 0,6

Um bei der Temperaturmessung (siehe Tab. 8) den Messfehler durch Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit zu reduzieren, wurde bei den Kästen sowie den Deckeln Holz als einheitliches Baumaterial verwendet. Die Bäume, die in der Modelllandschaft verbaut wurden, bestehen dagegen aus einem anderen Material, was eine stärkere Erwärmung zur Folge hat. An dieser Stelle müssen die Schüler*innen darauf hingewiesen werden, die Temperatur am Boden zu messen. Die Schwankungen zwischen den Messwerten können durch leichte Unterschiede in Helligkeit und Position der Leuchten sowie durch unterschiedliche Beleuchtungszeiten, wenn sich noch kein Temperaturgleichgewicht eingestellt hat, entstehen. Trotz der Messunsicherheiten können mit diesem Versuchsausbau die angestrebten Lernziele erreicht werden.

4.2.3. Didaktische und methodische Analyse

Damit dem konzipierten Versuch ein Bildungsgehalt abgewonnen werden kann, muss dieser in eine kontextorientierte Lernumgebung eingebettet werden. Die Lernumgebung besteht aus verschiedenen Lernaufgaben, denen eine didaktischen und methodischen Basis zugrunde liegt. Diese wird im Folgenden näher erläutert:

A. Vorwissen der Schüler*innen

Im Rahmen dieser Lernaufgaben wird ein Vorwissen aus dem Themenbereich 2 „Optische Phänomene an Grenzflächen“ des rheinland-pfälzischen Lehrplans benötigt. Das bedeutet, dass die Schüler*innen die Bedeutung der Begriffe „Absorption“, „Reflexion“ und „Emission“ kennen sollten (MBWWK 2014: 104ff.). Ein weiterer Aspekt, der für diese Station relevant ist, ist die Energieerhaltung. Die Schüler*innen sollten wissen, dass aus der Energieerhaltung hervorgeht, dass je weniger Strahlung reflektiert wird, umso mehr Strahlung absorbiert und in die Energieform Wärme umgewandelt wird. Neben physikalischen Kenntnissen sind bei dieser Station auch mathematische Kenntnisse erforderlich. Die Schüler*innen sollten in der Lage sein, mithilfe von gegebenen Werten eine Formel zu berechnen. Das betrifft die Berechnung der Albedowerte.

B. Lernschritte nach dem Lehr-Lern-Modell

Basierend auf dem erwarteten Vorwissen der Schüler*innen wurde die Station nach dem Lehr-Lern-Modell in folgende Lernphasen gegliedert. Eine Erläuterung der einzelnen Lernphasen wurde in Abschnitt 3.4. dargelegt.

Phase 1: Im Lernkontext ankommen

In dieser ersten Phase geht es um die Entwicklung einer problemorientierten Fragestellung. Dafür sollen die Schüler*innen die Temperaturkurven verschiedener fiktiver Wetterstationen, die global verteilt sind, miteinander vergleichen und die drei Stationen ausfindig machen, die eine Auffälligkeit zeigen. Die Auffälligkeit ist in diesem Fall ein verstärkter Temperaturanstieg, der bei den Stationen Nova Dimensao (Brasilien), Daneborg (Grönland) und Huai'an (China) zu erkennen ist. Im nächsten Schritt sollen die Schüler*innen zwei Satellitenbilder von den Wetterstationen miteinander vergleichen. Ein Bild zeigt die Wetterstation vor dem starken Temperaturanstieg und das andere Bild zeigt sie während des starken Temperaturanstiegs (siehe Abb. 29). Dabei ist in Brasilien eine Abholzung, in Grönland das Schmelzen der Gletscher und in China der Bau eines Industriegebietes zu erkennen. Daraus lässt sich die Fragestellung der Station ableiten: In welchem Zusammenhang stehen die Veränderungen der Landschaften und der Temperaturanstieg?

Station 2: Nova Dimensao (Brasilien)

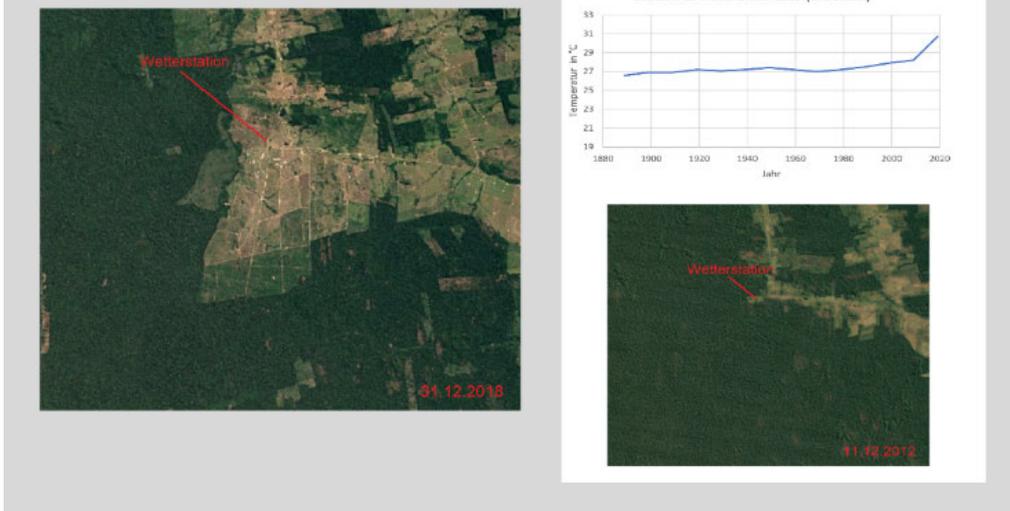


Abb. 29: Beispielaufgabe Wetterstation Nova Dimensao (Brasilien)
(eigene Darstellung, Satellitenbilder Google Maps)

Phase 2: Vorwissen aktivieren und Vorstellungen entwickeln

Damit die Lernaufgaben und letztendlich die problemorientierte Fragestellung gelöst werden kann, ist es wichtig, dass dafür benötigte Vorwissen aus Abschnitt A zu aktivieren. Dies geschieht, indem die Schüler*innen den Begriffen „Reflexion“, „Emission“ und „Absorption“ die richtige Definition zuordnen. Nachdem das Vorwissen aktiviert wurde geht es im nächsten Schritt um die Modellbildung, d.h. den Transfer vom Real- in den Modellraum. Hierfür gibt es fünf Bilder (jeweils ein Bild von jeder Modelllandschaft und ein Bild von den Lampen), denen jeweils ein Begriffskärtchen zugeordnet werden muss, auf dem ein realer Landschaftstyp bzw. der Begriff „Sonne“ steht (siehe Abb. 30). Dann folgt ein kurzes Inputvideo zum Thema „Albedo“. In diesem Video wird kurz der Begriff „ α “ die Formel zur Berechnung der und die Einflussfaktoren auf die Albedo erklärt. Dabei wird die Oberflächenfarbe als Einflussfaktor bewusst nicht genannt, da diese Erkenntnis durch das experimentelle Vorgehen der Lernenden erworben werden soll. Im Anschluss an diesen Film sollen die Schüler*innen eine Rechenaufgabe bearbeiten, in der sie die durchschnittliche globale Albedo berechnen. Diese Aufgabe

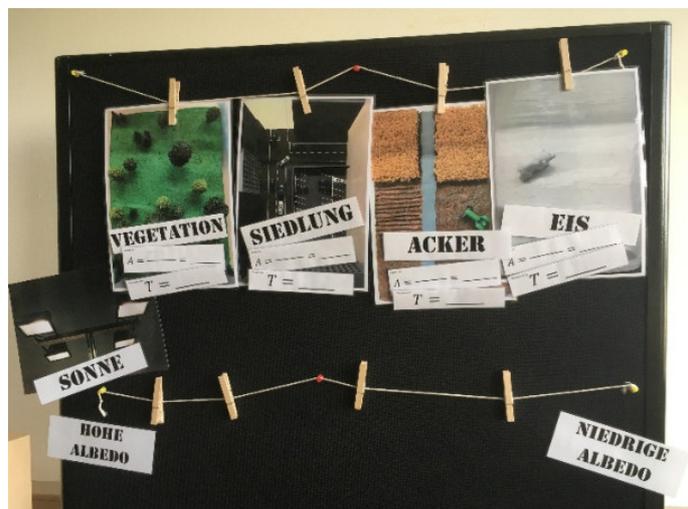


Abb. 30: Bilder der vier Landschaften mit zugeordnetem Begriffskärtchen (eigene Aufnahme)

dient in erster Linie dazu, die Schüler*innen mit der Berechnung der Albedo vertraut zu machen. Da es zu dieser Aufgabe einen konkreten Wert als Lösung gibt, kann man direkt sehen, ob die Schüler*innen die Aufgabe korrekt gerechnet haben. Das korrekte Bestimmen der Albedo ist vor allem für die nächste Phase relevant, in der die Albedo der Modelllandschaften bestimmt werden muss. Hierfür gibt es keine konkrete Lösung, mit der die Schüler*innen überprüfen können, ob ihre Berechnung korrekt war. Der Abschluss dieser Phase bildet das Aufstellen einer Vermutung zur Albedo der Landschaften. Dafür sollen die Modelllandschaften nach ihrer Albedo sortiert werden.

Phase 3: Lernprodukt erstellen

Auf Grundlage der zuvor entwickelten Vorstellungen wird in dieser Phase ein Lernprodukt erarbeitet. Zu Beginn wird die Albedo der vier Modelllandschaften mithilfe des Albedometers gemessen. Danach soll die Reihenfolge der Bilder auf ihre Korrektheit überprüft werden. Das Ziel hierbei ist es, dass die Schüler*innen die Oberflächenfarbe als Einflussfaktor auf die Albedo herausarbeiten. Um dies unabhängig von der Oberflächenstruktur zu überprüfen, wird die gleiche Versuchsdurchführung nochmal an verschieden farbigen Holzplatten wiederholt (siehe Abschnitt 4.2.2.). Auf diese Weise kann die Vermutung bestätigt werden, dass die Oberflächenfarbe die Albedo beeinflusst. Im Anschluss sollen die Schüler*innen den Versuch interpretieren, indem sie die Aussage, dass je heller der Farbton ist, desto größer die Albedo, ergänzen. Im nächsten Schritt wird der Zusammenhang zwischen Albedo und Temperaturerhöhung erarbeitet. Hierfür sollen die Schüler*innen eine Vermutung aufstellen, indem sie die Bilder der Landschaften in der Reihenfolge von niedriger bis hoher Temperatur anordnen. Diese Vermutung soll im Anschluss mit der Wärmebildkamera überprüft werden. Nach dieser letzten Messung sollen die Schüler*innen verschiedene Aussagen ergänzen. Die Schlussfolgerung hieraus ist, dass je kleiner die Albedo ist, desto mehr Licht reflektiert und in Wärmeenergie umgewandelt wurde.

Die aus der Versuchsdurchführung neu gewonnenen Erkenntnisse werden nach rückführendem Transfer in den Realraum diskutiert. In der ersten Aufgabe wird dargestellt, welchen Anteil die verschiedenen Landschaften in der Realität entsprechen. Die Schüler*innen sollen den verschiedenen Landschaftstypen einen Prozentwert zuordnen. Dabei finden sie heraus, dass die Vegetationsfläche und die Eisfläche einen deutlich größeren Flächenanteil auf der Erde einnehmen als die Acker- und Siedlungsfläche. Bei der nächsten Aufgabe soll mithilfe eines Simulationsprogramms berechnet werden, wie sich die globale Durchschnittstemperatur verändert, wenn das Eis komplett schmelzen und alle Wälder gerodet würden. Die Schüler*innen können den Prozentwert der Landschaftsflächen verändern und das Programm berechnet die neue durchschnittliche Albedo und die Durchschnittstemperatur. Für die Berechnung wurde folgende Formel genutzt (KONZ 2019: 22):

$$T_{Erde} = \frac{(1 - \alpha) S_0}{4\sigma(1 - \beta)}$$

In dieser Formel ist T_{Erde} : Oberflächentemperatur der Erde, α : planetarische Albedo (wird variiert), S_0 : Solarkonstante, σ : Stefan-Boltzmann-Konstante und $\beta = 0,39$: Treibhausfaktor. Der Treibhausfaktor β kann bestimmt werden, wenn die Gleichung nach ihm umgestellt und die momentane durchschnittliche Oberflächentemperatur der Erde in die Formel eingesetzt wird.

Im letzten Schritt dieser Phase wird das Lernprodukt zur Sicherung der Station erstellt. Dieses ist ein von den Schülerinnen und Schülern verfasster Bericht für die Klimakonferenz. Bei dem Bericht sollen die Schüler*innen das Erlernte der Station gedanklich reflektieren und anknüpfend an die Problemstellung am Anfang den Einfluss von Landschaftsänderungen auf Albedo und Klimawandel beurteilen. Die Lösung dieser Aufgabe stellt damit eine Antwort auf die problemorientierte Fragestellung der Station dar.

Phase 4: Anwenden und Üben

In der abschließenden Phase gibt es zwei Zusatzaufgaben, in denen das Gelernte auf einen neuen Kontext angewandt wird. Bei der ersten Zusatzaufgabe handelt es sich um den Eis-Albedo-Rückkopplungseffekt, der bereits in Abschnitt 2.3.11. näher erläutert wurde. Die Schüler*innen sollen diesen Rückkopplungseffekt mithilfe eines Wirkungsgefüges erarbeiten. Das bedeutet in diesem Fall, dass fünf Informationskärtchen und fünf Pfeile so angeordnet werden sollen, dass daraus ein Ursache-Wirkungs-Zusammenhang entsteht. Die Schwierigkeit dabei ist, dass das fertige Wirkungsgefüge einen Kreislauf ergeben soll, damit der Rückkopplungseffekt deutlich wird.

Bei der zweiten Zusatzaufgabe handelt es sich um ein Spiel, bei dem die Spieler*innen ihr eigenes Dorf konstruieren sollen (siehe Abb. 31). Hierfür steht ihnen eine grüne Holzplatte zur Verfügung sowie verschiedene Dorfbauteile, wie Felder, Häuser, Straßen und Parkplätze. Die Aufgabe besteht darin, das Dorf so zu gestalten, dass die Albedo möglichst hoch ist. Die Schwierigkeit dabei ist, dass jede*r Schüler*in noch eine zusätzliche Aufgabe hat. Zu diesen Aufgaben zählen, sicherzustellen,



Abb. 31: Dorfbauset, Planspiel zur Albedo (eigene Aufnahme)

dass Ackerflächen, Grünanlagen, Straßen, Wohnhäuser und Industrie vorhanden sind.

Die konkreten Lernaufgaben der unterschiedlichen Phasen sind im Anhang in Abschnitt V.II.I. aufgeführt. Bei deren Konzeption wurden die in Abschnitt 3.5. beschriebenen Kriterien berücksichtigt. Im Folgenden wird der Aufbau der Lernaufgaben dieser Station exemplarisch mit ausgewählten Gütekriterien legitimiert:

C. Lebensweltbezug

Bei dem Versuch wird durch die verschiedenen Modelllandschaften ein Lebensweltbezug hergestellt. Die Ackerlandschaft, die Siedlung und die Vegetation sind typische Landschaften wie sie auch in Deutschland vorkommen. Einige Schüler*innen haben vielleicht sogar die Erfahrung gemacht, dass sie einen asphaltierten Parkplatz wärmer empfanden als beispielsweise eine Wiese. Die Eislandschaft dagegen entspricht nicht ihrer direkten Lebenswelt. Mit einer solchen Landschaft werden sie eher indirekt über Bilder und Filme konfrontiert.

D. Förderung unterschiedlicher Kompetenzen

Diese Station zielt auf die Förderung folgender Kompetenzen der Bildungsstandards der Physik ab (siehe Abschnitt 3.5): Die Kompetenz „Fachwissen anwenden“ wird beispielsweise durch die Aktivierung des Vorwissens gefördert. Mit der Bestimmung der Albedo und Messung der Oberflächentemperatur wird die Methodenkompetenz angesprochen. Die Methode bildet in diesem Fall das Experimentieren. Bei der Hauptaufgabe wird ein weiterer Kompetenzbereich gefördert. Hier sollen die Schüler*innen die Auswirkungen von Landschaftsänderungen beurteilen, wodurch die Beurteilungskompetenz im Fokus steht. Die Kommunikationskompetenz wird allein schon durch die Gruppenarbeit angesprochen. Ein größerer Fokus wird in der Zusatzaufgabe auf diese Kompetenz gelegt. Die Schüler*innen sollen dort ihr eigenes Dorf planen mit einer möglichst hohen Albedo. Dabei nehmen die Schüler*innen verschiedene Rollen ein, wodurch es zu Konflikten bei der Dorfplanung kommen kann, welche die Schüler*innen dann diskursiv lösen sollen.

E. Basiskonzepte

Von denen in Abschnitt 3.5. genannten Basiskonzepten spricht die Station besonders die Basiskonzepte „Energie“ und „Wechselwirkung“ an. Das Basiskonzept „Energie“ ist in Form der Energieerhaltung zu erkennen. Man geht von der Energie der einfallenden Strahlung aus, die zum Teil reflektiert und zum anderen Teil absorbiert wird. Während der reflektierte Teil wieder in Richtung Lampen geht,

wird der absorbierte Teil in Wärmeenergie umgewandelt. Das Basiskonzept „Wechselwirkung“ findet Anwendung durch die Absorption und Reflexion der Lichtstrahlen. An dieser Stelle wechselwirkt die Strahlung mit der Materie und sorgt für eine Änderung der Oberflächentemperatur.

F. Didaktische Reduktion

Eine didaktische Reduktion dient der altersgemäßen Aufbereitung der Lerninhalte (siehe Abschnitt 3.5.). Die Begrenzung auf die Oberflächenfarbe als Einflussfaktor auf die Albedo stellt beispielsweise eine solche didaktische Reduktion dar. Zwar werden andere Einflussfaktoren wie Wellenlänge und Einfallswinkel des Lichtes und Oberflächenbeschaffenheit des Körpers im Erklärvideo kurz erwähnt, aber nicht genauer bei der Station untersucht. Auch die Betrachtung auf den mikroskopischen Aufbau unterschiedlicher Farbflächen und deren Auswirkungen auf ihr Reflexionsverhalten, wurde, aufgrund der Klassenstufe, nicht weiter behandelt.

G. Fehlvorstellungen

Neben diesen Gütekriterien für kompetenzorientierte Lernaufgaben, ist es aus didaktischer Sicht relevant, sich mögliche Fehlvorstellungen der Schüler*innen bewusst zu machen. Dadurch können diese gezielt durch Lernaufgaben beseitigt werden. Bei dem Thema „Albedo“ sind folgende Fehlvorstellungen zu erwarten: Zum einen könnten die Schüler*innen denken, dass eine hohe Albedo den Klimawandel verstärkt. Um dieser Fehlvorstellung zu entgegnen, wird mithilfe von Messungen sowohl die Albedo der Landschaften als auch deren Oberflächentemperatur bestimmt. Durch die Anordnung der Landschaften von hoher bis niedriger Albedo und von hoher bis niedriger Temperatur, lässt sich der Zusammenhang gut erkennen, dass eine hohe Oberflächentemperatur mit einer niedrigen Albedo verbunden ist. Zum anderen könnte die falsche Vorstellung auftreten, dass eine helle Landschaft eine höhere Temperatur hat als eine dunkle Landschaft. Diese Fehlvorstellung kann entstehen, weil Schüler*innen helle Farben mit Licht und dunkle Farben mit Schatten assoziieren. Mithilfe der Temperaturmessung bei den verschiedenen Landschaften kann diese Fehlvorstellung beseitigt werden.

4.3. Station 2: Treibhauseffekt

Die zweite Station trägt den Titel „Abteilung für Klimaschwankungen“. Sie beschäftigt sich mit der Erklärung des Treibhauseffektes. Ziel ist es, dass die Schüler*innen mit dem Teilchenmodell von Licht den Treibhauseffekt erläutern können. Dafür dient bei der Station neben einem Versuch zum Treibhauseffekt auch eine Simulation von PHET (siehe <http://butler.physik.uni-mainz.de/climate-escape/>). Abbildung 32 zeigt den Aufbau der Station mit dem Versuch und den Elementen des Escape Rooms. Um eine adäquate fachliche und didaktische Herangehensweise erarbeiten zu können, mussten vorweg die zugrundeliegenden Lernziele definiert werden.

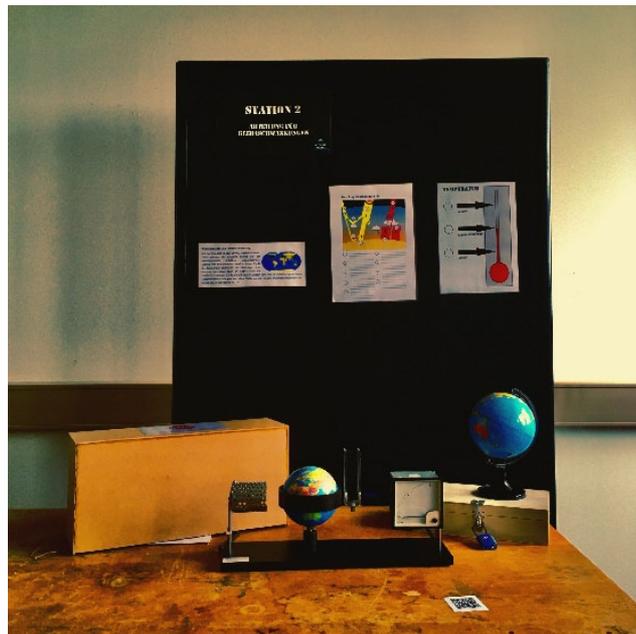


Abb. 32: Aufbau Station 2 (eigene Aufnahme)

4.3.1. Lernziele

Der angestrebte Lernzugewinn der Station wurde mit folgenden Grob- und Feilernzielen definiert (siehe Kircher 2019: 91f.). Hinter jedem Lernziel befindet sich in Klammern der entsprechende Anforderungsbereich (AFB). Eine Erklärung der einzelnen Anforderungsbereiche befindet sich in Abschnitt 3.5.

Groblernziel:

Die Schüler*innen können anhand des Teilchenmodells von Licht den natürlichen Treibhauseffekt erläutern (AFB 2).

Feinlernziele:

Die Schüler*innen können ...

... mithilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes die durchschnittliche Oberflächentemperatur der Erde berechnen (AFB 2).

... den Bauteilen des Versuchsaufbaus „Treibhauseffekt“ den richtigen Begriff aus dem Realraum zuzuordnen (AFB 1).

... den Versuch „Treibhauseffekt“ mithilfe einer Versuchsanleitung durchführen (AFB 2).

... in der Simulation „Treibhauseffekt“ 2 Minuten lang die Anzahl unterschiedlicher Lichtteilchen zählen (AFB 1).

... die Bewegung der sichtbaren und infraroten Lichtteilchen in der Simulation beschreiben (AFB 1).

... Unterschiede in der Anzahl der Lichtteilchen bei einer Simulation mit und ohne Treibhausgase beschreiben (AFB 1).

... erklären, welchen Einfluss die Treibhausgase auf sichtbare und infrarote Lichtteilchen haben (AFB 2).

... erklären, dass ein Satellit außerhalb der Atmosphäre eine niedrigere Temperatur misst, wenn Treibhausgase in der Atmosphäre vorhanden sind (AFB 2).

... erklären, dass ein Thermometer in der unteren Atmosphäre eine höhere Temperatur misst, wenn Treibhausgase in der Atmosphäre vorhanden sind (AFB 2).

... eine Abbildung zum Strahlungshaushalt der Erde mit den richtigen Fachbegriffen beschriften (AFB 2).

4.3.2. Fachliche Analyse der Versuche

Diese Lernziele sollen mithilfe eines Versuchs zum Treibhauseffekt von der schweizerischen Firma Demo Ex GmbH umgesetzt werden (vgl. DemoEx GmbH o.J.). Dieser wurde als einziger Versuch aus zeitlichen Gründen nicht selbst gebaut. Abbildung 33 zeigt den Versuchsaufbau. Er besteht aus einer Lampe, welche die Sonne darstellt, einer Modellerde mit Metallring, einem Plexiglasbecken als Atmosphäre und einem Infrarotmessgerät mit Anzeige, das einen Satelliten darstellen soll. Schaltet man den Versuch ein, fängt die Lampe an zu leuchten und die Erde dreht sich. Die Lampe erwärmt den Metallring der Erde bis auf ca. 80°C. Dafür benötigt der Versuch eine Aufwärmzeit von über 30 Minuten. Hat

der Metallring seine Betriebstemperatur erreicht, kann man die Versuchsdurchführung starten. Der erwärmte Metallring der Erde strahlt infrarotes Licht aus, das das Plexiglasbecken passiert und vom Infrarotmessgerät gemessen wird. Füllt man Kohlenstoffdioxid mithilfe des Sodastreams in das Gefäß wird das infrarote Licht von diesem absorbiert und in alle Richtungen emittiert. So wird von dem Messgerät weniger Strahlung registriert. Die Messgerätanzeige zeigt daraufhin einen Abfall der Stromstärke. Dieser Stromstärkeabfall ist in diesem Fall mit einem Temperaturabfall gleich zu setzen. Da



Abb. 33: Versuch „Treibhauseffekt“ von DemoEx GmbH (eigene Aufnahme)

das Plexiglas bereits die komplette infrarote Strahlung absorbieren würde, wurden in das Gefäß zwei Löcher gebohrt und diese mit einer Folie versiegelt.

Mithilfe des Wien'schen Verschiebungsgesetzes kann die Wellenlänge λ_{max} des Ausstrahlungsmaximums berechnet werden (siehe Abschnitt 2.2.3):

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{T} = \frac{b}{T} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{352 \text{ K}} = 8,2 \mu\text{m}$$

Diese Wellenlänge liegt in keiner der Absorptionsbanden von CO_2 . Warum dennoch eine Absorption stattfindet, kann folgendermaßen erklärt werden: Durch seine Bauweise kann der schwarze Metallring näherungsweise als idealer Strahler betrachtet werden. Das Emissionsspektrum eines solchen Strahlers mit einer Temperatur von 80°C ist in Abb. 34 zu sehen. Hierbei ist an den gelben Flächen gut zu erkennen, dass der Metallring auch Licht in dem Wellenlängenbereichen der Absorptionsbanden von CO_2 emittiert. Dabei handelt es sich um die Absorptionsbanden zwischen $4,2$ und $4,4 \mu\text{m}$ und zwischen 12 und $16 \mu\text{m}$ sowie um den Peak bei $10,5 \mu\text{m}$ (vgl. Abschnitt 2.3.7). Das heißt, dass das Licht dieses Wellenlängenbereiches in dem Plexiglasbehälter absorbiert wird.

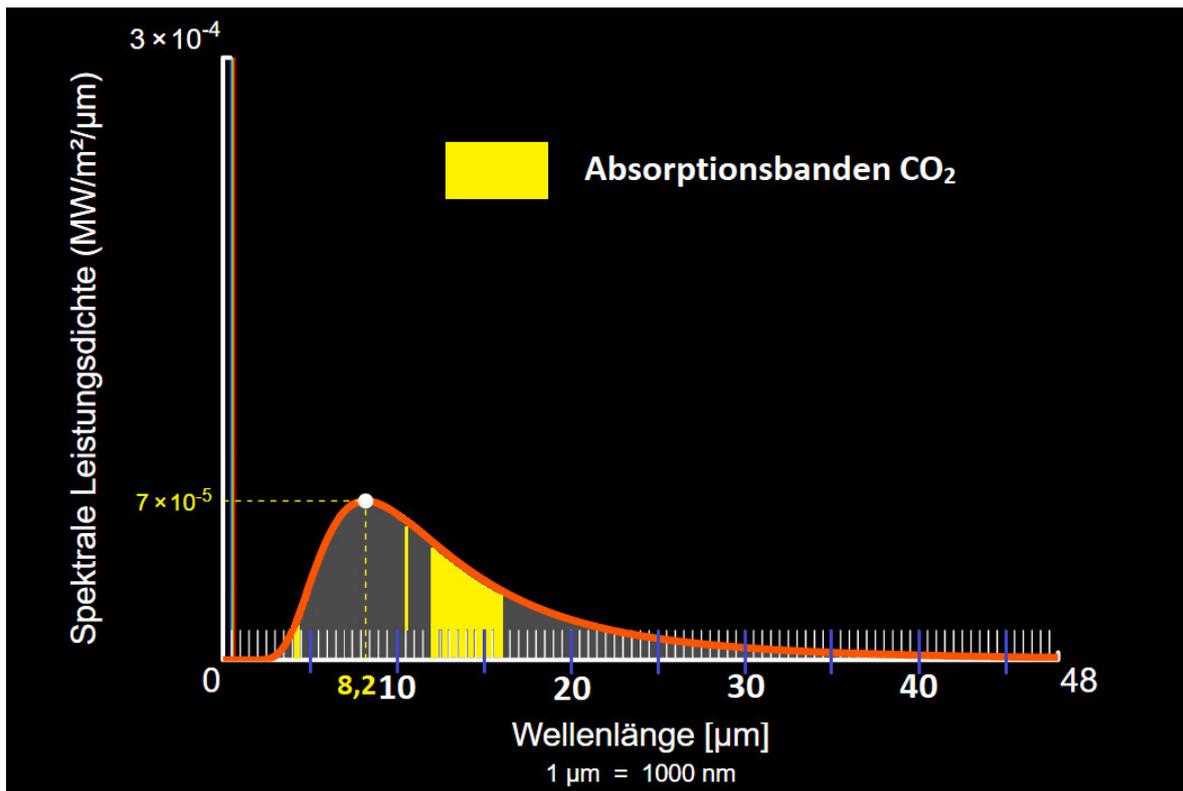


Abb. 34: Planck'sche Strahlungskurve eines idealen Schwarzen Körpers bei einer Temperatur von 80°C mit den Absorptionsbanden von CO₂ (eigene Darstellung nach PHET, vgl. Abschnitt 2.3.7.)

Bei diesem Modellversuch gibt es einige Kritikpunkte, die kurz erläutert werden:

1. Der Temperaturabfall auf der analogen Anzeige des Infrarotthermometers wird nur qualitativ betrachtet. Der Versuch macht keine Aussage über die Größe des Temperaturabfalls. Bei einer Vergleichsmessung mit einem anderen Messgerät zeigte sich lediglich ein Temperaturabfall von 1°C. Ein Anhaltspunkt, der für eine hohe Sensitivität des Messgeräts spricht, ist, dass bereits eine leichte Präzession der Erde zu einem Schwanken auf der Temperaturskala führt.
2. Mit dem Versuch kann nur ein Temperaturabfall am „Satelliten“ gezeigt werden. Die Messung einer Temperaturzunahme im Plexiglasbehälter, was analog zu einer anthropogenen globalen Erwärmung wäre, ist vom Hersteller nicht vorgesehen. Eine Messung mit einem Stabthermometer und einem Temperaturfühler lieferten keine reproduzierbaren Ergebnisse, da der Effekt zu gering ist.
3. Die Temperatur, mit der im Modell gearbeitet wird, liegt viel höher als in der Realität. Dadurch wird der Effekt nicht naturgetreu reproduziert. Versucht man dieses Problem zu umgehen und betreibt den Versuch auf 15°C Zimmertemperatur, wäre der Temperaturunterschied zur Umgebungstemperatur nur sehr gering. Damit würden die Absorption und die Emission von Wärmestrahlung im Gleichgewicht sein und das Infrarotmessgerät würde keine Strahlung von dem Metallring ausgehend messen. Bei der Erde dagegen gibt es eine große Temperaturdifferenz zum Weltraum, weshalb Wärmestrahlung von einem Satelliten im All gemessen werden kann.

Auch wenn der Versuch einige Schwachstellen hat, eignet er sich gut als Demonstrationsexperiment, um die Absorption von IR-Strahlung durch das Treibhausgas CO₂ qualitativ zu zeigen und stellt alle Interaktionsglieder des Treibhauseffektes, wie Sonne Erde und Atmosphäre, anschaulich dar. Da für diese Station keine quantitative Messung erforderlich ist, kann mit dem Versuch ganz einfach qualitativ ein Temperaturabfall am Satelliten gezeigt werden. Da viele Schüler*innen einen Temperaturanstieg erwarten, wird auf diese Weise eine Fehlvorstellung thematisiert, die bei der Bearbeitung der Station gelöst wird (siehe Abschnitt 4.3.3.). Auf diese Weise schafft der Versuch einen kognitiven Konflikt und Interesse bei den Schülerinnen und Schülern.

4.3.3. Didaktische und methodische Analyse

Damit dem konzipierten Versuch ein Bildungsgehalt abgewonnen werden kann, muss dieser in eine kontextorientierte Lernumgebung eingebettet werden. Die Lernumgebung besteht aus verschiedenen Lernaufgaben, denen eine didaktischen und methodischen Basis zugrunde liegt. Diese wird im Folgenden näher erläutert:

A. Vorwissen der Schüler*innen

Zur Bearbeitung dieser Station benötigen die Schüler*innen Vorkenntnisse aus den Themenfeldern 2 „Optische Phänomene an Grenzflächen“, 3 „Thermische Ausdehnung in Experiment und Modell“ und 4 „Dynamische Phänomene“ des rheinland-pfälzischen Lehrplans (vgl. MBWWK 2014). Die Schüler*innen sollten aus Themenfeld 2 die Grundlagen zu Reflexion, Absorption und Emission von Licht beherrschen. Bei Themenfeld 3 ist wichtig, dass die Schüler*innen die Temperatureinheit „Kelvin“ kennengelernt haben und wissen, wie man diese in Grad Celsius umrechnet. Sollte dieses Wissen nicht mehr vorhanden sein, hilft ihnen an der passenden Stelle ein Tipp weiter. Aus Themenfeld 4 sind Begriffe, wie Energie, Energieerhaltung und Leistung relevant. Diese werden in der Station mehrmals benutzt, ohne sie nochmal ausführlich zu erklären. Das gleiche trifft auf die Einheit „Watt“ zu. Neben diesen physikalischen Grundlagen sind auch komplexere mathematische Grundlagen zur Berechnung der globalen Durchschnittstemperatur notwendig. Dazu gehören Kenntnisse über das Umformen von Formeln und über das Themenfeld „Wurzeln“. So sollten sie wissen, wie man beispielsweise mithilfe des Taschenrechners die vierte Wurzel zieht. Auch an dieser Stelle wurden mehrere Tipps formuliert, um die Schüler*innen dabei zu unterstützen.

B. Lernschritte nach dem Lehr-Lern-Modell

Basierend auf dem erwarteten Vorwissen der Schüler*innen wurde die Station nach dem Lehr-Lern-Modell in folgende Lernphasen gegliedert. Eine Erläuterung der einzelnen Lernphasen wurde in Abschnitt 3.4. dargelegt.

Phase 1: Im Lernkontext ankommen

Zu Beginn der Station geht es um die Entwicklung einer problemorientierten Fragestellung. Dafür berechnen die Schüler*innen mithilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes, welche Temperatur aufgrund der solaren Einstrahlung auf der Erde herrschen müsste. Diesen Temperaturwert vergleichen die Schüler*innen mit dem durchschnittlichen Temperaturwert, der real auf der Erde gemessen wird und können eine Abweichung von 33 Kelvin feststellen. Auf diese Weise wird ein Widerspruch erzeugt, woraus sich die problemorientierte Fragestellung ableiten lässt: „Wie kommt eine solche Temperaturdifferenz zustande?“ Um diese Frage zu beantworten wird in den nachfolgenden Phasen mit dem Versuch und der Simulation zum Treibhauseffekt gearbeitet.

Phase 2: Vorwissen aktivieren und Vorstellungen entwickeln

Im nächsten Schritt folgt eine kurze Inputphase über sichtbare und infrarote Lichtteilchen. Da die meisten Schüler*innen dieses Thema noch nicht im Unterricht behandelt haben, wird kurz erklärt, dass infrarote Lichtteilchen weniger Energie als sichtbare besitzen und dass die Sonne vor allem sichtbare Lichtteilchen und die Erde infrarote Lichtteilchen emittiert.

Vor der Versuchsdurchführung findet der Transfer vom Real- in den Modellraum statt. Dafür sollen Abbildungen von den einzelnen Versuchsteilen und den verschiedenen Lichtteilchen in die richtige Reihenfolge gebracht und die Bezeichnung, was der Versuchsteil im Realraum darstellt, zugeordnet werden (siehe Abb. 35). Darauf folgt die Hypothesenbildungsphase, bei der die Schüler*innen, überlegen sollen, wie sich die Temperaturanzeige im Versuch verhält, wenn CO₂ in den Plexiglasbehälter eingefüllt wird.

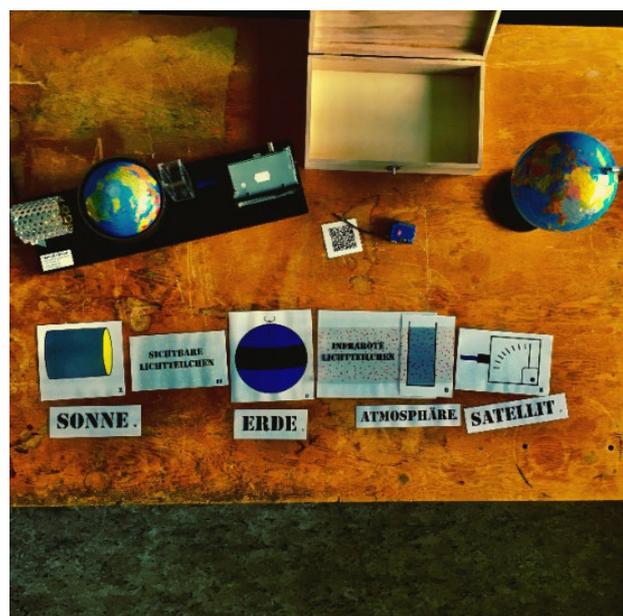


Abb. 35: Zuordnungsaufgabe für einen Transfer vom Real- in den Modellraum (eigene Darstellung)

Phase 3: Lernprodukt erstellen

In dieser Phase steht die Versuchsdurchführung im Vordergrund. Die Schüler*innen führen den Versuch zum Treibhauseffekt durch, indem sie CO₂ in das Plexiglasbecken füllen und dabei einen Abfall der Temperatur am Infrarotmessgerät feststellen. Um zu erklären, was genau bei dem Versuch passiert, findet mithilfe einer Simulation eine Transformation ins Teilchenmodell statt. In dieser Simulation werden die sichtbaren und infraroten



Abb. 36: Simulation „Treibhauseffekt“ (PHET b o.J.)

Lichtteilchen durch gelbe und rote Punkte dargestellt (siehe Abb. 36). Die Aufgabe der Schüler*innen besteht darin, diese Lichtteilchen in der oberen und unteren Atmosphäre zu zählen und zwar einmal mit und einmal ohne Treibhausgase in der Atmosphäre. Zudem soll die Bewegungsrichtung der Teilchen beobachtet werden. Dabei fällt den Schüler*innen auf, dass es bei den sichtbaren Lichtteilchen keinen Unterschied macht, ob Treibhausgase vorhanden sind oder nicht. Das ist bei den infraroten Lichtteilchen nicht der Fall. Wenn Treibhausgase vorhanden sind, ändern diese zum Teil ihre Bewegungsrichtung und gelangen zurück in Richtung Erdoberfläche. Damit werden in der oberen Atmosphäre weniger Teilchen und in der unteren Atmosphäre mehr Teilchen registriert. Daraus ergibt sich die positive Korrelation zwischen der Anzahl der infraroten Lichtteilchen und der gemessenen Temperatur. Auf diese Weise kann der Versuch interpretiert und die problemorientierte Fragestellung beantwortet werden. Als abschließendes Lernprodukt der Station dient ein Energieflussdiagramms zum Strahlungshaushalt der Erde, welche die Schüler*innen mit ihrem neuen Fachwissen beschriften sollen. Dabei wird zwischen sichtbaren und infraroten Lichtteilchen differenziert und die Energieströme werden durch Lichtteilchen anschaulich dargestellt (siehe Anhang V.II.II).

Die konkreten Lernaufgaben der unterschiedlichen Phasen sind im Anhang in Abschnitt V.II.II. aufgeführt. Bei deren Konzeption wurden, die in Abschnitt 3.5 beschriebenen Kriterien, berücksichtigt. Im Folgenden wird der Aufbau der Lernaufgaben dieser Station exemplarisch mit ausgewählten Gütekriterien legitimiert:

C. Förderung unterschiedlicher Kompetenzen

Diese Station fördert mit ihren Lernaufgaben vor allem folgende Kompetenzen der Bildungsstandards der Physik (siehe Abschnitt 3.5.): die Anwendung von Fachwissen und die Methodenkompetenz. Die Methodenkompetenz wird beispielsweise durch das Umstellen und Berechnen einer Formel gefördert und das Anwenden von Fachwissen beispielsweise durch die Beschriftung der Grafik zum Strahlungshaushalt. Die Kommunikations- und Beurteilungskompetenz findet in dieser Station keine primäre Anwendung.

D. Basiskonzepte

Von den Basiskonzepten des naturwissenschaftlichen Unterrichts (siehe Abschnitt 3.5) werden bei der Station die Folgenden angesprochen: „Stoff – Teilchen – Materie“, „Wechselwirkung“ und „Energie“. Das Basiskonzept „Stoff – Teilchen – Materie“ ist durch den Perspektivwechsel von der makroskopischen in die mikroskopische Welt gegeben. Zuerst wird der Treibhauseffekt am Modellversuch auf einer makroskopischen Ebene betrachtet. Um das Abfallen der Temperatur am Infrarotthermometer zu erklären, findet ein Perspektivwechsel in die mikroskopische Ebene statt, in der das Licht als Lichtteilchen betrachtet wird. Das Basiskonzept „Wechselwirkungen“ findet Anwendung durch die Wechselwirkung der Treibhausgase mit den infraroten Lichtteilchen. Diese Wechselwirkung sorgt dafür, dass ein Teil dieser Lichtteilchen seine Bewegung ändert und sich wieder in Richtung Erdoberfläche bewegt. Ein weiteres wichtiges Basiskonzept ist die „Energie“. Auch in dieser Station findet man die Energieerhaltung. Sichtbare Lichtteilchen transportieren Energie. Diese Lichtteilchen werden an der Erdoberfläche reflektiert oder absorbiert. Die Erdoberfläche nimmt die Energie auf und sendet ihrerseits infrarote Lichtteilchen, die eine geringere Energie als die sichtbaren Lichtteilchen aufweisen. Treibhausgase sorgen dafür, dass die infraroten Lichtteilchen ihre Bewegungsrichtung ändern. Dadurch nimmt die Anzahl der infraroten Lichtteilchen in der oberen Atmosphäre ab und damit auch die Temperatur. Aufgrund der Energieerhaltung muss die Temperatur in der unteren Atmosphäre zunehmen, da dort die Anzahl der infraroten Lichtteilchen zunimmt.

E. Didaktische Reduktion

Eine didaktische Reduktion dient der altersgemäßen Aufbereitung der Lerninhalte (siehe Abschnitt 3.5.) Die Reduktion findet zum Beispiel bei der Erklärung des Treibhauseffektes statt. Dieser wird ohne das Wellenmodell anhand des Teilchenmodells von Licht erläutert. Im Mittelstufenlehrplan von Rheinland-Pfalz wird der Wellencharakter von Licht nicht behandelt. Aus diesem Grund müsste in dem

Schülerlabor zuerst einmal die Lichtwelle und auch Begriffe wie Wellenlänge oder Frequenz eingeführt werden. Dagegen bietet das Teilchenmodell von Licht eine einfachere und schnellere Variante den Treibhauseffekt zu erklären. So kann infrarotes Licht als Lichtteilchen, die eine geringere Energie als sichtbare Lichtteilchen besitzen, erklärt werden. Treibhausgase sorgen für eine Änderung der Bewegungsrichtung der infraroten Lichtteilchen und die Temperatur ist abhängig von der Anzahl der infraroten Lichtteilchen bzw. deren Gesamtenergie.

F. Fehlvorstellungen

Des Weiteren ist es aus didaktischer Sicht relevant, sich mögliche Fehlvorstellungen der Schüler*innen bewusst zu machen. Dadurch können diese gezielt durch Lernaufgaben beseitigt werden. Die meisten Schüler*innen verbinden mit dem Treibhauseffekt einen Anstieg der Temperatur. Aus diesem Grund erwarten viele Schüler*innen dies auch beim Modellversuch „Treibhauseffekt“. Indem sie vor der Versuchsdurchführung eine Vermutung zum Verhalten der Temperatur aufstellen, wird die Fehlvorstellung bei den Schülerinnen und Schülern bewusst aktiviert. Bei der Versuchsdurchführung entsteht dann ein Überraschungseffekt, da die Temperatur entgegen aller Erwartungen abfällt. Auf diese Weise wird Interesse und Motivation bei den Schülerinnen und Schülern geschaffen, den vermeintlichen Widerspruch zu lösen. Die Ursache für einen solchen Temperaturabfall und den Zusammenhang zum Treibhauseffekt wird in der Simulation mithilfe des Teilchenmodells von Licht erarbeitet. Auf diese Weise soll der vermeintliche Widerspruch und damit die Fehlvorstellung beseitigt werden.

4.4. Station 3: Eigenschaften von Treibhausgasen

Die dritte Station trägt den Titel „Abteilung für Molekularforschung“. Sie baut auf der zweiten Station auf und legt ihren Fokus auf die Eigenschaften von Treibhausgasen. Diese Eigenschaften werden exemplarisch für die Treibhausgase Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf herausgearbeitet. Das Ziel der Station ist es, dass die Schüler*innen die Wechselwirkung zwischen Lichtteilchen und Treibhausgas auf einer mikroskopischen Ebene beschreiben und anhand des Aufbaus eines Moleküls erläutern können, ob ein atmosphärisches Gas treibhauswirksam ist. Abbildung 24 zeigt den Aufbau der Station mit dem Versuch und den Elementen des Escape Rooms. Um eine adäquate fachliche und didaktische Herangehensweise erarbeiten zu können, mussten vorweg die zugrundeliegenden Lernziele definiert werden.



Abb. 37: Aufbau Station 3 (eigene Aufnahme)

4.4.1. Lernziele

Der angestrebte Lernzugewinn der Station wurde mit folgenden Grob- und Feinlernzielen definiert (siehe Kircher 2019: 91f.). Hinter jedem Lernziel befindet sich in Klammern der entsprechende Anforderungsbereich (AFB). Eine Erklärung der einzelnen Anforderungsbereiche befindet sich in Abschnitt 3.5.

Groblernziel:

Die Schüler*innen können die Wechselwirkung zwischen Lichtteilchen und Treibhausgas auf einer mikroskopischen Ebene beschreiben und anhand des molekularen Aufbaus eines Moleküls erläutern, ob es sich um ein Treibhausgas handelt (AFB 2).

Feinlernziele:

Die Schüler*innen können ...

... den Hauptbestandteilen der Luft ihren Prozentanteil und eine Abbildung ihres molekularen Aufbaus zuordnen (AFB 1).

... mithilfe eines Periodensystems Atomkerne nach der Stärke ihrer positiven Ladung anordnen (AFB 1).

... durch Einzeichnen von Spiegelachsen in den molekularen Aufbau eines Gases und dem Deformieren von Molekülmodellen bestimmen, ob es sich bei dem Gas um ein Treibhausgas handelt (AFB 2).

... den Bauteilen der beiden Versuchsaufbauten den richtigen Begriff aus dem Realraum zuordnen (AFB 1).

... mithilfe der beiden Versuchsaufbauten „Wasserdampf“ und „CO₂“ sowie mit der App „Smart Probes“ eine Temperaturkurve messen, wenn ein Gas in den Versuchsaufbau eingefüllt wird (AFB 2).

... Auffälligkeiten einer gemessenen Temperaturkurve auf dem iPad benennen (AFB 1).

... ein Schaubild zur Absorption von infraroten Lichtphotonen durch Treibhausgase beschriften (AFB 2).

4.4.2. Fachliche Analyse der Versuche

Zur Umsetzung der Lernziele wurden zwei Versuche konstruiert. Mit dem einen Versuch lässt sich die Treibhausgaswirkung von Wasserdampf und mit dem anderen Versuch die Treibhausgaswirkung von Kohlenstoffdioxid messen. Abbildung 38 zeigt den Versuch zur Messung der Treibhausgaswirkung von Wasserdampf. Er ist ähnlich aufgebaut wie der Versuch „Treibhauseffekt“ aus Station 2 und stellt den Ausschnitt zwischen Erde und Messgerät dar (vgl. Abschnitt 4.3.2.). An der linken Seite befindet sich das Modell einer Erdhälfte mit einem schwarzlackierten Blech. Im Inneren ist eine Wärmelampe, die das Blech auf ca. 80°C erwärmt. Das Blech emittiert Wärmestrahlung, die das blaue Rohr passiert und zum Modellsatelliten gelangt. Im Modellsatelliten befindet sich ein Infrarotmessgerät.



Abb. 38: Versuch zur Messung der Treibhausgaswirkung von Wasserdampf (eigene Darstellung)

Das Messgerät gibt die Temperatur der Infrarotstrahlung über Bluetooth an ein iPad weiter. Mit der App „Smart Probes“, die vom Hersteller des Messgerätes stammt, kann die Temperatur in ihrem zeitlichen Verlauf als Graph angezeigt werden. Die Atmosphäre wird durch das blaue Rohr dargestellt. Mithilfe eines Wasserkochers kann Wasserdampf in diese Atmosphäre eingelassen werden. Der Wasserdampf sorgt dafür, dass die infrarote Strahlung in der Röhre absorbiert wird und dadurch das Messgerät im Satelliten eine geringe Intensität der Infrarotstrahlung und damit einen Temperaturabfall registriert. Der zeitliche Verlauf des Temperaturabfalls ist in Abb. 39 dargestellt. Man kann einen Abfall der Temperatur von 81°C auf fast 56°C erkennen, wenn das Wasser zu kochen beginnt. Danach pendelt sich der Temperaturwert auf ca. 73°C ein. Damit kommt es insgesamt durch die Absorption der IR-Strahlung zu einem Temperaturabfall von 8°C.

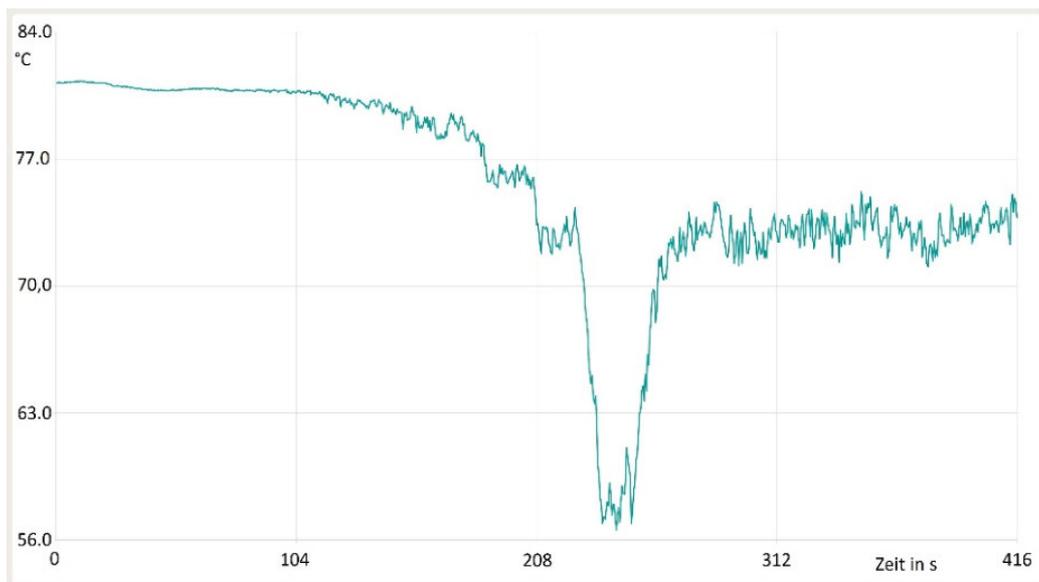


Abb. 39: Temperaturverlauf der von der Modellerde emittierten IR-Strahlung beim Einströmen von Wasserdampf in die Modellatmosphäre (Darstellung durch die App „Smart Probes“)

Da die Temperatur des Bleches genauso wie der Metallring bei Station 2 eine Temperatur von 80°C aufweist, sind die Planck'schen Strahlungskurven identisch (siehe Abb. 40). Die grünen Flächen stellen bei dieser Abbildung die Absorptionsbanden von Wasserdampf dar. Hierbei fällt auf, dass diese viel größer sind als bei Kohlenstoffdioxid, weshalb bei dem Versuch mehr infrarotes Licht absorbiert wird. Aus diesem Grund ist der gemessene Temperaturabfall größer als bei dem Versuch mit Kohlenstoffdioxid. Eine weitere Ursache für einen stärkeren Temperaturabfall könnte sein, dass der Wasserdampf beim Aufsteigen Wassertröpfchen mitreißt und an diesen das infrarote Licht gestreut wird.

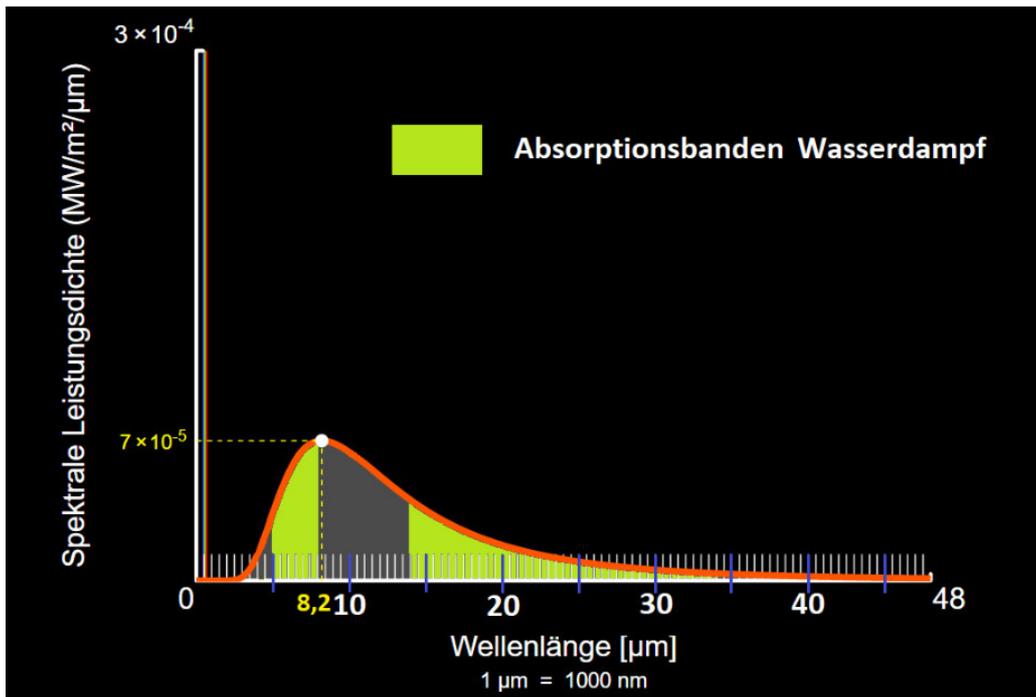


Abb. 40: Planck'sche Strahlungskurve eines idealen Schwarzen Körpers bei einer Temperatur von 80°C mit den Absorptionsbanden von H₂O (eigene Darstellung nach PHET, vgl. Abschnitt 2.3.8.)

Bei dem Versuchsaufbau wurde bewusst ein horizontaler Aufbau gewählt, da der Wasserdampf mit der erwärmten Luft nach oben steigt. So kann er durch eine Rohröffnung auf einfache Weise in die Röhre eingelassen werden. Zu Beginn wurde der Versuch mit Folien an den Enden der Röhren durchgeführt. An diesen ist nach kurzer Zeit Wasser kondensiert, wodurch es zu einer starken Temperaturabnahme kam. Dies hatte ihre Ursache nicht in der Absorption, sondern in der Streuung von infraroter Strahlung. Aus diesem Grund wurden die Folien entfernt und zwei Rohöffnungen nach oben eingebaut, durch die der Wasserdampf entweichen kann. Auf diese Weise wird das Messgerät vor dem Wasserdampf geschützt.

Der zweite Versuch hat den gleichen Aufbau und unterscheidet sich nur in seiner vertikalen Ausrichtung der Röhre und einer durchsichtigen Folie am unteren Ende (siehe Abb. 41). Dieser Aufbau dient der Untersuchung des Absorptionsverhalten von Gasen wie Kohlenstoffdioxid oder Argon. Durch unterschiedliche Testmessungen hat diese Versuchsausrichtung zu den besten Ergebnissen geführt. Die vertikale Ausrichtung hat den Vorteil, dass sich das Kohlenstoffdioxid im unteren Bereich des Rohrs sammelt und damit den ganzen Querschnitt der Röhre ausfüllt. Eine horizontale Ausrichtung hat dagegen zur Folge, dass sich das Kohlenstoffdioxid längs in der Röhre verteilt und somit nicht der komplette Querschnitt ausgefüllt wird, wenn nicht genug CO₂ eingefüllt wird. Auf diese Weise kann man beim vertikalen Aufbau sicher stellen, dass die infrarote Strahlung das CO₂ durchquert bevor sie zum Infrarotmessgerät gelangt.

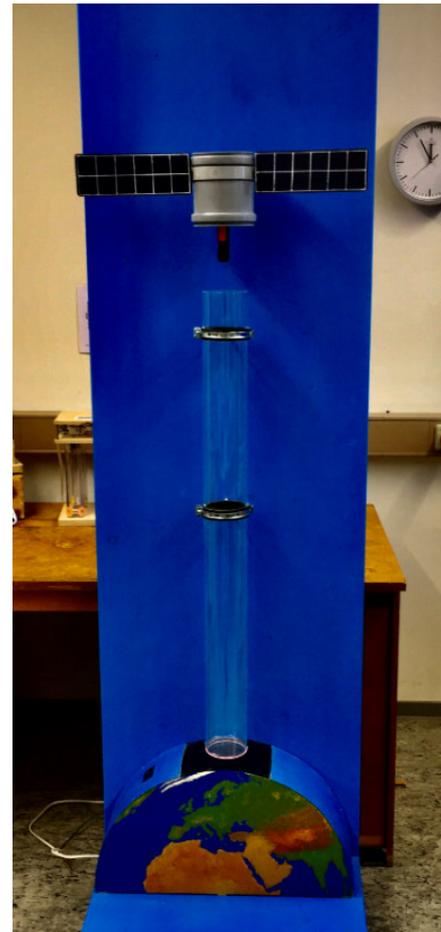


Abb. 41: Versuch zur Messung der Treibhausgaswirkung von CO₂ (eigene Darstellung)

Abbildung 42 zeigt den zeitlichen Temperaturverlauf bei der Absorption durch CO₂. Zu Beginn ist die Temperatur auf ca. 88,5°C konstant und sinkt auf 84,5°C ab, wenn CO₂ eingefüllt wird. Wenn sich das Gas in der Röhre beruhigt hat, steigt die Temperatur auf ca. 86,5°C an. Damit ist durch die Absorption ein Temperaturabfall von 2°C zu beobachten. Die Planck-Kurve und die Absorptionsbanden von CO₂ sind identisch, mit denen aus Abschnitt 4.3.2.

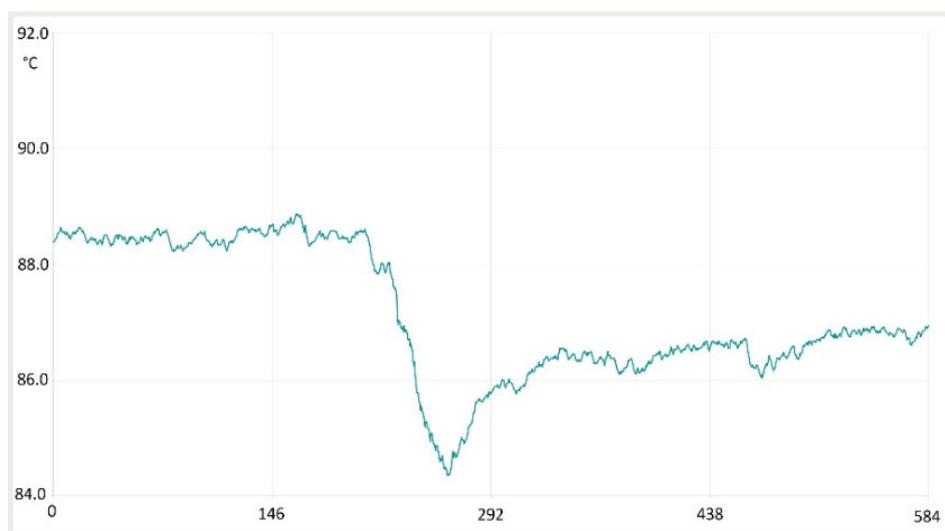


Abb. 42: Temperaturverlauf der von der Modellerde emittierten IR-Strahlung beim Einströmen von CO₂ in die Modellatmosphäre (Darstellung durch die App „Smart Probes“)

Des Weiteren kann der Aufbau verwendet werden, um eine Messung mit Argon durchzuführen. Die Messung wird analog zur Kohlenstoffdioxidmessung durchgeführt. In Abb. 43 ist die Temperaturkurve für Argon dargestellt. Bei dieser Kurve ist kein Temperaturabfall durch Absorption zu erkennen, was bestätigt, dass es sich hierbei um kein Treibhausgas handelt. Lediglich ein kleiner Temperaturanstieg von 1°C ist zu erkennen. Dieser kann dadurch erklärt werden, dass sich vorher in der Röhre Luft befunden hat, die auch Anteile an Treibhausgasen wie CO₂ und Wasserdampf aufweist. Wird nun die Röhre komplett mit Argon gefüllt, findet in der Röhre keine Absorption mehr statt und es kommt zum Anstieg der Temperatur.

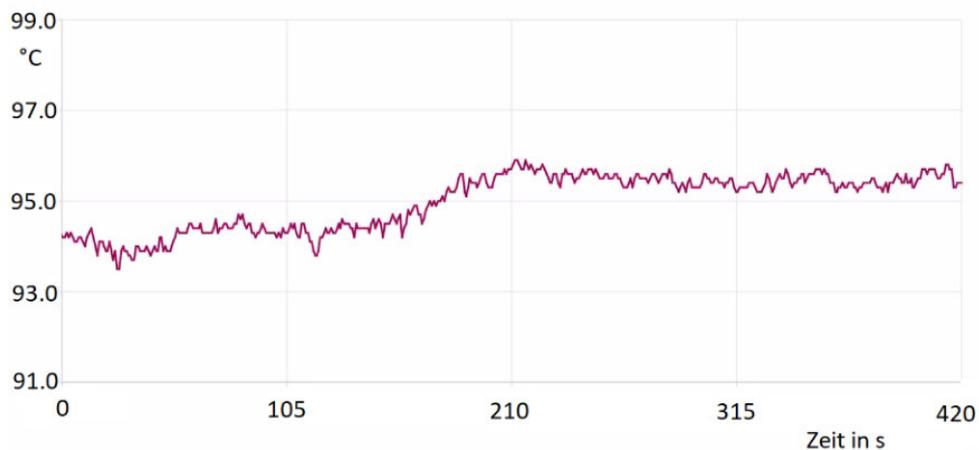


Abb. 43: Temperaturverlauf der von der Modellerde emittierten IR-Strahlung beim Einströmen von Argon in die Modellatmosphäre (Darstellung durch die App „Smart Probes“)

4.4.3. Didaktische und methodische Analyse

Damit die konzipierten Versuche ein Bildungsgehalt abgewonnen werden kann, müssen diese in eine kontextorientierte Lernumgebung eingebettet werden. Die Lernumgebung besteht aus verschiedenen Lernaufgaben, denen eine didaktischen und methodischen Basis zugrunde liegt. Diese wird im Folgenden näher erläutert:

A. Vorwissen der Schüler*innen

Zur Bearbeitung der Lernaufgaben benötigen die Schüler*innen Kenntnisse über den natürlichen Treibhauseffekt, was in der vorherigen Station 2 behandelt wurde. Aus diesem Grund wurde das Schülerlabor so konzipiert, dass die Station 2 vorher absolviert wird. Des Weiteren sollten die Schüler*innen bereits aus der Schule die prozentuale Verteilung der chemischen Zusammensetzung von Luft kennen. Da dies nicht immer gegeben ist, sind die Tipps so verfasst, dass auch Schüler*innen, die das Thema nicht im Unterricht behandelt haben, die Aufgabe lösen können. Außerdem sind für die Station

Grundkenntnisse zur Atomphysik erforderlich. Die Schüler*innen sollten Erfahrungen mit dem Umgang eines Periodensystems mitbringen und wissen, wie ein Atom aufgebaut ist und welche Ladungen die einzelnen Teilchen besitzen. Diese Inhalte werden in Themenfeld 5 „Atombau und ionisierende Strahlung“ im rheinland-pfälzischen Lehrplan behandelt (MBWWK 2014: 108ff.). Aus dem Mathematikunterricht sollten die Schüler*innen für diese Station die Fähigkeit mitbringen, in eine Figur Spiegelachsen einzeichnen zu können. Dies ist wichtig, um zu bestimmen, ob eine ungleichmäßige Ladungsverteilung vorherrscht.

B. Lernschritte nach dem Lehr-Lern-Modell

Basierend auf dem erwarteten Vorwissen der Schüler*innen wurde die Station nach dem Lehr-Lern-Modell in folgende Lernphasen gegliedert. Eine Erläuterung der einzelnen Lernphasen wurde in Abschnitt 3.4. dargelegt.

Phase 1: Im Lernkontext ankommen

Die Schüler*innen finden an dieser Station eine Apparatur vor, die aus vier Plexiglasröhren besteht (Abb. 44). Auf jeder Röhre ist ein Gasmolekül abgebildet (Argon, Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf und Stickstoff) und darin hängt ein Schlüssel an einem Elektromagneten. Daneben befindet sich ein Tresor mit zwei Schlössern, deren Schlüssel in den Röhren mit den beiden Treibhausgasmolekülen hängen. Die Schüler*innen haben als Ziel in dieser Station, den Tresor zu öffnen. Dafür sollen sie herausfinden, welche der Gase die beiden Treibhausgase sind. Deshalb ist die Fragestellung der Station: Welche der vier Gase sind die beiden Treibhausgase? Um zu umgehen, dass Schüler*innen alle Schlüssel ausprobieren, kann man die Apparatur nur öffnen, wenn man die

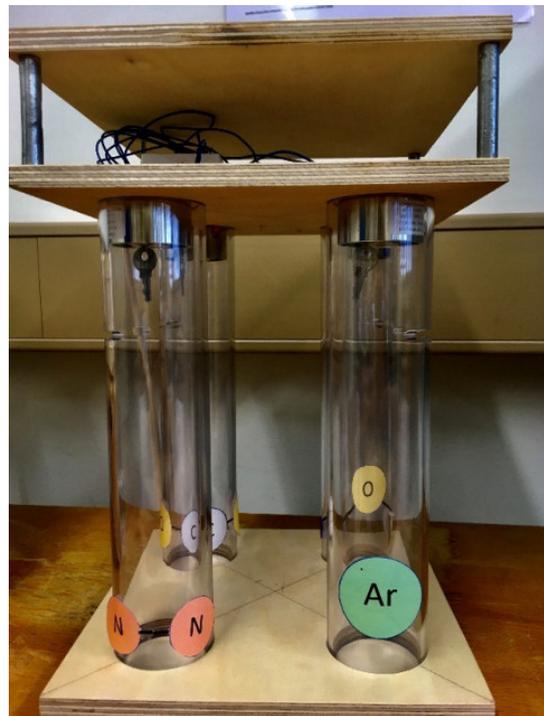


Abb. 44: Apparatur mit vier Plexiglasröhren und Schlüsseln (eigene Darstellung)

Elektromagneten ausschaltet. Sobald der Strom abgestellt wird, fallen alle Schlüssel in die Tiefe und werden dadurch unerreichbar für die Schüler*innen. Mithilfe zweier Holzstücke und einem Loch an der Seite der Plexiglasröhren können die Schlüssel gerettet werden. Bevor dies passiert, sollen zuerst einmal die anderen Aufgaben der Station bearbeitet werden.

Phase 2: Vorwissen aktivieren und Vorstellungen entwickeln

Damit die Lernaufgaben und letztendlich die problemorientierte Fragestellung gelöst werden kann, ist es wichtig, dass dafür benötigte Vorwissen aus Abschnitt A zu aktivieren. Im ersten Schritt geht es darum, zu wiederholen, welche Gase in der Luft zu welchen Anteilen vorhanden und wie deren Moleküle aufgebaut sind. Dies geschieht mithilfe von Kärtchen, die richtig einander zugeordnet werden sollen (siehe Abb. 45). Im Anschluss sollen die Schüler*innen erarbeiten, dass Atomkerne je nach Protonenzahl eine unterschiedlich starke positive Ladung besitzen. Das liefert die Basis für die Aufgaben in der nächsten Phase. Zudem haben die Schüler*innen die Aufgabe eine erste Vermutung aufzustellen, bei welchen der vier Gase es sich um Treibhausgase handelt. Diese beiden Gase werden an der Apparatur mit einem Marker markiert.

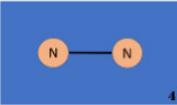
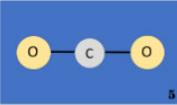
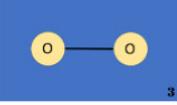
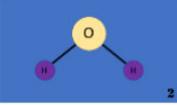
STICKSTOFF I	77,8 % C	 4
KOHLENSTOFF-DIOXID II	0,04 % E	 5
ARGON III	0,93 % B	 1
SAUERSTOFF IV	20,9 % A	 3
WASSERDAMPF V	0,25 % D	 2

Abb. 45: Kärtchen mit Strukturformel, Volumenanteil und Name wichtiger atmosphärischer Gase (eigene Darstellung)

Phase 3: Lernprodukt erstellen

Auf Grundlage der zuvor entwickelten Vorstellungen geht es in dieser Phase um die Erarbeitung, wie man Treibhausgase an ihrem molekularen Aufbau erkennt. Zuerst findet mithilfe eines Erklärvideos eine Inputphase statt. Hier wird kurz an einer Animation gezeigt, wie Lichtteilchen mit Treibhausgasen wechselwirken. Im Anschluss wird eine Bedingung formuliert, wie man ein Treibhausgas erkennt. Diese Bedingung ist eine ungleichmäßige Ladungsverteilung, was einem Dipolmoment entspricht. Im nächsten Schritt wird den Schülerinnen und Schülern erklärt, dass eine ungleichmäßige Ladungsverteilung vorherrscht, wenn man in den molekularen Aufbau nur eine Spiegelachse einzeichnen kann. Dies sollen die Schüler*innen an den Molekülen überprüfen. Auf diese Weise kann Wasserdampf als Treibhausgas identifiziert werden. Mithilfe von Molekülmodellen sollen die Schüler*innen im zweiten Schritt überprüfen, ob man ein Molekül so deformieren kann, dass es nur eine Spiegelachse besitzt (siehe Abb. 46). Dies ist nur bei Kohlenstoffdioxid der Fall, weshalb dieses als zweites Treibhausgas entlarvt werden kann.

Um zu überprüfen, ob die theoretischen Überlegungen stimmen und es sich bei beiden Gasen tatsächlich um Treibhausgase handelt, werden zwei Versuche durchgeführt. Mit dem Versuchsaufbau „Wasserdampf“ und „Kohlenstoffdioxid“ werden für beide Gase die Temperaturkurven aufgenommen (siehe Abschnitt 4.4.2.). Dabei kann man feststellen, dass das Infrarotthermometer einen Abfall der Temperatur registriert, wenn die beiden Gase in die Röhren eingefüllt werden. Dies ist analog zu dem Versuch „Treibhauseffekt“ von Station 2, weshalb die Vermutung bestätigt werden kann, dass es sich bei beiden Gasen um Treibhausgase handelt. Im letzten Schritt wird noch eine Messung mit Argon in Form eines Videos gezeigt. Hierbei können die Schüler*innen einen leichten Anstieg der Temperaturkurve erkennen und damit bestätigen, dass es sich um kein

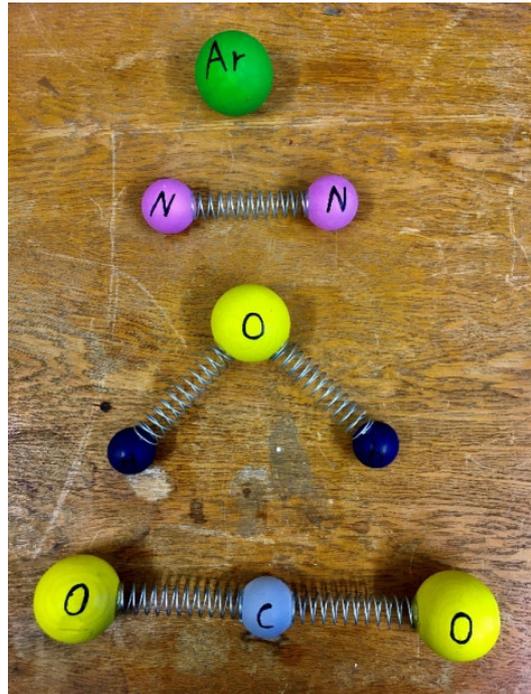


Abb. 46: Molekülmodelle (von oben nach unten: Argon, Stickstoff, Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid) (eigene Aufnahme)

Treibhausgas handelt. Mit diesem Wissen können die Schüler*innen die Schlüssel aus der Apparatur holen und den Tresor öffnen. In dem geöffneten Tresor befindet sich neben dem Hinweis auf die Geheimakte ein unvollständiges Schaubild (siehe Anhang Abschnitt V.II.III.). In diesem sollen Texte und Abbildungen ergänzt werden. Das fertige Schaubild soll die Inhalte der Station zusammenfassen und dient den Schüler*innen als Lernprodukt. Die Lösung wird der Assistentin oder dem Assistenten zugeschickt und am Ende im Plenum besprochen.

Die konkreten Lernaufgaben der unterschiedlichen Phasen sind im Anhang in Abschnitt V.II.III. aufgeführt. Bei deren Konzeption wurden die in Abschnitt 3.5. beschriebenen Kriterien berücksichtigt. Im Folgenden wird der Aufbau der Lernaufgaben dieser Station exemplarisch mit ausgewählten Gütekriterien legitimiert:

C. Förderung unterschiedlicher Kompetenzen

Diese Station zielt auf die Förderung folgender Kompetenzen der Bildungsstandards der Physik ab (siehe Abschnitt 3.5.): Durch das Aufstellen von Hypothesen, die Durchführung von Versuchen und das Einzeichnen von Spiegelachsen die Methodenkompetenz gefördert. Bei den Aufgaben zur Aktivierung des Vorwissens über die Zusammensetzung von Luft oder die Stärke der Ladungen von Atomkernen

findet eine Anwendung des Fachwissens statt. Die Kommunikations- und Beurteilungskompetenz findet in dieser Station keine primäre Anwendung.

D. Basiskonzepte

Von denen in Abschnitt 3.5. genannten Basiskonzepten finden in der Station analog zu Station 2 besonders die Basiskonzepte „Wechselwirkung“, „Stoff – Teilchen – Materie“ und „Energie“ Anwendung. In diesem Fall wird die Wechselwirkung zwischen einem infraroten Lichtteilchen und einem Treibhausgas-Molekül auf molekularer Ebene untersucht. Durch die Verifizierung der Treibhausgaseigenschaften von CO_2 und H_2O mithilfe der beiden Versuche findet ein Perspektivwechsel auf die makroskopische Ebene statt. Auf diese Weise wird das Basiskonzept „Stoff – Teilchen – Materie“ angesprochen. Das Basiskonzept „Energie“ findet Anwendung, in dem der Energieübertrag von Lichtteilchen zu Treibhausgas und wieder zu einem Lichtteilchen betrachtet wird. Auf diese Weise kann die Energieerhaltung nachvollzogen werden.

E. Didaktische Reduktion

Die didaktische Reduktion dient der altersgemäßen Aufbereitung der Lerninhalte (siehe Abschnitt 3.5). Diese hat vor allem bei der Erklärung des molekularen Aufbaus von Treibhausgasen stattgefunden. Hierbei wurde versucht, es für die Schüler*innen den Sachverhalt begreifbar zu erklären und auf Begriffe wie Dipolmoment und Normalschwingung zu verzichten. Das Einzeichnen von Spiegelachsen, um eine ungleichmäßige Ladungsverteilung zu erkennen, hat sich als geeignet erwiesen, da Spiegelachsen bereits aus dem Mathematikunterricht bekannt sind. Auch die Tatsache, dass nur Licht eines gewissen Spektralbereichs absorbiert wird und es verschiedene Schwingungsmodi gibt, wird nicht näher behandelt, da es für die Mittelstufe in diesem Zeitrahmen schwer umsetzbar ist.

F. Fehlvorstellungen

Des Weiteren wurde bei der Gestaltung der Lernaufgaben darauf geachtet, mögliche Fehlvorstellungen der Schüler*innen gezielt zu beseitigen. Eine solche Fehlvorstellung könnte die Folgende sein: Während Kohlenstoffdioxid als Treibhausgas den meisten Schüler*innen bekannt aus Schule und Alltag ist, wird Wasserdampf hingegen häufig nicht als Treibhausgas wahrgenommen, obwohl es treibhauswirksamer ist. In dieser Station bekommt Wasserdampf als Treibhausgas genauso viel Aufmerksamkeit wie CO_2 . Durch den Aufbau der molekularen Struktur, kann den Schüler*innen gezeigt werden, dass

Wasserdampf eine ungleichmäßige Ladungsverteilung besitzt und es sich deshalb um ein Treibhausgas handelt. Bei der Aufnahme der Temperaturkurve ist zudem noch zu erkennen, dass Wasserdampf infrarotes Licht stärker absorbiert als CO₂.

4.5. Station 3b: Anthropogener Treibhauseffekt und Kipppunkte

Die Station 3b trägt den Titel „Abteilung für Messdatenanalyse und Klimasimulation“. Sie beschäftigt sich mit dem anthropogenen Treibhauseffekt und der potenziellen Gefährdung, die von dem Erreichen eines Kipppunktes ausgeht. Um eine adäquate fachliche und didaktische Herangehensweise erarbeiten zu können, mussten vorweg die zugrundeliegenden Lernziele definiert werden.

4.5.1. Lernziele

Der angestrebte Lernzugewinn der Station wurde mit folgenden Grob- und Feinlernzielen definiert (siehe Kircher 2019: 91f.). Hinter jedem Lernziel befindet sich in Klammern der entsprechende Anforderungsbereich (AFB). Eine Erklärung der einzelnen Anforderungsbereiche befindet sich in Abschnitt 3.5.

Groblernziel:

Die Schüler*innen können die Auswirkungen auf die Temperatur der Atmosphäre anhand von Kipppunkten erläutern, wenn das 2°C-Ziel nicht erreicht wird und beurteilen, wie wahrscheinlich es ist, dass dieses Ziel erreicht werden kann (AFB 3).

Feinlernziele:

Die Schüler*innen können ...

... mithilfe des Dreisatzes und den vorgegebenen Werten berechnen, um wie viel °C sich die Atmosphäre zwischen 1800 bis 2015 erwärmt hat (AFB 2).

... den Ursachen des anthropogenen Treibhauseffekts Prozentwerte zuordnen, zu welchem Anteil sie zum globalen CO₂-Anstieg beitragen (AFB 2).

... die Auswirkungen mithilfe des interaktiven Visualisierungsmodells erläutern, wenn das 2°C-Ziel überschritten wird und verschiedene Kippunkte ausgelöst werden (AFB 2).

... die Auswirkungen mithilfe des interaktiven Visualisierungsmodells erläutern, wenn das 2°C-Ziel nicht überschritten wird (AFB 2).

... anhand der Temperaturverlaufskurven der unterschiedlichen RCP-Szenarien beurteilen, ob das 2°C-Ziel bis zum Jahre 2100 noch erreicht werden kann (AFB 3).

Zusatzaufgaben

Die Schüler*innen können ...

... unterschiedliche Geoengineeringverfahren auf eine mögliche Anwendung mithilfe bestimmter Kriterien beurteilen (AFB 3).

4.5.2. Didaktische und methodische Analyse

Diese Station ist eine Erweiterung zu Station 2 und 3. Im Gegensatz zu den anderen Stationen wird hier kein Versuch im herkömmlichen Sinne durchlebt. Ferner wird die potenzielle Gefährdung, die mit dem Erreichen eines Kippunktes einhergeht, als interaktives Visualisierungsmodell anschaulich dargestellt. Die Lernumgebung besteht aus verschiedenen Lernaufgaben, denen eine didaktischen und methodischen Basis zugrunde liegt. Diese wird im Folgenden näher erläutert:

A. Vorwissen der Schüler*innen

Zum Lösen dieser Station benötigen die Schüler*innen Vorwissen, welches in Station 2 und 3 behandelt wurde. Dazu gehören unter anderem die Funktionsweise des Treibhauseffektes und die Kenntnis, dass es sich bei Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf um Treibhausgase handelt. Zudem werden für diese Station einfache mathematische Kenntnisse in Form einer Dreisatzrechnung benötigt.

B. Lernschritte nach dem Lehr-Lern-Modell

Basierend auf dem erwarteten Vorwissen der Schüler*innen wurde die Station nach dem Lehr-Lern-Modell in folgende Lernphasen gegliedert. Eine Erläuterung der einzelnen Lernphasen wurde in Abschnitt 3.4. dargelegt. Da die benötigten Grundlagen für diese Station bereits in den beiden vorherigen

Stationen aktiviert wurden, wird Phase 2 „Vorwissen aktivieren und Vorstellungen entwickeln“ übersprungen.

Phase 1: Im Lernkontext ankommen

Zu Beginn der Station sollen die Schüler*innen bestimmen, wie stark die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ist und wie stark die globale Durchschnittstemperatur seit Beginn der Industrialisierung angestiegen ist. Der Anstieg von ca. 1°C wirkt für die Schüler*innen erstmal ziemlich gering, da der menschliche Körper einen so geringen Temperaturunterschied gar nicht wahrnimmt. Im Anschluss wird das 2°C-Ziel der UN beim Pariser Klimaabkommen beschrieben. Durch den Vergleich dieses Wissens mit dem Alltagsverständnis von Temperaturschwankungen dieser Größenordnung kommen die Schüler*innen zu folgender Fragestellung: *Wieso soll denn verhindert werden, dass das Klima einen so geringen Grenzwert nicht überschreiten darf? Was macht es denn für einen Unterschied, ob es draußen 2°C wärmer ist?* Diese Fragestellungen stehen im Fokus der Station.

Phase 3: Lernprodukt erstellen

Zur Beantwortung dieser Fragen müssen zuerst die Ursachen für den CO₂-Anstieg in der Atmosphäre etwas genauer betrachtet. Die Schüler*innen sollen den verschiedenen Ursachen ihren Anteil am globalen CO₂-Anstieg zuordnen. Im Anschluss folgt mithilfe eines Erklärvideos ein Input zum anthropogenen Treibhauseffekt und zu den Kipppunkten. Um den Zusammenhang zwischen dem anthropogenen Treibhauseffekt und den Kipppunkten zu verdeutlichen, sollen die Schüler*innen ein interaktives Visualisierungsmodell mit spielerischem Charakter durchführen (siehe Abb. 47). Die Materialien sind im Anhang Abschnitt V.II.IV. zu finden. Bei diesem interaktivem Visualisierungsmodell geben die Schüler*innen Treibhausgase in Form von Holzwürfel in eine Spielfeld-Atmosphäre. Dabei wird demonstriert, dass, wenn der Mensch die 2°C-Grenze überschreitet, die Kippelemente ausgelöst werden und die Temperatur ohne menschlichen Einfluss immer stärker ansteigt. Auf diese Weise wird den Schülerinnen und Schülern verdeutlicht, warum es wichtig ist, dass die 2°C-Grenze nicht überschritten wird und somit kann die problemorientierte Fragestellung beantwortet werden.



Abb. 47: interaktives Visualisierungsmodell zur Veranschaulichung der Kippunkte (eigene Aufnahme)

Den Abschluss dieser Phase bildet das Lernprodukt in Form einer Beurteilung, ob das 2°C-Ziel bis zum Jahre 2100 noch erreicht werden kann. Um dies beurteilen zu können, stehen den Schülerinnen und Schülern die Temperaturkurven der unterschiedlichen RCP-Szenarien zu Verfügung (siehe Abb. 48). Hier wird den Schülerinnen und Schülern gezeigt, wie schwierig es in der Gegenwart ist, dieses Ziel überhaupt einzuhalten. Auf diese Weise wird die ganze Komplexität der Klimawandeldebatte deutlich.

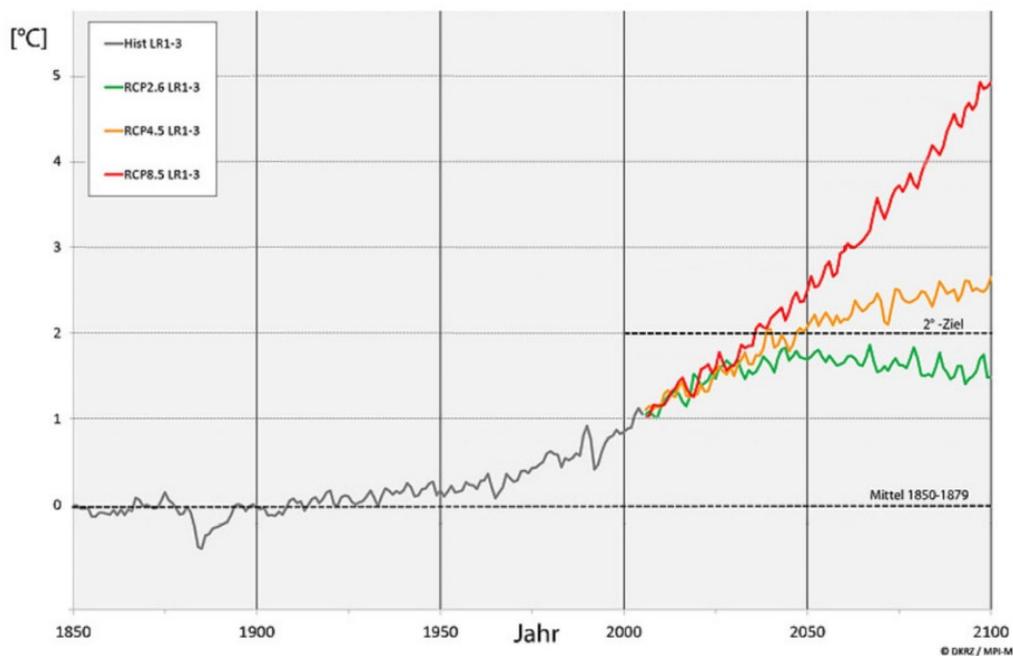


Abb. 48: Temperaturkurven der unterschiedlichen RCP-Szenarien (DKRZ b o.J.)

Phase 4: Anwenden und Üben

Die Zusatzaufgabe befasst sich mit Geoengineering als Lösungsstrategie, um dem Klimawandel entgegenzuwirken. In dieser Phase geht es darum, dass die Schüler*innen die Vor- und Nachteile von drei sehr unterschiedlichen Geoengineering-Verfahren gegenüberstellen und aus Sicht einer Regierung beurteilen, welche Methode sie in ihrem Land einsetzen würden. Diese Station hat das Ziel, den Schülerinnen und Schülern zu zeigen, dass man mit technischen Verfahren den Klimawandel regulieren könnte. Aber gleichzeitig soll aufgezeigt werden, dass solche Verfahren einen starken Eingriff in unser Klima- und Ökosystem darstellen und deshalb mit großen Risiken verbunden sind.

Die konkreten Lernaufgaben der unterschiedlichen Phasen sind im Anhang in Abschnitt V.II.IV. aufgeführt. Bei deren Konzeption wurden die in Abschnitt 3.5. beschriebenen Kriterien berücksichtigt. Im Folgenden wird der Aufbau der Lernaufgaben dieser Station exemplarisch mit ausgewählten Gütekriterien legitimiert:

C. Förderung unterschiedlicher Kompetenzen

Diese Station zielt auf die Förderung folgender Kompetenzen der Bildungsstandards der Physik ab (siehe Abschnitt 3.5.): Die Berechnung des globalen Temperaturanstiegs seit der industriellen Revolution und die Auswertung der Temperaturkurven spricht die Methodenkompetenz an. Bei der Zuordnung von Ursachen des anthropogenen Treibhauseffekts und deren Prozentanteil kommt es zum Teil zur Anwendung von Fachwissen. Die Hauptaufgabe fördert durch die Beurteilung, ob das 2°C-Ziel noch erreicht werden kann, die Beurteilungskompetenz. Diese wird auch bei der Zusatzaufgabe gefördert.

D. Basiskonzepte

Von den Basiskonzepten des naturwissenschaftlichen Unterrichts werden bei der Station die Folgenden angesprochen: „Entwicklung“ und „Wechselwirkung“. Das Basiskonzept „Entwicklung“ wird aufgegriffen, da es durch den Einfluss des Menschen und das Überschreiten von Kippunkten bei dem Klimasystem zu einer irreversiblen Entwicklung kommt. Auch das Basiskonzept „Wechselwirkung“ kommt bei den positiven Rückkopplungseffekten zur Anwendung. So verursacht beispielweise bei der Wasserdampf-Rückkopplung ein Temperaturanstieg eine höhere Treibhauskonzentration in der Atmosphäre und gleichzeitig verursacht eine höhere Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre wiederum einen Temperaturanstieg.

E. Didaktische Reduktion

Eine didaktische Reduktion dient der altersgemäßen Aufbereitung der Lerninhalte (siehe Abschnitt 3.5.). Die Beschränkung auf nur zwei Kippelemente stellt eine solche didaktische Reduktion dar. Hierbei handelt es sich um die Wasserdampf-Rückkopplung und die Permafrostböden. Des Weiteren wird Methan als Treibhausgas nur kurz angesprochen und nicht weiter in der Station im Zusammenhang mit Permafrostböden behandelt.

F. Fehlvorstellungen

In dieser Station wird als Fehlvorstellung erwartet, dass eine Erwärmung von nur wenigen Grad Celsius keine Auswirkungen für den Menschen hat. Dass es sich hierbei um eine Fehlvorstellung handelt, wird anhand der Kippunkte mithilfe des interaktiven Visualisierungsmodells verdeutlicht.

4.6. Station 4: Meeresspiegelanstieg

Die vierte Station trägt den Titel „Ozeanüberwachungszentrale“. Sie beschäftigt sich mit dem Meeresspiegelanstieg als Folge des Klimawandels. Dabei geht es darum, das Schmelzen der Eisschilde und Gletscher sowie die thermische Ausdehnung der Ozeane als Ursachen für den Meeresspiegelanstieg herauszuarbeiten und zu quantifizieren. Des Weiteren soll den Schüler*innen deutlich gemacht werden, dass das Schmelzen des Meereises dagegen keinen Einfluss auf den Meeresspiegel hat. Abbildung 49 zeigt den Aufbau der Station mit dem Versuch und den Elementen des Escape Rooms. Um eine adäquate fachliche und didaktische Herangehensweise erarbeiten zu können, mussten vorweg die zugrundeliegenden Lernziele definiert werden.

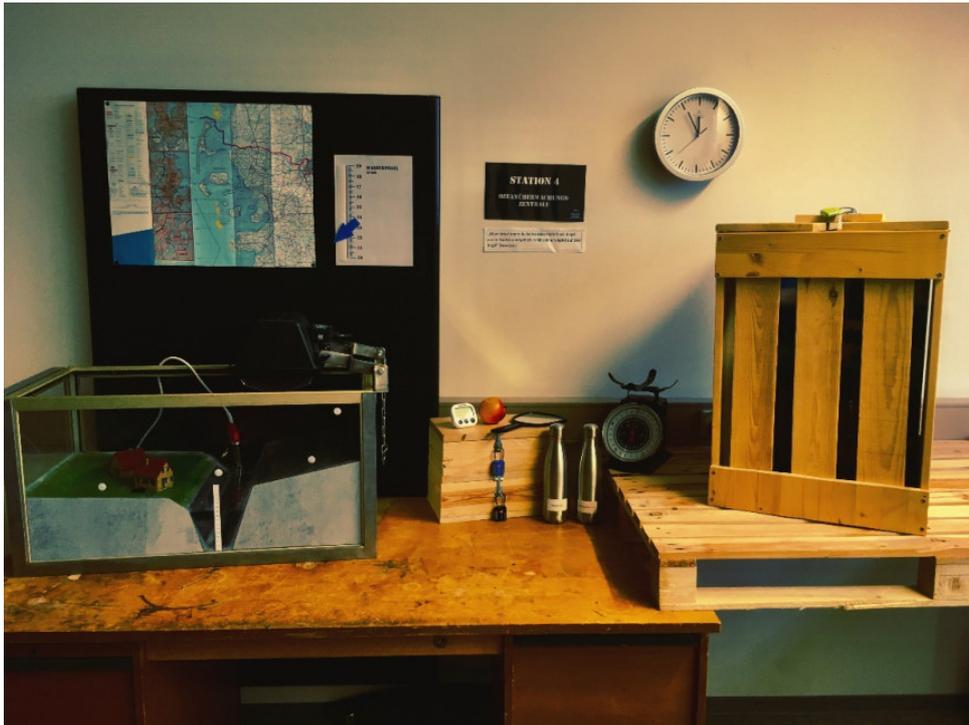


Abb. 49: Aufbau Station 4 (eigene Aufnahme)

4.6.1. Lernziele

Der angestrebte Lernzugewinn der Station wurde mit folgenden Grob- und Feinlernzielen definiert (siehe Kircher 2019: 91f.). Hinter jedem Lernziel befindet sich in Klammern der entsprechende Anforderungsbereich (AFB). Eine Erklärung der einzelnen Anforderungsbereiche befindet sich in Abschnitt 3.5.

Groblernziel:

Die Schüler*innen können die Ursachen des Meeresspiegelanstiegs erläutern und mögliche Folgen für die Küstenregionen beurteilen (AFB 3).

Feinlernziele:

Die Schüler*innen können ...

... können mithilfe von zwei Eisproben den Unterschied zwischen Meer- und Gletschereis bestimmen (AFB 2).

... den Modellelementen Begriffe aus der realen Welt zuordnen (AFB 1).

... den Anstieg des Wasserstandes an den Modellversuchen ablesen, wenn der Eis geschmolzen ist oder sich das Wasser erwärmt hat (AFB 1).

... mithilfe der Versuchsergebnisse die Folge für den Meeresspiegel benennen, wenn das Meereis in der Arktis schmilzt (AFB 1).

... mithilfe der Eismasse, der Wasserdichte und einer Wertetabelle den Anstieg des Wasserstandes im Modellmeer (Versuch Gletscherschmelzen) berechnen (AFB 2).

... bei Abweichungen des berechneten Wertes vom Messwert verschiedene Messfehler benennen (AFB 1).

... mithilfe des Gletschervolumens und einer Wertetabelle den Anstieg des Meeresspiegels berechnen, wenn weltweit alle Gletscher und Eisschilde schmelzen würden (AFB 2).

... mithilfe von vorgegebenen Messwerten und Formeln den Anstieg des Wasserstandes im Modellversuch „thermische Ausdehnung“ berechnen (AFB 2).

... mithilfe von vorgegebenen Messwerten und Formeln den Anstieg des Meeresspiegels durch thermische Ausdehnung für das Jahr 2100 berechnen (AFB 2).

... mithilfe einer interaktiven Karte und einem Kurvendiagramm zum prognostizierten Meeresspiegelanstiegs die Auswirkungen des Meeresspiegels für die deutsche Nordseeküste abschätzen (AFB 2).

... in einem zweiminütigen Informationsvideo die Ursachen des Meeresspiegelanstiegs zusammenfassen und die Folgen für einen Ort an der deutschen Nordseeküste beurteilen (AFB 3).

Zusatzaufgaben

Die Schüler*innen können aus Sicht unterschiedlicher Charaktere ein Dorf an der Nordsee so umgestalten, dass es vor der nächsten Sturmflut sicher ist und ein bestimmtes Budget nicht überschritten wird (AFB 3).

4.6.2. Fachliche Analyse der Versuche

Zur Veranschaulichung des Schmelzens des Meereises und der Gletscher sowie der thermischen Ausdehnung der Ozeane wurden drei Modellversuche konzipiert. Diese werden im Folgenden kurz erläutert: Abb. 50 zeigt den Versuchsaufbau zum Schmelzen der Gletscher. Es handelt sich hierbei um ein Aquarium, das einen Ausschnitt aus einer Landschaft zeigt. Ganz rechts befindet sich



Abb. 50: Versuchsaufbau zum Schmelzen von Gletschereis

eine Schieferplatte, auf der sich das Gletschereis befindet. Dieses Gletschereis wird direkt von einem Halogenstrahler mit einem Kilowatt Leistung beleuchtet. Das geschmolzene Eis läuft die Schieferplatte hinunter und sammelt sich in einem mit Wasser gefüllten Plexiglasbecken. Dieses Becken dient zur Darstellung des Meeres. Links neben dem Modellmeer befindet sich eine schiefe Ebene mit sehr geringem Steigungswinkel. Diese Ebene stellt einen Uferbereich dar, wie er an jeder Küste zu finden ist. Schmilzt das Eis, steigt das Modellmeer und der Uferbereich wird überschwemmt. Der aktuelle Wasserpegelstand kann jederzeit an einer Skala abgelesen werden. Auf diese Weise kann der Meeresspiegelanstieg aufgrund des Gletscherschmelzens anschaulich dargestellt werden.

Bei der Konzeption des Versuchs mussten einige Dinge beachtet werden. Damit der Versuch eine gewisse Langlebigkeit besitzt und das Wasser nicht in die Unterkonstruktion aus Holz eindringt, wurden die Oberflächen zementiert und die Fugen mit Silikon ausgespritzt. Das Modellmeer wurde zusätzlich mit Plexiglas ausgekleidet. Die größte Schwierigkeit, die es bei diesem Versuch zu lösen gab, ist die lange Zeit, die das Eis zum Schmelzen benötigt. Erste Versuche zeigten, dass die Schmelzzeit teilweise über 30 Minuten betrug. Dieses Zeitdeputat ist in einem Schülerlabor nicht vorhanden, weshalb Lösungen gefunden werden mussten, um die Zeit zu verkürzen. Um das zu erreichen, wurde zum einen eine Schieferplatte als Untergrund benutzt. Diese weist aufgrund ihrer dunklen Farbe eine niedrige Albedo und eine geringe Wärmekapazität auf, das heißt, sie erreicht in kürzester Zeit hohe Temperaturen. Damit das Eis auch von unten erwärmt wird, wird der Strahler bereits 10 Minuten, bevor das Eis auf die Schieferplatte gelegt wird, eingeschaltet. Des Weiteren konnte die Schmelzzeit verkürzt werden, indem kein fester Eisklotz verwendet, sondern das Eis vorher mit einem Eiscrasher zerkleinert wird. Auf diese Weise wird die Oberfläche des Eises, die Kontakt mit der warmen Luft hat, vergrößert. So konnten folgende Schmelzzeiten gemessen werden:

Tab. 9: Probemessungen zur Schmelzzeit des Gletschereises

Messung	Masse	Schmelzzeit
Messung 1	500 g	6:30 Min.
Messung 2	750 g	7:00 Min.
Messung 3	750 g	8:00 Min.
Messung 4	1000 g	12:00 Min.

Es wird bei der Messung deutlich, dass die vorherige Schmelzzeit von 30 Minuten mehr als halbiert werden konnte. Diese Zeitdauer ist für das Schülerlabor adäquat. Bei diesem Versuch findet vor der Versuchsdurchführung eine quantitative Berechnung des Meeresspiegelanstiegs bei einem festen Eisvolumen statt. Diese Berechnung ist für eine Mittelstufenklasse nicht so einfach umsetzbar, da der überschwemmte Uferbereich sehr ungleichmäßig aufgebaut ist und es deshalb nicht zu einer linearen Volumenzunahme kommt. Hierbei wurde sich mit einer Tabelle beholfen, die angibt, welches Wasservolumen eine Höhenzunahme des Meeresspiegels um 1 Zentimeter entspricht (siehe Tab. 10). Diese Tabelle wurde durch eine genaue Messung am Modell erstellt. Die Ungenauigkeit beträgt dabei ± 2 ml. Auf diese Weise kann der Meeresspiegelanstieg von den Schülerinnen und Schülern bis auf wenige Millimeter genau vorhergesagt werden.

Tab. 10: Zusammenhang zwischen Wasservolumen und Anstieg des Wasserspiegels beim Versuch Gletscherschmelzen

Benötigte Menge an Wasser bei einem Anstieg ...	
Von 0 auf 1 mm	60 ml
Von 1 auf 2 mm	75 ml
Von 2 auf 3 mm	88 ml
Von 3 auf 4 mm	100 ml
Von 4 auf 5 mm	100 ml
Von 5 auf 6 mm	100 ml
Von 6 auf 7 mm	110 ml
Von 7 auf 8 mm	115 ml
Von 8 auf 9 mm	115 ml
Von 9 auf 10 mm	140 ml

Die geringe Abweichung ist durch Verdunstung, ungenaues Messen und Wasserrückstände in den Behältern zu erklären.

Für den Versuch „Schmelzen des Meereises“ kann derselbe Versuchsaufbau wie beim Schmelzen des Gletschereises verwendet werden. Dieses Mal werden der Modellgletscher und der Halogenstrahler nicht benötigt. Füllt man das Modellmeer mit Eiswürfeln bis zu einem gewissen Wasserstand auf, kann man an der Skala beobachten, dass sich beim Schmelzen dieser der Wasserstand nicht erhöht. Dabei ist es wichtig, dass die Eiswürfel im Meer schwimmen. Auch bei diesem Versuch gab es ein Problem mit langen Schmelzzeiten. Aus diesem Grund wurde im Aquarium ein Tauchsieder eingebaut, der vor dem Versuch eingeschaltet wird. So ist das Wasser, das sich im Becken befindet, leicht erwärmt. Auf diese Weise können geringe Schmelzzeiten von 2 bis 3 Minuten erreicht werden.

Der dritte Versuch der Station zeigt die thermische Ausdehnung von Meerwasser (siehe Abb. 51). Der Versuch besteht aus einem Erlenmeyerkolben mit Stopfen, in dem sich ein dünnes Glasröhrchen befindet. Der Erlenmeyerkolben ist komplett mit Wasser gefüllt. Das Wasser füllt dabei noch die Hälfte

des Glaseröhrchens. Wird nun in die Glasschale, in dem sich der Erlenmeyerkolben befindet, heißes Wasser eingefüllt, steigt der Wasserpegel in dem Glasrohr an. Der Anstieg kann an einer Skala am Röhrrchen und die Temperatur des Wassers an einem Thermometer im Erlenmeyerkolben abgelesen werden. Bei der Versuchsdurchführung wird der Anstieg im Röhrrchen für eine 5°C Erwärmung gemessen.

Der Anstieg des Wasserstandes kann bei diesem Versuch ganz einfach berechnet werden. Das Volumen des Erlenmeyerkolbens wird mithilfe eines Messzylinders auf 2,15 Liter bestimmt. Dabei ist das Volumen des Röhrrchens so gering, dass es vernachlässigt werden kann. Für die Volumenzunahme ergibt sich:

$$\Delta V = V \cdot \gamma = 2,15l \cdot 0,00021/K = 2257,5 \text{ mm}^3$$

mit ΔV : Volumenzunahme, V : Wasservolumen, $\gamma = 0,00021/K$: Volumenausdehnungskoeffizient von Wasser bei Raumtemperatur

Das Röhrrchen hat einen Durchmesser von 4 mm, woraus sich für die Höhenzunahme ergibt:

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{\pi r^2} = \frac{2257,5 \text{ mm}^3}{\pi \cdot (2 \text{ mm})^2} = 17,9 \text{ cm}$$

Dieses Ergebnis liegt im Fehlerbereich der Messungen aus Tabelle 11.

Tab. 11: Probemessungen zur Volumenausdehnung von Wasser bei einem Temperaturunterschied von 5°C

Messung	Anstieg in cm
Messung 1	15,2 ± 6,0
Messung 2	10,8 ± 6,0
Messung 3	14,7 ± 6,0
Messung 4	18,2 ± 6,0

Die Ungenauigkeiten kommen durch verschiedene Fehler zustande. Dazu gehört beispielsweise, dass das Wasser im Erlenmeyerkolben nicht gleichmäßig erwärmt wird, wodurch die Angabe auf dem Thermometer um mehrere Grad abweichen kann. Zudem wirken sich kleine Messungenauigkeiten stark aus. Wäre beispielsweise das Röhrrchen nur 1 mm breiter, wäre ein Anstieg von nur 11,4 cm zu erwarten.



Abb. 51: Versuch „thermische Ausdehnung von Wasser (eigene Aufnahme)

Bei der Konzeption des Versuchs war es wichtig, dass das Wasservolumen des Erlenmeyerkolbens groß im Vergleich zum Durchmesser des Röhrchens ist. Auf diese Weise konnte ein Wasseranstieg erzeugt werden, der groß genug ist, um ihn auf einer Skala messen zu können. Mit der obigen Formel wurde deshalb im Vorfeld die ideale Größe des Röhrchendurchmessers auf 4 mm bestimmt. Zu Beginn wurde versucht, den Versuchsaufbau mithilfe eines zylinderförmigen Gefäßes statt eines Erlenmeyerkolbens umzusetzen. Dieser Aufbau hat den Vorteil, dass die Schüler*innen das Volumen des Gefäßes selbst berechnen können. Hierbei ergibt sich das Problem, dass es nicht möglich war, das Gefäß wasserdicht zu verschließen, weshalb der Wasserstand im Strohhalm nach kurzer Zeit absank. Aus diesem Grund wurde sich für den Erlenmeyerkolben mit Stopfen entschieden. Dieser hält absolut wasserdicht und ist zudem leicht zu entfernen, um nach dem Versuchstag das Wasser zu entleeren. Des Weiteren wurde eine Wärmeplatte als Alternative zum heißen Wasser als Wärmequelle getestet. Hierbei konnte durch einige Testläufe festgestellt werden, dass durch die heiße Flüssigkeit das Wasser im Erlenmeyerkolben gleichmäßiger erwärmt werden konnte. Aus diesem Grund wurde sich gegen eine Heizplatte entschieden.

4.6.3. Didaktische und methodische Analyse

Damit den konzipierten Versuchen ein Bildungsgehalt abgewonnen werden kann, müssen diese in eine kontextorientierte Lernumgebung eingebettet werden. Die Lernumgebung besteht aus verschiedenen Lernaufgaben, denen eine didaktischen und methodischen Basis zugrunde liegt. Diese wird im Folgenden näher erläutert:

A. Vorwissen der Schüler*innen

Im Rahmen dieser Lernaufgaben benötigen die Schüler*innen folgendes Vorwissen: In dieser Station sollen die Schüler*innen mehrere Berechnungen durchführen. Dafür wird vorausgesetzt, dass sie einfache Formeln nach einer unbekanntem Größe umstellen können. Des Weiteren wird an das Themenfeld 3 „Thermische Ausdehnung in Experiment und Modell“ des rheinland-pfälzischen Lehrplans angeknüpft (vgl. MBWWK 2014: 104ff.). Dieses Themenfeld wird durch Berechnungen mit den Formeln $m = \rho \cdot V$ und $\Delta V = V \cdot \gamma$ (mit γ : Wärmeausdehnungskoeffizient) aufgegriffen. Neben physikalischen Vorkenntnissen sind bei dieser Station auch mathematische gefragt. Hier wird vorausgesetzt, dass die Schüler*innen bei einem gegebenen Durchmesser die Kreisfläche eines Kreises bestimmen können.

B. Lernschritte nach dem Lehr-Lern-Modell

Basierend auf dem erwarteten Vorwissen der Schüler*innen wurde die Station nach dem Lehr-Lern-Modell in die folgenden Lernphasen gegliedert. Im Fokus dieser Station stehen drei voneinander unabhängige Versuche. Da beispielweise die Aktivierung des Vorwissens und die Erarbeitung des Lernproduktes für jeden der Versuche individuell konzipiert wurde, kommt es zu Wiederholungen der Lernphasen.

Phase 1: Im Lernkontext ankommen

Zu Beginn der Station sollen die Schüler*innen eine geheime Botschaft finden, die in einem Kunststoffapfel versteckt ist. Mit der Botschaft werden sie in den Lernkontext eingeführt. Dabei geht es um das kleine Dorf Halebüll in der Nähe von Husum an der Nordsee. Die Bewohner*innen sind verunsichert wegen des ansteigenden Meeresspiegels. Daraus ergibt sich für die Schüler*innen die problemorientierte Fragestellung: „Wie hoch wird der Meeresspiegel in den nächsten 100 bzw. 200 Jahren ansteigen?“. Dabei sollen 3 mögliche Ursachen untersucht werden: das Schmelzen des Meereises, das Schmelzen des Gletschereises und die thermische Ausdehnung des Meeres. Da die Lage des Ortes am Meer für die Station wichtig ist und damit die Schüler*innen einen Bezug zu diesem Ort bekommen, besteht ihre Aufgabe darin, diesen auf der Landkarte zu verorten und die Koordinaten anzugeben.

Phase 2: Vorwissen aktivieren und Vorstellungen entwickeln (Schmelzen des Meereises)

In dieser Phase geht es zuerst darum, eine Vorstellung aufzubauen, was Gletscher- und Meereis voneinander unterscheidet. Die Schüler*innen haben den Auftrag sich zwischen drei Antworten für die richtige Definition von Meereis zu entscheiden. Dazu stehen ihnen zwei Proben mit Gletscher- und Meereis zu Verfügung. Durch einen Geschmackstest kann bestimmt werden, dass es sich bei Meereis um gefrorenes Salzwasser handelt und daraus auf die richtige Lösung geschlossen werden. Im nächsten Schritt findet der Übergang vom Real- in den Modellraum statt, indem die Schüler*innen die beiden Begriffskärtchen „Dorf“ und „Meer“ an die passende Stelle ans Aquarium anheften. Danach stellen die Schüler*innen eine Vermutung auf, wie stark das Wasser im Aquarium infolge des Schmelzens der schwimmenden Eiswürfel steigen wird. Dafür sollen sie einen Pfeil an eine Skala anheften.

Phase 3: Lernprodukt erstellen (Schmelzen des Meereises)

Um die aufgestellte Vermutung zu überprüfen, wird der Versuch „Schmelzen des Meereises“ durchgeführt. Die Versuchsdurchführung wurde bereits in Abschnitt 4.6.2. erläutert. Dabei ist kein Anstieg des Wasserstands zu beobachten. Da die meisten Schüler*innen einen Anstieg des Wasserstandes erwarten, ist es wichtig das Ergebnis zu deuten. Aus zeitlichen Gründen geschieht dies mithilfe eines Videos, in dem anschaulich erklärt wird, wieso es zu keinem Anstieg kam. Darauf aufbauend sollen die Schüler*innen die Frage beantworten, welcher Anstieg beim Schmelzen des Meereises zu erwarten wäre. So findet ein Rücktransfer zum Realraum statt.

Phase 4: Vorwissen aktivieren und Vorstellungen entwickeln (Schmelzen des Gletschereises)

Nachdem der erste Versuch durchgeführt wurde, beginnt der experimentelle Algorithmus von vorne, indem wieder ein Transfer vom Real- in den Modellraum stattfindet. Dafür werden am Aquarium die beiden Begriffe „Gletscher“ und „Sonne“ ergänzt. Danach wird eine Vermutung aufgestellt. Anders als beim vorherigen Versuch sollen die Schüler*innen einen potenziellen Wasseranstieg im Modellversuch genau berechnen. Dabei hilft ihnen die Tabelle, welche die Beziehung zwischen Volumen und Anstiegshöhe beschreibt (siehe Tab. 10). Der berechnete Wert wird auf der Skala markiert.

Phase 5: Lernprodukt erstellen (Schmelzen des Gletschereises)

Danach folgt die Versuchsdurchführung wie bereits in Abschnitt 4.6.2. beschrieben. Sollte der gemessene Anstieg von dem vorher berechneten abweichen, werden im Anschluss mögliche Fehler diskutiert. Auch hier findet ein Rücktransfer in den Realraum statt. Dies geschieht mit einer Aufgabe, in der die Schüler*innen berechnen sollen, wie weit der Meeresspiegel ansteigen wird, wenn alle Landgletscher und Eisschilde schmelzen würden. Dabei ist der Rechenweg analog wie bei der Hypothesenbildungsphase bis auf die Ausnahme, dass andere Werte bei dem Eisvolumen und der Tabelle verwendet werden (siehe Tab. 12). Die berechneten Werte stimmen gut mit den wissenschaftlichen Werten überein. Im Anschluss wird explizit betont, dass ein solches

Tab. 12: Zusammenhang zwischen Wasservolumen der Ozeane und Anstieg des Meeresspiegels

Benötigte Menge an Wasser bei einem Anstieg ...	
Von 0 auf 10 m	3,65 Mill. km ³
Von 10 auf 20 m	3,67 Mill. km ³
Von 20 auf 30 m	3,69 Mill. km ³
Von 30 auf 40 m	3,71 Mill. km ³
Von 40 auf 50 m	3,74 Mill. km ³
Von 50 auf 60 m	3,76 Mill. km ³
Von 60 auf 70 m	3,78 Mill. km ³
Von 70 auf 80 m	3,80 Mill. km ³
Von 80 auf 90 m	3,82 Mill. km ³
Von 90 auf 100 m	3,84 Mill. km ³

Gletscherschmelzen nicht in den nächsten 100 Jahren zu erwarten ist, sondern nur ein Anstieg von 10 bis 20 cm bis 2100 (vgl. Abschnitt 2.4.2.).

Phase 6: Vorwissen aktivieren und Vorstellungen entwickeln (Thermische Ausdehnung des Meeres)

Zu Beginn des letzten Versuchsteils der Station sollen die Schüler*innen ein Schloss knacken, um eine Kiste zu öffnen, in der sich der Versuch befindet. Dafür sollen sie rechnerisch eine Kreisfläche bestimmen. Auf diese Weise wird ihr mathematisches Vorwissen aktiviert. Sie benötigen die Kreisfläche für weitere Berechnungen, da es sich um die Innenkreisfläche des Glasröhrchens handelt. In diesem Versuchsteil startet der experimentelle Algorithmus von vorne, indem ein Transfer in den Realraum stattfindet. In diesem Fall werden wieder Begriffskärtchen dem Versuch zugeordnet. Durch die Berechnung, wie hoch der Wasserspiegel bei der Versuchsdurchführung ansteigen müsste, ist ein Erwartungshorizont gegeben. Dabei wird die in Abschnitt 4.6.2. beschriebene Berechnung verwendet.

Phase 7: Lernprodukt erstellen (Thermische Ausdehnung des Meeres)

Dieser Erwartungshorizont wird mit dem Versuch „thermische Ausdehnung von Wasser“ überprüft. Die Beschreibung der Versuchsdurchführung ist Abschnitt 4.6.2. zu entnehmen. Sollte das Versuchsergebnis stark von der Hypothese abweichen, kommt es zu einer Fehlerdiskussion. Danach findet ein Rückbezug zum Realraum mit einer Rechenaufgabe statt. Die Schüler*innen sollen den Meeresspiegelanstieg bestimmen, wenn sich die Ozeane bis 2100 um 0,5K durchschnittlich erwärmen würden.

Im Anschluss wird über das Schicksal von Halebüll diskutiert. Dafür sollen die Schüler*innen aus einem Graphen, in dem der zukünftige Meeresspiegel von die RCP 2.6 und 8.5 dargestellt ist, den Meeresspiegelanstieg für die nächsten 100 und 200 Jahre ablesen. Dabei verwenden sie eine Karte, bei der man die Meeresspiegelhöhe selbst einstellen kann, um herauszufinden wie stark Halebüll davon betroffen ist (siehe <http://flood.firetree.net/> . Des Weiteren wird geschaut, wie sicher Halebüll bei einem Meeresspiegelanstieg vor Sturmfluten ist. Das geschieht analog wie bei der vorherigen Aufgabe mit der Besonderheit, dass auf den Meeresspiegel 2 m addiert werden. Dies entspricht der Höhe von durchschnittlichen Wellen bei Sturmfluten.

Eine Sicherung durch ein Lernprodukt geschieht mithilfe eines Kurzvideos von maximal zwei Minuten Länge. In diesem sollen die Schüler*innen die Einwohner*innen von Halebüll über die Ursachen des Meeresspiegelanstiegs informieren und mögliche Folgen für den Ort beurteilen. Auf diese Weise wird der Inhalt der Station reflektiert und von den Schülerinnen und Schülern zusammengefasst. Zudem wird die problemorientierte Fragestellung beantwortet.

Phase 8: Anwenden und Üben

In der Zusatzaufgabe geht es darum, das neue Wissen anzuwenden. Nachdem in der Station herausgefunden wurde, dass Teile von Halebüll in Zukunft unter Wasser stehen werden, sollen die Schüler*innen Gegenmaßnahmen zum steigenden Wasserspiegel diskutieren. Hierfür nehmen sie eine von drei Rollen ein (Dorfbewohner*in, Politiker*in, Küstenschutzbeauftragte*r). Neben einem gewissen Geldbudget stehen ihnen die Möglichkeiten Umsiedlung oder Bau von weiteren Deichen zur Verfügung. Auch eine Hybridlösung ist dabei möglich. Diese Maßnahmen können direkt beim Modelldorf im Aquarium umgesetzt werden



Abb. 52: Modelldorf mit möglichen Küstenschutzmaßnahmen (eigene Aufnahme)

(siehe Abb. 52). Dafür stehen Modelldämme und Tetrapoden zur Verfügung. Mit der Wellenmaschine können Sturmfluten simuliert werden. Hat sich die Gruppe für eine Lösung entschieden, wird diese mithilfe eines Fotos vom Modelldorf gesichert.

Die konkreten Lernaufgaben der unterschiedlichen Phasen sind im Anhang in Abschnitt V.II.V. aufgeführt. Bei deren Konzeption wurden die in Abschnitt 3.5. beschriebenen Kriterien berücksichtigt. Im Folgenden wird der Aufbau der Lernaufgaben dieser Station exemplarisch mit ausgewählten Gütekriterien legitimiert:

C. Lebensweltbezug

Ein Lebensweltbezug wird durch den Kontext hergestellt. Im Kontext geht es um das Schicksal des Ortes Halebüll. Dies ist ein realer Ort, der stellvertretend für einen typischen Ort an der deutschen Nordsee steht. Viele Schüler*innen haben bereits an der Nordsee ihre Ferien verbracht und haben deshalb einen emotionalen Bezug dazu in Form von Urlaubserinnerungen. Auf diese Weise wird zusätzliches Interesse an der Station geweckt.

D. Förderung unterschiedlicher Kompetenzen

Diese Station greift folgende Kompetenzen der Bildungsstandards der Physik (siehe Abschnitt 3.5.) auf: Durch das Umstellen der Formeln und berechnen der verschiedenen Größen sollen die Schüler*innen bereits erlerntes Fachwissen anwenden. Bei der Versuchsdurchführung sowie beim Messen der

Eismasse und des Wasserstandes werden experimentelle Methodenkompetenzen gefördert. Die Beurteilungskompetenz wird bei der Hauptaufgabe angesprochen, in der sie die möglichen Folgen für den Ort beurteilen sollen. Eine verstärkte Förderung der Kommunikationskompetenz stellt die Zusatzaufgabe dar, da die Schüler*innen aus verschiedenen Blickwinkeln über unterschiedliche Rettungsmaßnahmen diskutieren sollen.

E. Basiskonzepte

Von den Basiskonzepten des naturwissenschaftlichen Unterrichts (siehe Abschnitt 3.5.) werden bei der Station die Folgenden angesprochen: „System“, „Wechselwirkung“ und „Energie“. Das Basiskonzept „System“ wird in den Lernaufgaben durch die wechselseitige Interaktion der Subsysteme Atmosphäre, Kryosphäre und Hydrosphäre aufgegriffen. Eine Erwärmung des Systems Atmosphäre hat beispielsweise Auswirkungen auf das System Hydrosphäre und Kryosphäre. Damit wird die Wechselwirkung der unterschiedlichen Systeme deutlich, was durch das gleichnamige Basiskonzept „Wechselwirkung“ beschrieben werden kann. Die Bezüge zum Basiskonzept „Energie“ werden erkenntlich durch die verschiedenen Umwandlungsprozesse, die in den Experimenten geschehen. So beginnt die Umwandlung der Energie bereits in dem Halogen-Strahler, wo elektrische in thermische Energie umgewandelt wird. Die hierbei entstandene Wärmeenergie wird in Form von elektromagnetischer Strahlung und zu geringen Anteilen durch Konvektion bis zum „Gletscher“ transportiert. Hier wird ein Teil der Energie reflektiert und ein Teil absorbiert. Der absorbierte Anteil führt zu einer Erhöhung der Bewegungsenergie der Wasser- bzw. Eismoleküle, bis es schließlich zu schmelzen beginnt.

F. Didaktische Reduktion

Eine didaktische Reduktion dient der altersgemäßen Aufbereitung der Lerninhalte (siehe Abschnitt 3.5). Sie findet beispielsweise bei den Berechnungen statt. So wurden bei der Berechnung, wie hoch der Meeresspiegel ansteigt, wenn die Gletscher schmelzen, nicht alle Faktoren berücksichtigt. Ein berechtigter Einwand wäre unter anderem, dass die Erde kugelförmig ist und sich somit die Fläche mit steigender Höhe vergrößert. Da dieser Effekt keinen signifikanten Einfluss auf die Berechnung hat, wurde er vernachlässigt. Auch bei der Berechnung der thermischen Ausdehnung wurden Simplifizierungen vorgenommen. Erstens wurde von einer gleichmäßigen Erwärmung der Meere ausgegangen. Dies ist in der Realität nicht der Fall, da es je nach Meerestiefe und geographischer Breite Unterschiede gibt. Zweitens wurde die Tatsache, dass der Volumenausdehnungskoeffizient abhängig von der Temperatur ist, vernachlässigt, da die dadurch entstehenden Abweichungen gering sind. Eine weitere Reduktion findet beim Schmelzen des Meereises statt. Da das Meereis, aufgrund seines geringeren

Salzgehalt eine geringere Dichte als das Meerwasser aufweist, ist beim Schmelzen ein Anstieg im Mikrometerbereich zu erwarten (siehe Abschnitt 4.6.1.). Da dieser Anstieg so gering ist, dass er in dem von uns gewählten experimentellen Setup für das menschliche Auge nicht visualisiert werden kann, wurde auf eine Erklärung dieses Effekts verzichtet.

G. Fehlvorstellungen

Des Weiteren ist es aus didaktischer Sicht relevant, sich mögliche Fehlvorstellungen der Schüler*innen bewusst zu machen. Dadurch können diese gezielt durch Lernaufgaben beseitigt werden. Eine typische Fehlvorstellung könnte beim Meeresspiegelanstieg die Vorstellung sein, dass das Schmelzen des Meereseises zu einem Anstieg des Meeresspiegels führt. Durch die Hypothesenbildung, in der die Schüler*innen den Anstieg durch das Schmelzen der Eiswürfel abschätzen sollen, wird diese Fehlvorstellung aktiviert. Bei der Versuchsdurchführung werden Schüler*innen direkt damit konfrontiert, da kein Anstieg zu messen ist. Dieser Widerspruch zu ihrer Vorstellung wird mit dem Erklärvideo aufgelöst.

4.7. Station 5: Ozeanversauerung und die Erwärmung der Ozeane

Die fünfte Station trägt den Titel „Abteilung für Ozeanwasserchemie“. Sie beschäftigt sich mit der Erklärung des Treibhauseffektes. Das Thema dieser Station ist die Ozeanversauerung als Folge des Klimawandels. Ziel dieser Station ist es, dass sich die Schüler*innen mit den Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels auf den pH-Wert des Ozeans sowie den daraus resultierenden Rückkopplungseffekten beschäftigen. Abbildung 53 zeigt den Aufbau der Station mit dem Versuch und den Elementen des Escape Rooms. Um eine adäquate fachliche und didaktische Herangehensweise erarbeiten zu können, mussten vorweg die zugrundeliegenden Lernziele definiert werden.

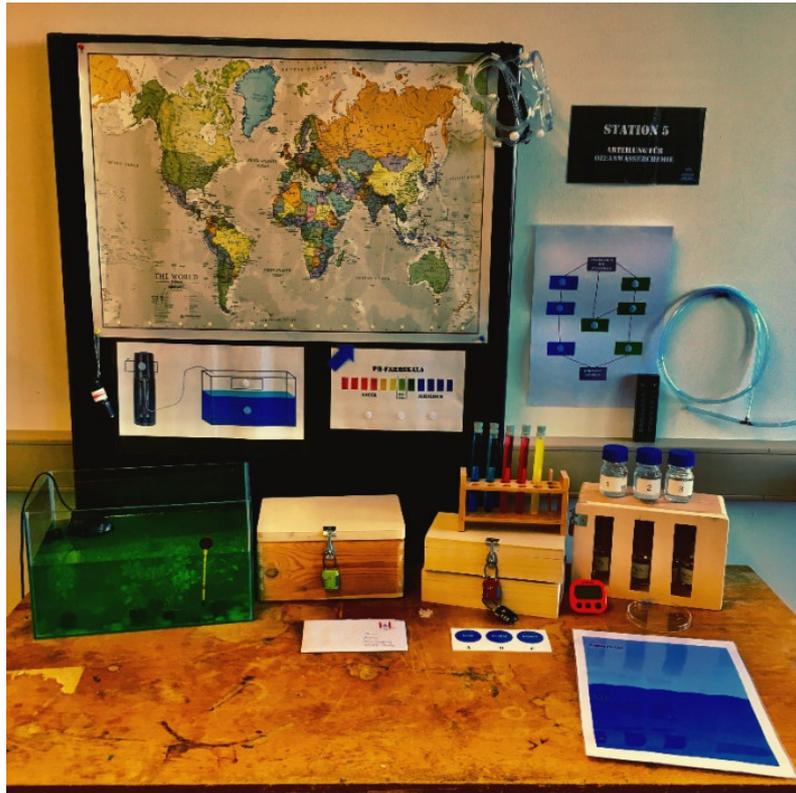


Abb. 53: Aufbau Station 5 (eigene Aufnahme)

4.7.1. Lernziele

Der angestrebte Lernzugewinn der Station wurde mit folgenden Grob- und Feinlernzielen definiert (siehe Kircher 2019: 91f.). Hinter jedem Lernziel befindet sich in Klammern der entsprechende Anforderungsbereich (AFB). Eine Erklärung der einzelnen Anforderungsbereiche befindet sich in Abschnitt 3.5.

Groblernziel:

Die Schüler*innen können die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels auf den pH-Wert des Ozeans sowie daraus resultierende Folgen auf das Ökosystem „Ozean“ und Rückkopplungsprozesse erläutern (AFB 2)

Feinlernziele:

Die Schüler*innen können ...

... das Great-Barrier-Reef auf einer Weltkarte verorten (AFB 1).

... mithilfe eines pH-Indikator den pH-Wert einer Flüssigkeit bestimmen (AFB 2).

... an dem Modellversuch „Ozeanversauerung“ Begriffe aus dem Realraum dem Modell zuordnen (AFB 1).

... mithilfe einer Farbcodeskala den pH-Wert einer Flüssigkeit bestimmen (AFB 2).

... auf Grundlage der Versuchsergebnisse eine Formulierung zu den Auswirkungen von Kohlenstoffdioxid auf das Meerwasser ergänzen (AFB 2).

... eine Reaktionsgleichung aufstellen, welche die Reaktion zwischen Kohlenstoffdioxid und Wasser beschreibt (AFB 2).

... auf Grundlage der Versuchsergebnisse eine Formulierung über den Zusammenhang zwischen Temperatur und CO_2 -Aufnahmekapazität des Meeres ergänzen (AFB 2).

... Werte aus einer Wertetabelle einem Funktionsgraphen zuordnen (AFB 2).

... aus einem Graphen die Koordinaten eines Ereignisses bestimmen (AFB 2).

... mithilfe einer Schablone und unterschiedlichen Begriffskärtchen ein Wirkungsgefüge gestalten (AFB 2).

Zusatzaufgaben

Die Schüler*innen können ...

... einen Versuch durchführen, bei dem sie mithilfe von Chemikalien eine Lösung entsauern (AFB 2).

... beurteilen, welche der beiden Möglichkeiten der Entsauerung sie aus Sicht eines wissenschaftlichen Beraters der Regierung auswählen würden (AFB 3).

4.7.2. Fachliche Analyse der Versuche

Diese Lernziele sollen mithilfe zweier zentralen Versuchsaufbauten umgesetzt werden. Beim ersten zentralen Versuch soll erarbeitet werden, dass ein höherer Kohlenstoffdioxidgehalt in der Atmosphäre zu einer Versauerung der Ozeane führt. Der zweite Versuch hat die Aufgabe zu zeigen, dass kälteres Wasser stärker versauert als wärmeres.

Bei dem ersten Versuch wird eine Glasbecken mit Wasser gefüllt (siehe Abb. 54). Damit man den Effekt der Versauerung gut sehen kann, wurde das Wasser mit einem Flüssigindikator eingefärbt. Hierfür dient der Indikator von Mc-Crumb. Dieser Indikator hat den Vorteil, dass schon bei geringen pH-Wert-Änderungen ein Wechsel der Wasserfarbe zu beobachten ist. Das Becken wird zu 75 % mit Wasser gefüllt, sodass darüber eine Luftschicht vorhanden ist, die als Atmosphäre

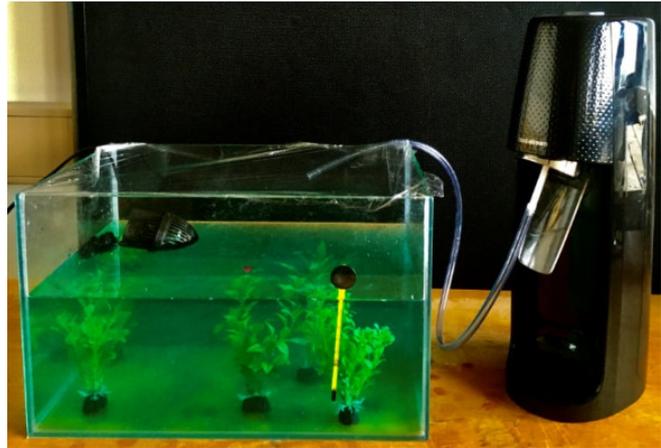


Abb. 54: Versuchsaufbau 1 „Versauerung der Ozeane“
(eigene Aufnahme)

dient. In dem Becken ist eine Wellenmaschine eingebaut. Diese sorgt dafür, dass ein schnellerer Austausch von Kohlenstoffdioxid zwischen Luftschicht und Wasser stattfindet. Ihr Einsatz kann damit begründet werden, dass auch die Weltozeane nicht ruhig, sondern in Bewegung sind. Das gesamte Becken wird schließlich mit einer durchsichtigen Folie abgedeckt, damit das CO_2 nicht in die Umgebungsluft entweicht. Mithilfe eines Sodastreams wird bei der Versuchsdurchführung CO_2 in das Becken gegeben. Zu Beginn hat das Wasser einen pH-Wert von 8. Nach kurzer Zeit verringert sich der pH-Wert des Wassers auf einen pH-Wert von 6 bis 7. Dabei kommt es auf die Menge an Kohlenstoffdioxid an, die in die Atmosphäre eingeströmt wird. Es kommt zum CO_2 -Partialdruckausgleich zwischen dem Wasser und der darüberliegenden Luftschicht. Das CO_2 reagiert mit dem Wasser und es kommt zur Bildung von Kohlensäure ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$), die sich in H^+ -Ionen und Hydrogenkarbonat-Ionen ($\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$) aufspaltet. Das führt zu einer Absenkung des pH-Wertes (siehe Abschnitt 2.4.3.).

Dabei ist zu beachten, dass bei dem Versuch eine größere pH-Wert-Absenkung gemessen wird als es in der Realität der Fall ist. Diese wird von 8,0 auf einen Wert zwischen 7,8 und 7,9 bis zum Ende des Jahrhunderts geschätzt (vgl. DKRZ o.J.). Um eine realitätsnahe Versuchsdurchführung zu machen, müsste statt einem Indikator ein pH-Messgerät verwendet werden, was den pH-Werte auf zwei Dezimalstellen genau misst. Des Weiteren müsste der Kohlenstoffdioxidgehalt in der Luftschicht genau gemessen werden und dürfte eine 400-ppm-Grenze nicht überschreiten. Da der Versuch nicht zur Aufnahme von Messdaten dient, sondern zur Demonstration des Effektes und eine Berechnung der pH-Wert-Absenkung für die Mittelstufe zu komplex ist, wurde auf einen solchen Versuchsaufbau verzichtet. Des Weiteren wurde nicht wie in der Realität Salzwasser, sondern Leitungswasser verwendet. Die Verwendung von Salzwasser würde einen Mehraufwand mit sich führen, der keinerlei Auswirkungen auf das Versuchsergebnis hätte.

Der zweite Hauptversuch der Station (siehe Abb. 55) besteht aus zwei Glasbecken, die mit Wasser unterschiedlicher Temperatur gefüllt werden. In das eine Becken kommt Wasser mit einer Temperatur zwischen 10° und 15°C und in das andere Wasser mit einer Temperatur zwischen 70° und 80°C. Beide Küvetten werden mit dem Flüssigindikator eingefärbt und mit einer Folie abgedeckt. Das Wasser hat in beiden Behältern einen pH-Wert von 8. An den Sodastream wird ein Schlauch montiert, der sich mithilfe eines T-Stückes in zwei Schläuche aufteilt (siehe Abb. 56). Auf diese Weise strömt an beiden Öffnungen ungefähr die gleiche Menge an CO₂ aus. Bei der Versuchsdurchführung wird in die Luftschicht beider Becken mithilfe des Schlauchs die gleiche Menge an CO₂ eingeströmt. Dabei ist zu beobachten, dass das Becken mit dem kalten Wasser einen niedrigeren pH-Wert von 6 annimmt, während das Becken mit dem warmen Wasser einen pH-Wert von 7 hat. Dieser Effekt resultiert aus dem Prinzip von LE CHATELIER (siehe Abschnitt 2.4.3.).

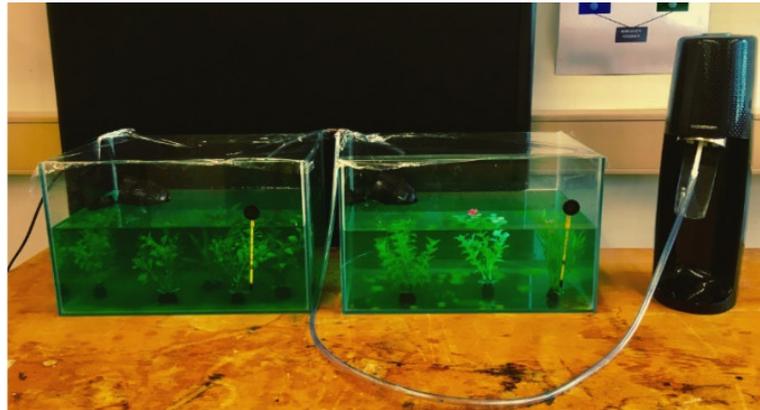


Abb. 55: Versuchsaufbau 2 „Versauerung der Ozeane bei unterschiedlichen Wassertemperaturen“ (eigene Aufnahme)

Damit dieser Versuch einwandfrei funktioniert, musste beim Setup folgendes beachtet werden. Es ist wichtig, dass die gleiche Menge an CO₂ in die Luftschicht der Becken eingeströmt wird. Aus diesem Grund kam es bei einer anderen Variante zu einem Problem. Bei dieser Variante wurde das CO₂ in die Gefäße nacheinander gegeben und dabei die Zeit gestoppt. Das hatte zur Folge, dass nicht die gleiche Gasmenge eingeströmt wurde und kein Unterschied zwischen beiden pH-Werten erkennbar war bzw. das warme Wasser stärker versauerte. Dieses Problem konnte durch die Verwendung des T-Stücks eliminiert werden. Des Weiteren ist es wichtig, eine große Temperaturdifferenz zu erzeugen. Dies geschieht, indem das Wasser eines Gefäßes im Wasserkocher erhitzt und das andere mit Eiswürfeln gekühlt wird. Würde man mit geringen Temperaturdifferenzen arbeiten, wäre der Unterschied im pH-Wert zu gering, um ihn anhand der Indikatorverfärbung abzulesen. Ein weiterer Punkt, der beachtet werden muss, ist das in beide Glasbecken die gleiche Menge an Indikator gegeben wird. Dies ist wichtig für den optischen Vergleich der beiden Gefäße. Hat ein Gefäß eine gesättigtere Farbe als das andere Gefäß, wirkt es so als gäbe es Unterschiede im Farbton und die Schüler kommen zu dem Trugschluss, dass sich der pH-Wert zwischen den Gefäßen unterscheidet, obwohl er gleich ist. Die Erkenntnisse dieses Versuches sind wichtig, um



Abb. 56: Schlauch mit T-Stück für den Versuchsaufbau 2 (eigene Aufnahme)

nachfolgend den Rückkopplungseffekt zwischen Ozean und Atmosphäre zu erklären, da eine sinkende Pufferwirkung des Meeres zu einem Anstieg von CO_2 in der Atmosphäre führt.

4.7.3. Didaktische und methodische Analyse

Damit den konzipierten Versuchen ein Bildungsgehalt abgewonnen werden kann, müssen diese in eine kontextorientierte Lernumgebung eingebettet werden. Die Lernumgebung besteht aus verschiedenen Lernaufgaben, denen eine didaktischen und methodischen Basis zugrunde liegt. Diese wird im Folgenden näher erläutert:

A. Vorwissen der Schüler*innen

Zur Bearbeitung der Lernaufgaben sind einige Vorkenntnisse aus dem Fach Chemie notwendig. Die Schüler*innen sollten wissen, was man unter dem pH-Wert versteht und wie man diesen mit einem Indikatorband bzw. einem Flüssigindikator misst. Dieses Thema wird in Themenfeld 6 „Säuren und Laugen“ des rheinland-pfälzischen Lehrplans für Chemie behandelt (MBWWK 2014: 76f.). Sollte dieses Thema bei den Schülerinnen und Schülern im Unterricht noch nicht erarbeitet worden sein, steht ein kurzes Erklärvideo zur Verfügung. Des Weiteren sollten den Schüler*innen die Summenformel von Kohlenstoffdioxid (CO_2) und von Wasser (H_2O) bekannt sein. In diesem Zusammenhang wird davon ausgegangen, dass die Schüler*innen die Struktur einer Reaktionsgleichung kennen. Als methodisches Vorwissen für das Wirkungsgefüge sollte den Schüler*innen der Unterschied zwischen Ursache und Wirkung bekannt sein. Hierfür gibt es zusätzliche Tipps unterhalb der Aufgabenstellung.

B. Lernschritte nach dem Lehr-Lern-Modell

Basierend auf dem erwarteten Vorwissen der Schüler*innen wurde die Station nach dem Lehr-Lern-Modell in folgende Lernphasen gegliedert. Eine Erläuterung der einzelnen Lernphasen wurde in Abschnitt 4.5. dargelegt.

Phase 1: Im Lernkontext ankommen

Zu Beginn steht die problemorientierte Fragestellung im Vordergrund. Die Schüler*innen finden auf dem Tisch einen Brief von dem Ozeanforscher Dr. Fuchs vor, der gerade im Great Barrier Reef ein totes Korallenriff untersucht. Daraus lässt sich die Fragestellung für die Station ableiten, nämlich wie es zu diesem Korallensterben kommen konnte. Zuerst einmal geht es darum, dass die Schüler*innen das Great Barrier Reef verorten, da einige von ihnen nicht wissen, dass es sich hierbei um ein Korallenriff nahe der australischen Küste handelt. Zur Verortung dient eine Landkarte, aus der mit einer UV-Lampe ein Code ausgelesen werden kann (siehe Abb. 57).



Abb. 57: Weltkarte mit UV-Schrift (eigene Aufnahme)

Phase 2: Vorwissen aktivieren und Vorstellungen entwickeln

Da bei dieser Station viel mit dem pH-Wert gearbeitet wird, muss dieses Wissen bei den Schülerinnen und Schülern aktiviert werden. Da es vorkommt, dass einige Klassen dieses Thema noch nicht behandelt haben, wurde dafür ein kurzes Erklärvideo aufgenommen, in dem der pH-Wert und die pH-Wert-Farbskala kurz erklärt werden. Um die Schüler*innen zu aktivieren, finden diese drei Gefäße mit drei unterschiedlichen Flüssigkeiten und ein Indikatorband vor (siehe Abb. 21). Jede dieser Flüssigkeiten hat einen anderen pH-Wert. Die Schüler*innen sollen mithilfe des Indikatorbandes herausfinden, welche dieser drei Flüssigkeiten sauer, neutral und basisch ist. Auf diese Weise wird der Zusammenhang zwischen dem pH-Zahlenwert und der Eigenschaft sauer, neutral oder basisch abgefragt.

Im nächsten Schritt soll geklärt werden, aus welchem Stoff Korallen bestehen, und wie dieser Stoff auf saure, basische und neutrale Flüssigkeiten reagiert (siehe Abb. 58). Bei dem Stoff stehen neben der richtigen Antwort „Kalk“ noch Granit, Holz und Schiefer zur Auswahl. Gibt man von jeder der drei Flüssigkeiten etwas über den Kalk, kann man bei der Säure erkennen, dass sich Blasen bilden und sich der Kalk auflöst. Durch diesen Nebenversuch haben die Schüler*innen gelernt, dass eine versauerte Flüssigkeit zum Auflösen der Korallen führt. Auf dieser



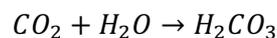
Abb. 58: Untersuchung von Holz, Kalk, Schiefer und Granit auf ein Reaktionsverhalten mit Säure (eigene Aufnahme)

Grundlage kann in den nächsten Schritten die Ozeanversauerung erarbeitet werden.

Dafür muss eine Transformation vom Realraum in den Modellraum stattfinden. Hierfür sollen die Schüler*innen die Begriffe „Atmosphäre“, „Meer“ und „Kraftwerk“ an eine Abbildung des Versuchs anordnen. Danach geht es darum, eine Vermutung über den Ausgang des Versuchs aufzustellen. Die Teilnehmer*innen sollen mithilfe einer Skala und eines Pfeils entscheiden, ob der pH-Wert des Wassers sauer bzw. basisch wird oder neutral bleibt.

Phase 3: Lernprodukt erstellen

In dieser Phase findet die Durchführung der beiden Hauptversuche statt. Beim ersten Hauptversuch messen die Schüler*innen den pH-Wert und geben, wie in Abschnitt 4.7.2. beschrieben, CO_2 in das Becken. Nach der Durchführung messen sie den pH-Wert erneut und können eine Versauerung feststellen. Im Anschluss sollen sie ihre Hypothese bestätigen. Danach folgt eine Erklärung des Versuchs. Mithilfe eines Videos wird gezeigt, dass Kohlenstoffdioxid aufgrund des Partialdruckausgleichs von der Atmosphäre in den Ozean gelangt. Damit ist noch nicht die Versauerung erklärt. Um diese zu erarbeiten, bekommen die Schüler*innen Schnipsel, mit denen sie die Reaktionsgleichung von CO_2 und H_2O aufstellen sollen (siehe Abb. 59):



Dabei lernen die Schüler*innen, dass Kohlensäure entsteht. Wie diese bereits wissen, sorgt die Kohlensäure für eine Versauerung des Wassers und für eine Lösung von Kalk. Eine Ursache des Korallensterbens wurde damit erklärt. Der zweite Hauptversuch beschäftigt sich mit den Auswirkungen unterschiedlicher Wassertemperaturen auf die Ozeanversauerung. Dafür messen die Schüler*innen vor und nach dem Versuch den pH-Wert der beiden Glasbecken. Nachdem CO_2 in beide Behälter eingegeben wurde, lässt sich erkennen, dass der pH-Wert des kalten Wassers niedriger ist als bei dem warmen Wasser (siehe Abschnitt 4.7.2.).

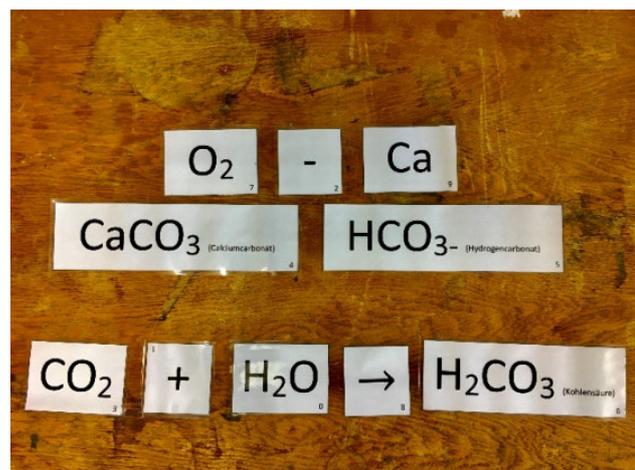


Abb. 59: Reaktionsgleichungsschnipsel (eigene Aufnahme)

Aus diesem Versuchsergebnis sollen die Schüler*innen in der nächsten Aufgabe ableiten, dass je höher die Wassertemperatur ist, desto weniger CO_2 das Wasser aufnehmen kann. Um den damit

verbundenen Rückkopplungseffekt zwischen Ozean und Atmosphäre anschaulich zu demonstrieren, folgt im Anschluss ein interaktives Visualisierungsmodell (vgl. Abb. 61). Bei diesem Modell werden die Prozesse, die in Ozean und Atmosphäre ablaufen, mithilfe von Holzwürfeln, die als Treibhausgase fungieren, dargestellt. Damit sichergestellt wird, dass die Schüler*innen die Intention des Modells verstanden haben, werden danach drei Fragen gestellt:

- Sorgt die Erwärmung des Ozeans dafür, dass dieser nicht versauert?
- Was würde mit dem pH-Wert passieren, wenn keine CO₂-Teilchen durch die Industrie in die Atmosphäre gegeben werden?
- Wie verhält sich die Temperatur in Atmosphäre und Ozean, wenn die CO₂-Aufnahmekapazität des Ozeans verringert wurde?

Zum Schluss dieser Phase soll der Zusammenhang zwischen Temperaturerwärmung der Ozeane und dem Korallensterben hergestellt werden, indem die Schüler*innen einen Lexikoneintrag über die Korallenbleiche lesen. Diese neu gewonnenen Erkenntnisse werden im nächsten Schritt im Realraum betrachtet. Dabei geht es darum, dass es für das Ökosystem Meer schon schwerwiegende Folgen hat, wenn der pH-Wert des Ozeans von 8,2 auf unter 8,0 absinkt. Die Schüler*innen betrachten dabei, die drei RCP-Szenarien wie sich der pH-Wert in den Ozeanen in Zukunft entwickeln wird. Dabei soll festgestellt werden, ob und wann der kritische Wert von 8,0 unterschritten wird. So bekommen die Schüler*innen einen Eindruck von der Versauerung der Ozeane im Realraum.

Mit der Hauptaufgabe werden die Informationen der Station als Lernprodukt gesichert. Dies geschieht mithilfe eines Wirkungsgefüges, da so das neue Wissen strukturiert und vernetzt wird und dadurch leichter im Langzeitgedächtnis abgespeichert werden kann (siehe Abb. 60). Die Schüler*innen sollen im Wirkungsgefüge verschiedenen Kärtchen an die richtige Stelle anordnen. An oberster Stelle steht der Anstieg des Kohlenstoffdioxidgehaltes in der Atmosphäre und an unterster Stelle das Korallensterben. In dem Wirkungsgefüge werden beide Ursachen des Korallensterbens aufgegriffen und der Rückkopplungsprozess zwischen Ozean und Atmosphäre wird deutlich.

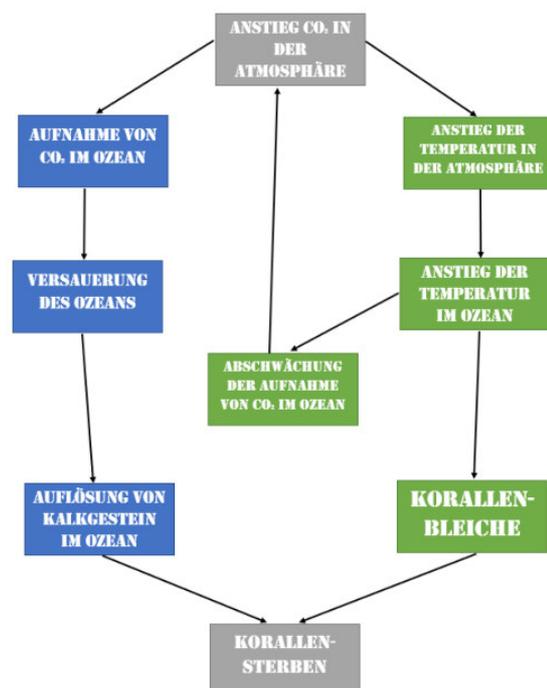


Abb. 60: Wirkungsgefüge als Lernprodukt

Phase 4: Anwenden und Üben

Da die Schüler*innen sich jetzt ausführlich mit der Problematik der Versauerung beschäftigt haben, werden in den Zusatzaufgaben die Möglichkeiten einer Entsauerung der Ozeane behandelt. Auf diese Weise wird das Gelernte auf einen neuen Kontext angewandt. Dabei wird auf zwei verschiedene Herangehensweisen eingegangen. Die erste Zusatzaufgabe sieht eine Entsauerung mithilfe von Chemikalien vor. Die Schüler*innen finden experimentell heraus, dass Laugen zu einer Entsauerung führen. Darauf aufbauend sollen die Schüler*innen beurteilen, ob man die Versauerung sinnvoll stoppen kann, wenn man alkalische Chemikalien großflächig im Meer verteilt. Die zweite Zusatzaufgabe sieht eine biologische Entsauerung vor. Die Schüler*innen sollen beurteilen, ob sie es für sinnvoll halten mit einer Düngung der Meere eine Algenblüte zu erzwingen, welche das CO₂ durch Photosynthese bindet.

Die konkreten Lernaufgaben der unterschiedlichen Phasen sind im Anhang in Abschnitt V.II.VI. aufgeführt. Bei deren Konzeption wurden die in Abschnitt 3.5. beschriebenen Kriterien berücksichtigt. Im Folgenden wird der Aufbau der Lernaufgaben dieser Station exemplarisch mit ausgewählten Gütekriterien legitimiert:

C. Förderung unterschiedlicher Kompetenzen

Bei der Station werden folgende Kompetenzen der Bildungsstandards der Physik gefördert (siehe Abschnitt 3.5.): Die Bestimmung des pH-Wertes verschiedener Flüssigkeiten fördert die Kompetenz bereits erlerntes Fachwissen anzuwenden. Die Methodenkompetenz wird bei der Hauptaufgabe durch die Methode des Wirkungsgefüges entwickelt. Bei dem interaktiven Visualisierungsmodell nehmen die Schüler*innen verschiedene Rollen ein, wie Ozean, Atmosphäre, Zeit und Druckausgleich, und sollen dabei miteinander kommunizieren. Damit wird an dieser Stelle verstärkt die Kommunikationskompetenz angesprochen. Eine Erweiterung der Beurteilungskompetenz findet dagegen in den Zusatzaufgaben statt, in der verschiedene Methoden der Entsauerung beurteilt werden sollen.

D. Basiskonzepte

Bei dieser Station werden die folgenden Basiskonzepte für den naturwissenschaftlichen Unterricht angesprochen (siehe Abschnitt 3.5.): „System“, „Wechselwirkung“ und „chemische Reaktionen“. Das Klimasystem besteht aus vielen Teilsystemen, unter anderem der Atmosphäre und der Hydrosphäre. Zwischen den Teilsystemen findet eine Wechselwirkung in Form eines Stoffaustausches statt. Die Schüler*innen lernen, dass die Atmosphäre Kohlenstoffdioxid an die Hydrosphäre abgibt, wenn eine Partialdruckdifferenz zwischen beiden Systemen herrscht. Umgekehrt kann die Hydrosphäre Kohlenstoff an die Atmosphäre abgeben, wenn sie aufgrund steigender Temperaturen weniger CO₂ binden kann.

Das Basiskonzept „chemische Reaktionen“ ist in dieser Station auch zu finden. Zum einen in der Aufgabe, bei der die Schüler*innen eine Reaktionsgleichung zusammensetzen sollen, und zum anderen bei den Nebenversuchen, bei denen Kalk mit Säure gelöst wird (vgl. Abb. 58 und 59).

E. Didaktische Reduktion

Eine didaktische Reduktion dient der altersgemäßen Aufbereitung der Lerninhalte (siehe Abschnitt 3.5.) So wird beispielsweise auf die Reaktion zwischen Kalk und Kohlensäure nicht genauer eingegangen. Es wird nur qualitativ in einem Vorversuch gezeigt, dass Säure mit Kalk reagiert und diesen auflöst. Auch auf einen mikroskopischen Blick auf die Ozeanversauerung wird verzichtet, da die Schüler*innen einige Grundlagen, wie chemische Bindungen oder Carbonate, noch nicht im Unterricht behandelt haben. Des Weiteren wird bei den Versuchen eine didaktische Reduktion vorgenommen. So wird davon ausgegangen, dass der Ozean gleichmäßig versauert. Dies ist in der Realität nicht der Fall, da von der Versauerung vor allem die oberste Ozeanschicht betroffen ist.

F. Fehlvorstellungen

Neben diesen Gütekriterien für kompetenzorientierte Lernaufgaben, ist es aus didaktischer Sicht relevant, sich mögliche Fehlvorstellungen der Schüler*innen bewusst zu machen. Dadurch können diese gezielt durch Lernaufgaben beseitigt werden. Besonders bei dem zweiten Hauptversuch könnte es zu einer Fehlvorstellung kommen. Eine Erwärmung der Ozeane führt dazu, dass diese weniger Kohlenstoffdioxid aufnehmen können. Die Schüler*innen könnten deshalb vermuten, dass eine anthropogene Erwärmung die Ozeanversauerung auf diese Weise verhindert. Damit es nicht zu einer solchen Fehlvorstellung kommt, wurde das interaktive Visualisierungsmodell entwickelt (siehe Abb. 61). Dieses besteht unter anderem aus einem Spielplan, auf dem eine Atmosphäre und ein Ozean abgebildet sind, sowie Holzwürfeln, die ein CO_2 -Molekül darstellen. Die Schüler*innen geben „ CO_2 -Moleküle“ in die Atmosphäre. Dadurch



Abb. 61: interaktives Visualisierungsmodell zur Veranschaulichung des Ozean-Rückkopplungseffektes

herrscht zwischen Atmosphäre und Ozean ein Druckunterschied und die Schüler*innen geben einen Teil der „CO₂-Moleküle“ als Druckausgleich in den Ozean. Mithilfe einer Tabelle können die Schüler*innen ablesen, wie viel CO₂-Holzwürfel welcher Temperatur und welchem pH-Wert entsprechen. Ab einer gewissen Temperatur wird die Aufnahmekapazität des Ozeans beschränkt, d.h. dieser kann weniger Holzwürfel aufnehmen. Die Schüler*innen erfahren, dass das anthropogene CO₂ erst eine Versauerung verursacht. Diese wird aber nicht durch die Erwärmung des Meerwassers gestoppt, sondern lediglich verlangsamt. Auf diese Weise kann einer Fehlvorstellung vorgebeugt werden.

4.8. Station 6: Nachhaltigkeit

Die sechste Station trägt den Titel „Abteilung für nachhaltiges Handeln“. Sie beschäftigt sich mit dem Thema „Nachhaltigkeit“. Abbildung 62 zeigt den Aufbau der Station mit dem Spiel „Change your life“ und den Elementen des Escape Rooms. Um eine adäquate fachliche und didaktische Herangehensweise erarbeiten zu können, mussten vorweg die zugrundeliegenden Lernziele definiert werden.



Abb. 62: Aufbau Station 6 (eigene Aufnahme)

4.8.1. Lernziele

Der angestrebte Lernzugewinn der Station wurde mit folgenden Grob- und Feinlernzielen definiert (siehe Kircher 2019: 91f.). Hinter jedem Lernziel befindet sich in Klammern der entsprechende Anforderungsbereich (AFB). Eine Erklärung der einzelnen Anforderungsbereiche befindet sich in Abschnitt 3.5.

Groblernziel:

Die Schüler*innen können ihr eigenes Konsumverhalten nachhaltig reflektieren (AFB 3).

Feinlernziele:

Die Schüler*innen können ...

... mithilfe der App „Klima-Kompass“ ihren persönlichen CO₂-Verbrauch bestimmen (AFB 1).

... können mithilfe gegebener Werte berechnen, wie viel Tonnen CO₂ eine Person im Jahr verbrauchen darf, damit das Pariser Klimaabkommen eingehalten wird (AFB 2).

... Handlungsmöglichkeiten, um den eigenen CO₂-Verbrauch zu reduzieren, benennen (AFB 1).

... das Spiel „Change your life“ nach den Regeln der Anleitung durchführen (AFB 2).

... erläutern, was ihnen am Spiel gut gefallen hat und was sie verbessern würden (AFB 2).

... beurteilen, ob das Spiel „Change your life“ realistisch die Lebenswelt der Menschen widerspiegelt (AFB 3).

... anhand der Erkenntnisse aus dem Spiel „Change your life“ beurteilen, ob es im realen Leben umsetzbar ist die CO₂-Emission auf nur 1t zu reduzieren (AFB 3).

... in Form eines Briefes planen, was sie an ihrem Lebensstil verändern wollen und was nicht (AFB 3).

Zusätzliche Aufgabe

Die Schüler*innen können ...

... in einem fiktiven Szenario planen, wie man gemeinsam als Gruppe CO₂ einsparen kann und erläutern, ob ihre Lösung auch auf die reale Welt übertragbar ist und welchen Vorteil sie bietet (AFB 3).

4.8.2. Fachliche Analyse der Station

Um die Schüler zu befähigen ihr eigenes Konsumverhalten im Sinne der Nachhaltigkeit zu reflektieren, muss zunächst der Begriff der Nachhaltigkeit klar gemacht werden. Nachhaltigkeit bedeutet, mit Ressourcen so umzugehen, dass man nicht auf Kosten der nachfolgenden Generationen lebt (MARTIN 2001c). Die Ressource, die in dieser Station ins Blickfeld genommen wird, ist die individuelle CO₂-Emission. Dabei geht es darum, wie man die CO₂-Emissionen reduzieren muss, damit das CO₂, das in die Atmosphäre abgegeben wird, keine negativen Folgen für die zukünftigen Generationen hat und diese keinen anthropogenen Klimawandel zu spüren bekommen. Dafür sind drei Informationen wichtig, die in dieser Station herausgearbeitet werden. Erstens, wie ist unser persönlicher, aktueller CO₂-Verbrauch. Zweitens, welcher CO₂-Verbrauch sollte unser Ziel sein für ein nachhaltiges Leben, und drittens, was muss man tun, um zu diesem Ziel zu gelangen.

Der erste Punkt kann mithilfe eines CO₂-Rechners bestimmt werden. Bei dieser Station wird die App „Klimakompass“ von Worldwatchers verwendet (siehe Abb. 63). Die Nutzer*innen geben ihren persönlichen Verbrauch in den Kategorien „Wohnen“, „Ernährung“, „Mobilität“, „Shopping“, „Freizeit“, „Urlaub“ und „digitales Leben“ an. Aus diesen Angaben berechnet die App den persönlichen CO₂-Verbrauch und addiert zusätzlich 0,73t CO₂ aus öffentlichen Emissionen hinzu. Die Daten für die Berechnung entnimmt Worldwatchers aus verschiedenen Datenbanken. Die genauen Quellen können in der App nachgeschaut werden (siehe Worldwatchers o.J.). Die meisten berechneten Werte der Schüler*innen liegen bei ca. 12t CO₂, was dem europäischen Durchschnittswert entspricht (vgl. DREXEL 2019: 16).



Abb. 63: App „Worldwatchers“ (Worldwatchers o.J.)

Der zweite Punkt kann mit dem Budgetansatz berechnet werden. Die Weltklimakonferenz in Kopenhagen berechnete 2010, dass bis 2050 nicht mehr als 750 Mrd. t CO₂ in die Atmosphäre emittiert werden dürfen, um eine anthropogene Erwärmung von 2°C nicht zu überschreiten (HOFFMANN 2015: 42f.). Von diesem Budget wurden bereits bis 2020 420 Mrd. t CO₂ in die Atmosphäre emittiert (DREXEL 2019: 10). Nimmt man das Restbudget teilt es durch 40 Jahre und durch 7,8 Mrd. Menschen, ergibt sich ein Budget von 1,41t CO₂ pro Mensch und Jahr. Dieser Wert ist um ein Vielfaches geringer als der europäische Durchschnittsverbrauch.

Da bereits Start und Ziel der CO₂-Reduzierung bekannt sind, fehlt noch der Weg, wie man vom Start zum Ziel gelangt. Auf diesen „Weg“ setzt die Station ihren Fokus und zwar in Form eines Spieles, das speziell für das Schülerlabor konzipiert wurde. Es trägt den Titel „Change your life“, da die Spieler*innen einen fiktiven Charakter annehmen und aus dessen Sicht agieren sollen. Abbildung 64 zeigt das Spielfeld von „Change your life“.

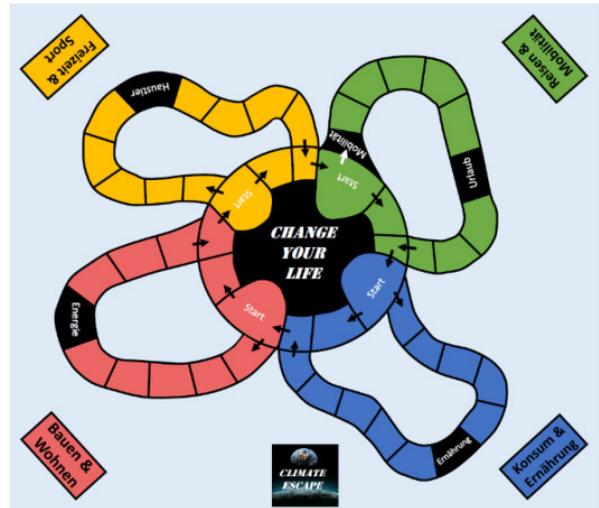


Abb. 64: Spielfeld des Spiels „Change your life“ (eigene Darstellung)

Ziel des Spiels ist es, mit der Spielfigur über das Spielfeld zu ziehen und dabei durch Veränderung

seines Lebensstils innerhalb von „14 Jahren“ die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Spielgruppe um mindestens 50% zu reduzieren. In dem Spiel stehen den Spielern jeweils 4 Ressourcen zur Verfügung. Diese werden verwendet, um Veränderungen des Lebensstils zu bewirken.

CO₂: Dieser Wert gibt die Menge an jährlichen CO₂-Emissionen an, die aufgrund des Lebensstils der Spielfigur in die Atmosphäre freigesetzt wird.

Zeit: Dieser Wert gibt an, wie viele Zeiteinheiten der Spielfigur zur Verfügung stehen, um ihren Lebensstil zu verändern.

Geld: Dieser Wert gibt an, wie viel Geld die Spielfigur zur Verfügung hat, um ihren Lebensstil zu verändern.

Lebensfreude (LF): Dieser Wert gibt an, wie viel Lebensfreude die Spielfigur mit ihrem derzeitigen Lebensstil hat.

Bei dem Spiel wählt jeder der Spieler*innen einen Charakter aus, der bestimmte Startwerte für CO₂, Zeit, Geld und Lebensfreude hat. Abbildung 65 zeigt einen der möglichen Charaktere mit den dazugehörigen Startwerten. Die Spieler*innen bewegen sich mit ihren Figuren über das Spielfeld und je nach Feld, auf dem sie landen, ziehen sie eine Ereigniskarte oder führen eine größere Veränderung ihres Lebens-

Jenni

Startwerte

CO ₂	12,6t
Zeit	7 ZE (Zeiteinheiten)
Geld	1 000€
Lebensfreude	10

Abb. 65: Charakter „Jenni“ mit den dazugehörigen Startwerten (eigene Darstellung)

stils durch. Auf einer Ereigniskarte steht in der Regel eine Möglichkeit seinen CO₂-Verbrauch zu senken und die Spieler*innen dürfen selbst entscheiden, ob sie die Karte ausspielen oder nicht, da dies meistens Auswirkungen auf die anderen Ressourcen hat. Mit ihren Ressourcen dürfen sie nicht in den

negativen Bereich kommen. Ein Beispiel für eine solche Ereigniskarte ist in Abb. 66 zu sehen. Das Spiel ist vorbei, wenn 14 Runden gespielt wurden.

Der CO₂-Wert der jeweiligen Charaktere wird aus dem europäischen Durchschnittswert ermittelt. Von diesem Wert ausgehend werden die Merkmale des Lebensstils des jeweiligen Charakters mit dem Durchschnittswert verrechnet. Die auf den Ereigniskarten angegebenen CO₂-Werte sind dem Buch „*Warum Meerschweinchen das Klima retten*“ von C. DREXEL entnommen und stellen eine gute Annäherung an die tatsächlichen Emissionen dar (vgl. DREXEL 2019). Die Zahlenwerte der Kategorien Geld, Zeit und Lebensfreude sind frei gewählt. Auch die Zu- bzw. Abnahme der Lebensfreude auf den einzelnen Karten kann diskutiert werden. So könnte beispielweise der Anbau von Obst und Gemüse im eigenen Garten für manche zur Verbesserung der Lebensfreude führen für andere jedoch aufgrund der physischen Arbeit, des hohen Zeitaufwandes oder anderen Gründen zu einer Verminderung der Lebensfreude. Die einzelnen Spielmaterialien sind im Anhang aufgelistet (siehe Anhang V.II.VII.).

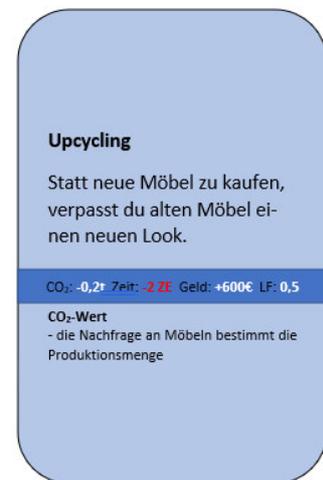


Abb. 66: Ereigniskarte „Upcyclin“ (eigene Darstellung)

4.8.3. Didaktische und methodische Analyse

Damit dem konzipierten Spiel ein Bildungsgehalt abgewonnen werden kann, muss dieses in eine kontextorientierte Lernumgebung eingebettet werden. Die Lernumgebung besteht aus verschiedenen Lernaufgaben, denen eine didaktischen und methodischen Basis zugrunde liegt. Diese wird im Folgenden näher erläutert:

A. Vorwissen der Schüler*innen

Da diese Station den Klimawandel aus einer gesellschaftswissenschaftlichen Perspektive beleuchtet, sind keine naturwissenschaftlichen Vorkenntnisse notwendig. Bei der Bestimmung des persönlichen CO₂-Fußabdrucks ist es vorteilhaft, grobe Kenntnisse über die eigene Lebensweise und das eigene Konsumverhalten zu haben, wie beispielweise die Größe der Wohnung oder die monatlichen Ausgaben für Konsumartikel. Dies ist aber keine notwendige Voraussetzung, da man ansonsten in der App einfach den deutschen Durchschnittswert auswählen kann.

B. Lernschritte nach dem Lehr-Lern-Modell

Basierend auf dem erwarteten Vorwissen der Schüler*innen wurde die Station nach dem Lehr-Lern-Modell in folgende Lernphasen gegliedert. Eine Erläuterung der einzelnen Lernphasen wurde in Abschnitt 3.4. dargelegt.

Phase 1: Im Lernkontext ankommen

In dieser Phase steht die Konzeption einer problemorientierten Fragestellung im Vordergrund. Damit diese entwickelt werden kann, sollen sich die Schüler*innen mit dem CO₂-Verbrauch der Menschen auseinandersetzen. Damit ihnen bewusst wird, wie groß ihr eigener CO₂-Verbrauch ist und welche Faktoren in die Berechnung einfließen, bestimmen die Schüler*innen ihren persönlichen CO₂ Fußabdruck mithilfe der App „Klimakompass“. Der berechnete Wert wird im Anschluss individuell mit dem deutschen Durchschnittswert von 12t CO₂ pro Jahr ins Verhältnis gesetzt. Danach sollen die Schüler*innen berechnen, wie viel CO₂ eine Person im Jahr verbrauchen darf, damit das Budget bis 2050 nicht überschritten und damit eine Erwärmung von mehr als 2°C verhindert werden kann. Dabei werden die Zahlenwerte aus Abschnitt 4.8.2. verwendet, die ein Ergebnis von 1,41t CO₂ liefern. Daraus ergibt sich die problemorientierte Fragestellung: Wie kann ich meinen CO₂-Verbrauch so verringern, dass eine Klimakatastrophe verhindert wird?

Phase 2: Vorwissen aktivieren und Vorstellungen entwickeln

In dieser Phase wird das Vorwissen der Schüler*innen aktiviert, indem sie Möglichkeiten notieren, wie man seinen eigenen CO₂-Verbrauch verringert. Die Möglichkeiten werden auf ein Blatt notiert und leiten das Spiel „Change your life“ ein.

Phase 3: Lernprodukt erstellen

In dieser Phase wird der Fokus auf das Spiel „Change your life“ gelegt. Der Arbeitsauftrag besteht darin, dass Spiel nach den Spielregeln durchzuführen. Der Aufbau und die Durchführung des Spiels wurden bereits in Abschnitt 4.8.2. erörtert. Das Ziel des Spiels liegt aus didaktischer Sicht darin, den Schüler*innen zu zeigen, welche Möglichkeiten es gibt, CO₂ zu sparen und auf welche Probleme man dabei stößt. Diese Probleme werden durch das limitierte Vorhandensein anderer Ressourcen deutlich. So kann sich zum Beispiel nicht jeder eine Häuserdämmung leisten oder der Verzicht auf einen Urlaub wirkt sich negativ auf die Lebensfreude aus. Nach Beendigung des Spiels wird an das Vorwissen angeknüpft,

indem die Schüler*innen bei ihren zuvor notierten Einsparungsmöglichkeiten die konkrete CO₂-Einsparung ergänzen, falls diese im Spiel genannt wurde. Auf diese Weise werden die Vorkenntnisse der Schüler*innen aufgegriffen und reflektiert.

Anknüpfend an das Spiel werden die neuen Informationen diskutiert. Hierfür sollen die Schüler*innen ein Arbeitsblatt ausfüllen. Zuerst wird reflektiert, ob das Spielziel erreicht wurde und wenn nicht, welche Faktoren dafür verantwortlich sein könnten. Danach geht es darum, das Spiel auf einer Metaebene zu diskutieren. Das heißt, was hat den Schülerinnen und Schülern gut gefallen und was nicht. Darauf folgt eine Beurteilung, ob das Spiel die Lebenswelt der Menschen realistisch widerspiegelt. Die letzte Aufgabe nimmt Bezug auf die problemorientierte Fragestellung. In dieser sollen die Schüler*innen beurteilen, ob das Ziel von 1,41 t CO₂ pro Person und Jahr ein umsetzbares Ziel ist. Das ausgefüllte Arbeitsblatt wird per AirDrop an die Assistent*innen geschickt.

Im Gegenzug erhalten sie von diesen eine neue Aufgabe zur Gestaltung eines Lernproduktes. In dieser Aufgabe sollen die Schüler*innen für sich selbst sichern, was sie aus dieser Station mitgenommen haben. Dies geschieht anonym in Form eines Briefes. Der Empfänger des Briefes ist das eigene „Ich“ in zwei Monaten. Es soll beschrieben werden, was die Schüler*innen bis zu diesem Zeitpunkt an ihrem Lebensstil verändern bzw. was sie nicht verändern möchten. Auf diese Weise reflektieren die Schüler*innen die Station aus ihrer Sicht. Die fertigen Briefe sollen sie in einen Briefkasten werfen. Dieser wird von den Assistent*innen geleert und die Briefe der Lehrkraft mitgegeben. Diese teilt sie den Schüler*innen zwei Monate später aus. Auf diese Weise gibt es eine weitere Reflexionsphase, bei der die Schüler*innen reflektieren, welche Punkte sie aus dem Brief umgesetzt haben und welche nicht.

Phase 6: Anwenden und Üben

Die Zusatzaufgabe zeigt eine neue, etwas andere Art, CO₂ einzusparen; nämlich die Möglichkeit beschädigte Gegenstände selbst zu reparieren und diese mit anderen zu teilen. Dafür sollen die Schüler*innen in die Rolle von verschiedenen Personen schlüpfen. Alle diese Personen leben in einem Dorf, in dem man statt mit Geld mit CO₂ bezahlt. Jede Person möchte mehrere Anschaffungen machen, hat aber ein geringes CO₂-Budget. Die Schüler*innen sollen sich gegenseitig ihre Personencharaktere vorstellen und erzählen, was sie sich anschaffen möchten. Danach soll gemeinsam eine Lösungsstrategie für ihre Probleme entwickeln. Durch die Vorstellung und die nachfolgende Diskussion sollen die Schüler*innen zu dem Schluss kommen, dass sie sich gegenseitig helfen können. So kann eine Hobbyschneiderin für den Nachbarn den Anzug flicken oder der alte Nachbar sein Auto verleihen, das sonst nur in der Garage steht. Nachdem das Problem gelöst wurde, sollen die Schüler*innen beurteilen, ob dies auf die reale Welt übertragbar ist.

Die konkreten Lernaufgaben der unterschiedlichen Phasen sind im Anhang in Abschnitt V.II.VII. aufgeführt. Bei deren Konzeption wurden die in Abschnitt 3.5. beschriebenen Kriterien berücksichtigt. Im Folgenden wird der Aufbau der Lernaufgaben dieser Station exemplarisch mit ausgewählten Gütekriterien legitimiert:

C. Lebensweltbezug

Diese Station knüpft an die Lebenswelt der Schüler*innen an. Die Bestimmung des persönlichen CO₂-Verbrauchs stellt einen Bezug zu ihren alltäglichen Gewohnheiten und Verhaltensweisen her. Auch die verschiedenen Möglichkeiten CO₂ einzusparen, beziehen sich auf den Alltag der Schüler*innen und lassen sich auch in diesem umsetzen. Zudem gibt es am Schluss durch den Brief eine Verbindung zur Lebenswelt.

D. Förderung unterschiedlicher Kompetenzen

Da diese Station physikalische Inhalte nicht direkt behandelt, werden damit auch keine physikalischen Kompetenzen der Bildungsstandards der Physik im klassischen Sinne gefördert. Bei der Aufgabe zur Berechnung des eigenen CO₂-Budgets werden bei den Schülerinnen und Schülern einfache mathematische Methodenkenntnisse abverlangt. „Change your life“ ist ein kooperatives Spiel, wobei auch die Kommunikation und Interaktion als Gruppe im Vordergrund stehen. Daraus folgt eine direkte Förderung der Kommunikationskompetenz. Auch bei der Zusatzaufgabe wird diese Kompetenz gefördert. Die nach dem Spiel anschließende Reflexion beinhaltet auch einige Aufgaben, welche die Beurteilungsfähigkeiten der Schüler*innen ansprechen.

E. Spieldidaktik

Da bei dieser Station kein Versuch, sondern ein Spiel im Fokus steht, wird im Folgenden dessen Vorteile aus didaktischer Sicht analysiert: Das Spiel „Change your life“ vermittelt den Schülerinnen und Schülern Handlungsmöglichkeiten, den individuellen CO₂-Fußabdruck zu reduzieren und zeigt, welche Schwierigkeiten damit einhergehen. Darüber hinaus, fördert es die Fähigkeiten einander zuzuhören, miteinander als Gruppe zu kooperieren, Entscheidungen zu treffen, Probleme zu lösen und es regt zu kreativen Denkprozessen an. Dabei erfüllt es einen pädagogischen Zweck. Obwohl es in der fiktiven Welt der verschiedenen Personencharaktere spielt, ist es auf die reale Lebenswelt der Schüler*innen übertragbar, in der das neue Wissen angewandt werden kann (vgl. UHLENWINKEL 2010: 4ff.).

F. Didaktische Reduktion

Eine didaktische Reduktion dient der altersgemäßen Aufbereitung der Lerninhalte (siehe Abschnitt 3.5.). So werden beispielsweise bei der Berechnung des persönlichen CO₂-Verbrauchs von der App nur die wichtigsten Punkte aufgegriffen. Einige Punkte, wie der monatliche Stromverbrauch, werden dabei nicht direkt abgefragt. Würden solche Einflussfaktoren auch abgefragt, würde dies den zeitlichen Rahmen sprengen und die Schüler*innen nur unnötig überfordern. Die fehlenden Einflussfaktoren haben zudem einen geringen Einfluss auf den persönlichen CO₂-Wert. Auch die Berechnung des CO₂-Budgets wurde an das Niveau der Klassenstufe angepasst. In einer genauen Berechnung müsste beispielsweise auch die Entwicklung der Weltbevölkerung bis zum Jahre 2050 berücksichtigt werden. Des Weiteren sind bei dem Spiel didaktische Reduktionen unternommen worden. So lassen sich weitere Einflussfaktoren finden, die dazu führen, dass die Menschen ihren Lebensstil nicht verändern wollen. Hierzu können beispielsweise Vorurteile in der Gesellschaft zählen oder fehlende Alternativen im Einzelhandel. Zudem werden indirekte Folgen, wie die Auswirkungen einer Bodenversiegelung auf das Klima, nicht berücksichtigt.

4.9. Abschlussphase

Nachdem alle Schüler*innen die Stationen durchlaufen haben, erfolgt eine dreißigminütige Abschlussphase. Diese Phase findet im Plenum statt und wird von den Assistent*innen moderiert. Der erste Teil der Abschlussphase ist eine Diskussion der Lernprodukte (Hauptaufgaben), welche die Schüler*innen in den einzelnen Stationen erarbeitet haben. Da alle Gruppen ihre Lösungen per AirDrop an das iPad einer Assistentin bzw. eines Assistenten schicken mussten, können diese für jede Station eine Lösung auswählen, die an die Wand projiziert wird. Die Gruppe erläutert kurz ihre Lösung. Fehler und weitere Anregungen können im Anschluss diskutiert werden. Für jede Vorstellung ist eine Zeiteinheit von fünf Minuten eingeplant. Alle erarbeiteten Lernprodukte sind in digitale Form überführt worden und können der Lehrkraft im Anschluss an das Schülerlabor per Mail geschickt werden. Sollte die Zeit für die Diskussionsphase nicht ausreichen, kann dies durch die Lehrkraft in der nächsten Unterrichtsstunde besprochen werden.

Den Abschluss des Schülerlabors bildet die Suche nach der Geheimakte. Bei jeder erfolgreich gelösten Station gab es einen Hinweis. Auf diese Weise werden alle Stationen des Escape-Rooms zu einem großen Escape-Room verbunden, den es noch zu lösen gilt. Alle Hinweise zusammen ergeben den Satz „Die Uhr schlägt fünf vor zwölf“. Dieser Satz weist auf die Uhr an der Wand hin, welche die Uhrzeit 11:55 anzeigt. In dieser Uhr befindet sich ein Geheimversteck mit der Geheimakte (siehe Abb. 67). Wie

bereits am Anfang erwähnt, ist in dieser Geheimakte ein Bild zu finden, welches die Person zeigt, die etwas gegen den Klimawandel unternehmen kann. Öffnen die Schüler*innen die Geheimakte, sehen sie ihr Spiegelbild. Das ist die Quintessenz des Schülerlabors: *„Jeder kann aktiv mithelfen beim Kampf gegen den Klimawandel. Und jeder kann etwas bewirken.“* Danach findet die Verabschiedung der Schüler*innen statt.



Abb. 67: Uhr mit Geheimversteck

5. Durchführung

Zu Beginn der Masterarbeit war eine Durchführung der Stationen durch jeweils zwei Schulklassen geplant. Aufgrund der Pandemiesituation und geltender Hygienevorschriften war dies nicht in absehbarer Zeit umsetzbar. Aus diesem Grund führten zwei Versuchsgruppen aus jeweils zwei Personen die Versuche an zwei Tagen durch. Eine Evaluation der Stationen fand im Anschluss an die jeweilige Station mithilfe eines Fragebogens statt. Dieser ist im Anhang angeführt (siehe Anhang Abschnitt V.V).

5.1. Erste Versuchsgruppe

Bei der ersten Versuchsgruppe handelte es sich um zwei Schülerinnen des Otto-Schott-Gymnasiums Mainz, welche die 9. Klasse besuchten. Am ersten Versuchstag wurden die Station 1 „Albedo“, Station 5 „Ozeanversauerung“ und Station 4 „Meeresspiegelanstieg“ von den beiden Schülerinnen absolviert.

Der Versuchstag begann mit einer kurzen Einleitung über das Projekt und der Erzählung der Geschichte vom überfallenen Labor. Dabei ist anzumerken, dass die Geschichte nur mündlich erzählt wurde, da noch kein fertiges Video vorlag. Hierbei kam von den Schülerinnen die Rückmeldung, dass ein konkreter Einstieg in das Schülerlabor fehlte. Aus diesem Grund wurde ein Einstiegsvortrag entwickelt (siehe Anhang Abschnitt V.III.). Im Anschluss wurden die verschiedenen Stationen bearbeitet. Diese verliefen fast wie geplant. Trotzdem tauchten einige Probleme auf, bei denen es sich meistens um Fehler im Programmcode handelte, die leicht behoben werden konnten. Des Weiteren konnten unpräzise Formulierungen in den Aufgabenstellungen ausgemacht und behoben werden. Bei dieser Durchführung wurden die Tipps in Form von Hilfekärtchen ausgedruckt und auf dem Nachbartisch bereitgelegt. Dies hatte zur Folge, dass die Hilfekärtchen keine Beachtung fanden und stattdessen die Assistenten angesprochen wurden. Aus diesem Grund wurden die Hilfekärtchen durch Tipps unter der jeweiligen Aufgabe auf dem iPad ersetzt. Dies konnte bis zum zweiten Versuchstag umgesetzt werden.

Am zweiten Versuchstag wurden die restlichen Stationen, Station 6 „Nachhaltigkeit“, Station 2 „Treibhauseffekt“, Station 3 „Treibhausgase“ Station 3b „Anthropogener Treibhauseffekt“, durchgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass eine der beiden Schülerinnen an diesem Tag keine Zeit hatte und dafür eine andere Schülerin eingesprungen ist. Auch diese Durchführung funktionierte weitgehend wie geplant. An einigen Stellen kam es zu kleineren Problemen, da Lösungen im HTML-Code nicht korrekt verlinkt wurden. Auch wurde von den Schülerinnen bemängelt, dass bei den Zuordnungsaufgaben nicht angezeigt wird, welche Zuordnungen korrekt und welche falsch waren. Dieser Umstand wurde

nach der Versuchsdurchführung behoben, sodass es die zweite Versuchsgruppe an dieser Stelle einfacher hatte.

5.2. Zweite Versuchsgruppe

Die zweite Versuchsgruppe bestand aus zwei Schülerinnen der 8. Klasse des Elisabeth-Langgässer-Gymnasiums Alzey. Hier wurden am ersten Versuchstag die Station 1 „Albedo“, Station 5 „Ozeanversauerung“ und Station 6 „Nachhaltigkeit“ absolviert.

Zu Beginn der Durchführung wurde dieses Mal ein kurzer Einführungsvortrag gehalten, in dem alle Stationen vorgestellt wurden. Bei der Durchführung der Stationen erwies sich der Zeitmangel als größtes Problem. Um diesen später im Schülerlabor in den Griff zu bekommen, wurden nachträglich „Überspringerseiten“ in den HTML-Code eingefügt. Diese wurden bereits in Abschnitt 3.6. näher erläutert. Ein weiteres Problem ergab sich bei der Albedostation, da sich der Greifer mit dem Messgerät nur schwer drehen lies und der Assistent aus diesem Grund helfen musste. Damit dieses Problem nicht mehr auftaucht, wurde der Greifer durch einen Neuen ersetzt. Bei Station 6 empfanden die Schülerinnen das Spielziel als zu anspruchsvoll und machten einen Verbesserungsvorschlag, dass jeder Charakter seinen CO₂-Verbrauch um 50% senken muss, anstatt alle Spieler*innen um einen festen Wert von 6t CO₂. Dieser Vorschlag wurde direkt umgesetzt.

Am zweiten Versuchstag durchlebten dieselben Schülerinnen die Stationen 2 „Treibhauseffekt“, 3 „Treibhausgase“ und 3b „anthropogener Treibhauseffekt“. Bei dieser Durchführung konnten keine größeren Schwierigkeiten festgestellt werden. Auch kam es diesmal zu keinem Zeitmangel.

6. Evaluation und Diskussion der Ergebnisse

Bei der Versuchsdurchführung wurden insgesamt 24 Fragebögen erhoben. Das heißt, die vier Schülerinnen haben an jeder Station jeweils einen Fragebogen ausgefüllt. Das Gesamtergebnis und die Ergebnisse der Fragebögen bei den einzelnen Stationen wurden dem Anhang Abschnitt V.V. beigefügt. Die folgende Auswertung beinhaltet die Ergebnisse von allen 24 Fragebögen. Dabei konnte festgestellt werden:

Die Stationen allgemein:

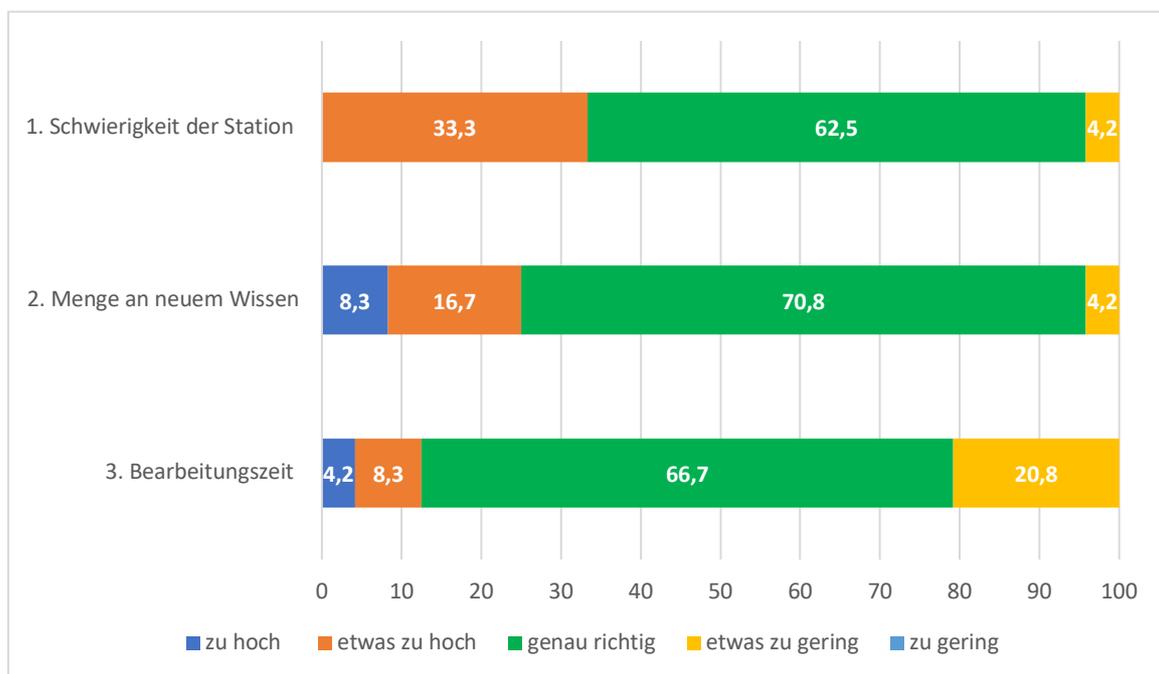


Abb. 68: Antworten zu den Fragen 1 – 3 des Fragebogens in % (Gesamtzahl der Fragebögen: 24)

Hier konnte festgestellt werden, dass die Schwierigkeit der Stationen zu 62,5% genau richtig empfunden wurde (siehe Abb. 68 Frage 1). Nur bei Station 2, 4 und 5 fanden jeweils 50% der Schülerinnen diese etwas zu schwierig. Station 1 und 3+3b wurde jeweils von einer Schülerin als etwas zu schwierig empfunden. Die Menge an neuem Wissen wurde in 70,8% der Fälle als genau richtig wahrgenommen (siehe Abb. 68 Frage 2). Bei Station 1 wurde die Menge an neuem Wissen bei 75% der Schülerinnen und bei Station 4 bei 50% der Schülerinnen als zu viel eingeschätzt. Betrachtet man die Bearbeitungszeit, ist sie in 66,7% der Fälle genau richtig, in 20,8% etwas zu wenig und in 12,5% zu viel (siehe Abb. 68 Frage3). Bei Station 1 fanden 75% der Schülerinnen, dass die Bearbeitungszeit zu wenig war. Dagegen liefern die Fragebögen von Station 5 das Ergebnis, dass 50% der Schülerinnen die Bearbeitungszeit

als zu viel und die anderen 50% als zu wenig empfanden. Das lag daran, dass eine Gruppe an der Station früher fertig war und die andere Gruppe etwas länger gebraucht hatte, da sie bei der Durchführung der interaktiven Visualisierungsmodelle ein paar Probleme hatte.

Die Versuche:

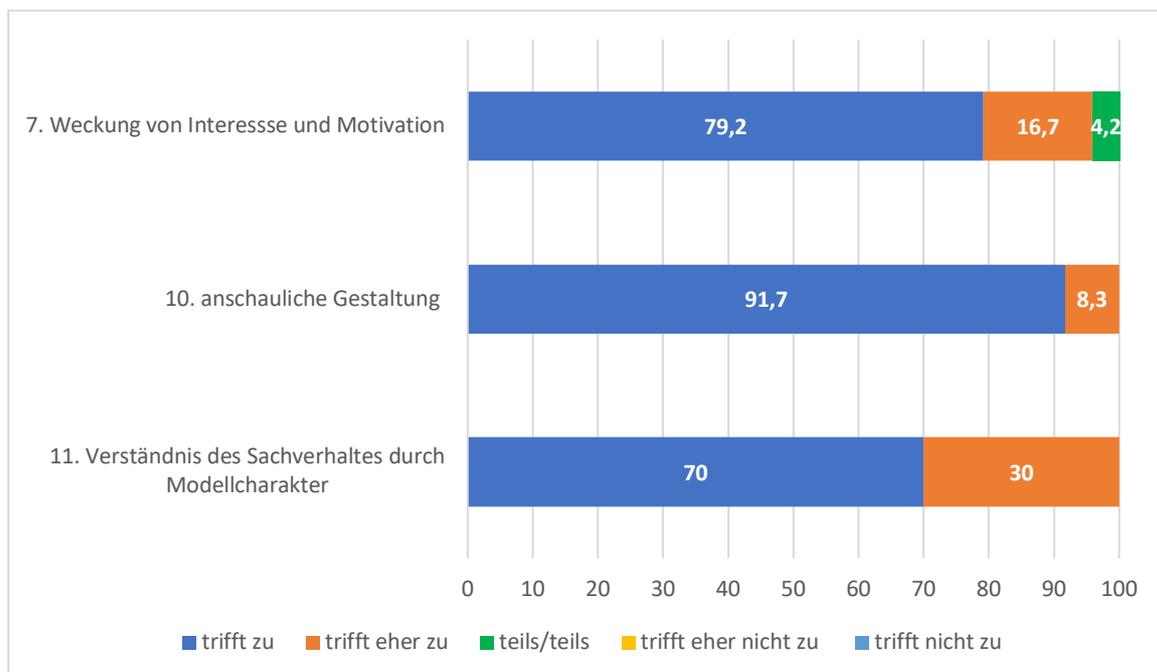


Abb. 69: Antworten zu den Fragen 7, 10 und 11 des Fragebogens in % (Gesamtzahl der Fragebögen: 24)

Wie bereits beschrieben, wurde bei dem Schülerlabor großer Wert auf den Modellcharakter und die Anschaulichkeit gelegt. Die Anschaulichkeit der Versuche wurde von allen Schülerinnen im Fragebogen bestätigt (siehe Abb. 69 Frage 10). Diese hatte zum Ziel, Motivation und Interesse bei den Schülerinnen zu wecken und ihnen den Transfer zwischen Real- und Modellraum zu erleichtern, damit sie den Sachverhalt leichter verstehen. Die Weckung von Interesse und Motivation durch die Versuche bei den Schülerinnen konnte durch den Fragebogen belegt werden. So empfanden die Schülerinnen die Versuche in 95,8% der Fälle interessant und motivierend (siehe Abb. 69 Frage 7). Auch das andere Ziel konnte nach dem Fragebogen erreicht werden. Alle Schülerinnen gaben an, dass der Modellcharakter der Versuche ihnen half den Sachverhalt besser zu verstehen (siehe Abb. 69 Frage 11).

Das Arbeitsmaterial:

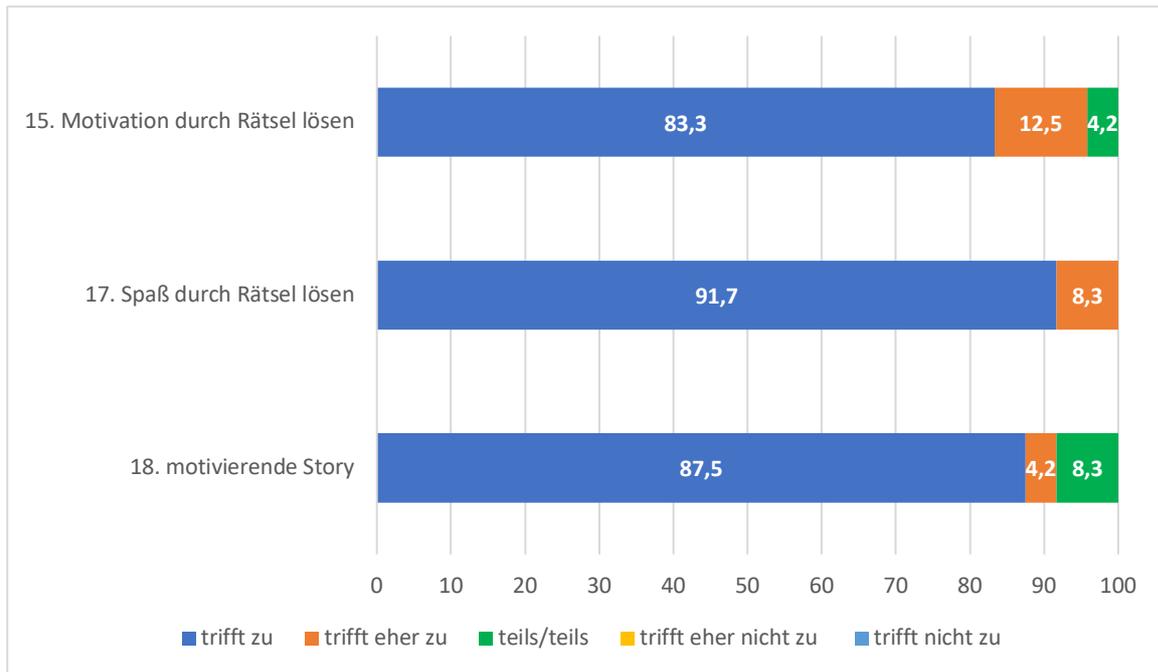


Abb. 70: Antworten zu den Fragen 15, 17 und 18 des Fragebogens in % (Gesamtzahl der Fragebögen: 24)

Ein weiterer Aspekt, auf den im Schülerlabor einen großen Wert gelegt wurde, ist die Gestaltung als Escape-Room. Die verschiedenen Vorteile wurden bereits in Abschnitt 3.2. aufgelistet. Einer dieser Vorteile, der auch bei dem Fragebogen angesprochen wurde, ist die Weckung von Interesse und Motivation. Im Fragebogen wurde untersucht, ob zum einen das Lösen der Rätsel und Knacken der Schlösser und zum anderen die Story des Escape-Rooms als motivierend empfunden wurde. Dabei kam heraus, dass in 91,7% der Fälle die Story als motivierend empfunden wurde (siehe Abb. 70 Frage 18). Auch das Lösen der Rätsel und Knacken der Schlösser wurde von 95,8% der Schülerinnen als motivierend wahrgenommen (siehe Abb. 70 Frage 15). Als weiterer Indikator wurde der Spaß beim Lösen der Rätsel und Knacken der Schlösser gemessen. Der Spaßfaktor wurde hier angesprochen, da dieser mit der Motivation und Interesse positiv korreliert. Denn Spaß am Lernen erzeugt Interesse und Motivation (HAUBRICH 2001: 52). Dieser hohe Spaßfaktor am Escape Room konnte von allen Schülerinnen bestätigt werden (siehe Abb. 70 Frage 17). Dies wird auch bei den offenen Fragen auf dem Fragebogen deutlich, wo einzelne Elemente des Escape Rooms den Schülerinnen besonders gut gefallen haben. Hier sind beispielsweise die Zahlen, die auf der Landkarte mit einem UV-Stift sichtbar gemacht werden sollen, zu nennen (siehe Anhang Abschnitt V.V.). Insgesamt wird durch die Fragebogen deutlich, dass sich der Escape Room positiv auf Interesse und Motivation ausgewirkt hat.

Im Folgenden werden die beiden Gütekriterien Objektivität und Reliabilität einer quantitativen Erhebung betrachtet (INGENKAMP und LISSMANN 2008: 51ff.). Zur Validität kann aufgrund der geringen

Stichprobenmenge keine Aussage gemacht werden. Durch Objektivität versucht man zu sichern, dass alle Schüler*innen den gleichen Anforderungen unter gleichen Bedingungen unterzogen werden. Diese Objektivität fand grundsätzlich statt, da alle Schülerinnen die gleichen Stationen bearbeitet und den gleichen Fragebogen ausgefüllt haben. Eine negative Auswirkung auf die Objektivität hatte die Tatsache, dass die beiden Schülergruppen das Labor zu einer unterschiedlichen Zeit besucht haben. Aus diesem Grund wurden Probleme und Schwierigkeiten, mit der die erste Gruppe konfrontiert war, in der Zwischenzeit ausgebessert. Auf diese Weise fand die zweite Gruppe nicht die gleichen Bedingungen vor und hatte es einfacher die Stationen zu bearbeiten. Das kann einen direkten Einfluss auf die Bewertung des Labors haben. Die Reliabilität der Messung mithilfe der Fragebögen weist einige Mängel auf. Der größte Mangel stellt die geringe Anzahl von nur vier Stichproben dar. Diese Anzahl an Stichproben ist für eine quantitative Erhebung zu gering. Auch muss für eine richtige quantitative Untersuchung, das Schülerlabor von mehreren Klassen durchgeführt werden. Zudem fehlt eine Kontrollgruppe zum Vergleich, welche die Inhalte des Schülerlabors ohne Versuche und Escape-Room-Szenario vermittelt bekommt. In dieser Form spiegelt die Erhebung nur ein Stimmungsbild wider. Ein weiterer Einfluss auf die Repräsentativität der Messung könnte der Umstand gemacht haben, dass die Schülerinnen das Schülerlabor freiwillig in ihrer Freizeit absolviert haben. Das ist Hinweis darauf, dass sich die Schülerinnen für naturwissenschaftliche Themen interessieren und zu dem leistungsfähigeren Teil ihrer Klasse angehören. Hinzu kommt, dass es sich bei allen Testpersonen um Personen des weiblichen Geschlechts handelte. Auf diese Weise repräsentieren sie nicht die Grundgesamtheit einer durchschnittlichen Schulklasse.

Insgesamt kann man bei der Betrachtung der Gütekriterien der Messung erkennen, dass durch die geringe Stichprobenzahl und die Tatsache, dass die Schülerinnen einer leistungsstärkeren Teilmenge der Klasse angehören, die Datenerhebung bei weitem nicht den Kriterien einer wissenschaftlichen Messung entspricht. Trotzdem sind bei der Reflexion Tendenzen erkennbar, dass die Modellversuche und das Escape-Room-Szenario sich positiv auf den Lernprozess ausgewirkt haben.

7. Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit ist es gelungen, ein Schülerlabor zu konzipieren, das die vielfältigen Aspekte des Klimawandels aufgreift und diese miteinander verbindet. Damit konnte das Ziel erreicht werden, den Schülerinnen und Schülern die physikalischen Prinzipien und die Folgen des Klimawandels näher zu bringen sowie die Auseinandersetzung mit nachhaltigem Handeln und einer verantwortungsbewussten Lebensgestaltung zu schaffen. Das Erreichen dieses Ziels konnte durch die Rückmeldung der Schülergruppen bestätigt werden.

Das Schülerlabor zeichnet sich durch eine Reihe von Besonderheiten aus. In seinen sechs Stationen bietet es neben seiner inhaltlichen Vielfalt auch eine Methodenvielfalt. Es wurden Versuche, Lernvideos, Spiele, interaktive Visualisierungsmodelle und vieles mehr speziell für dieses Schülerlabor konzipiert. Dabei wurden die Versuche mithilfe von realitätsnahen Darstellungen mittels Modellbau bewusst so gestaltet, dass ein möglichst genaues optisches Abbild der Natur geschaffen wird. Auch wurden die Inhalte nicht nur auf die Physik beschränkt, sondern auch Themenfelder aus Geographie, Biologie, Chemie und Sozialwissenschaften mit einbezogen, um die Interdisziplinarität des Themas gebührend umzusetzen. Ein ganz besonderes Alleinstellungsmerkmal dieses Schülerlabors ist die Einbettung in einen Escape Room als Educational Gaming Ansatz. Durch die Vielzahl an Rätseln und Aufgaben, die gelöst werden sollen, wurde ein neuer Weg des spielerischen Lernens geschaffen. Damit ist das „Climate Escape“ ein Ort des interdisziplinären, kooperativen, kognitiv aktivierenden und kontextbezogenen Lernens.

Zusammenfassend kann das Schülerlabor Climate Escape eine inhaltliche und soziopolitisch hochrelevante Erweiterung zu den bestehenden Schülerlaboren des NaT-Lab Uni Mainz darstellen und viele Schüler*innen in ihrem Verantwortungsbewusstsein gegenüber dem Klimawandel prägen. Damit werden hier fundamentale Grundlagen für die aktuelle Klimawandeldebatte vermittelt und die Schüler*innen befähigt, eine individuelle Meinung im gesellschaftlichen Diskurs vertreten zu können.

III. LITERATURVERZEICHNIS

- ARNOLD, R. (o.J.): Didaktische Reduktion. Internet: <https://service.zfl.uni-kl.de/wp/glossar/didaktische-reduktion> (20.10.2020).
- BAHR, M. (2013): Der Vielfalt mit Vielfalt begegnen – Binnendifferenzierung im Geographieunterricht. Praxis Geographie (6): 4 – 9.
- BERGE, O. E. (2009): Der Klimawandel und der Anstieg des Meeresspiegels. In: Unterricht Physik (111/112): 76 – 77.
- BIJMA, J. und D. BURHOP (2010): Ozeanversauerung – das weniger bekannte CO₂-Problem. In: Geographische Rundschau 5: 16 – 20.
- Bildungsserver Klimawandel (2020): Treibhauseffekt. Internet: <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Treibhauseffekt> (22.09.2020).
- BIOACID / Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel (²2012): Das andere CO₂-Problem Ozeanversauerung. Acht Experimente für Schüler und Lehrer. Kiel.
- BORRMANN, S. (2019): Physik am Samstag. Es werde Licht. Teil 1 – Licht und Klima. Vortrag. Mainz. 16.02.2019.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2017): Die Klimakonferenz in Paris. Internet: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen/> (11.10.2020).
- CAIS, P. und C. SABINE (2013): Carbon an Other Biogeochemical Cycles. In: IPCC (2013): Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Internet: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter06_FINAL.pdf (22.09.2020).
- COLDITZ, M. et al. (2007): Bildungsstandards konkret. In: Geographie heute (255/256): 14 – 17.
- DemoEx GmbH (o.J.): Treibhauseffekt. Internet: <http://www.demoex.ch/?Produkte> (27.09.2020).
- DEMTRÖDER, W. (²2000): Experimentalphysik 3. Atome, Moleküle und Festkörper. Band 3. Berlin. Heidelberg. New York.
- DEMTRÖDER, W. (⁵2016): Experimentalphysik 3. Atome, Moleküle und Festkörper. Band 3. Berlin. Heidelberg. New York.

- Deutsches Klimarechenzentrum a (DKRZ) (o.J.): Ozeanversauerung. Internet: <https://www.dkrz.de/kommunikation/klimasimulationen/de-cmip5-ipcc-ar5/ergebnisse/ozeanversauerung> (07.04.2020).
- Deutsches Klimarechenzentrum b (DKRZ) (o.J.): Globale Mitteltemperatur. Internet: <https://www.dkrz.de/kommunikation/klimasimulationen/de-cmip5-ipcc-ar5/ergebnisse/Mitteltemperatur> (07.04.2020).
- DGFG (2004): Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss. Bonn.
- DGFG (⁸2014): Bildungsstandards im Fach Geographie für den Mittleren Schulabschluss – mit Aufgabenbeispielen. Bonn.
- DREXEL, C. (2019): Warum Meerschweinchen das Klima retten – Einfache Strategien für eine bessere CO₂-Bilanz. München.
- DUDEN (o.J.): Wetter. Internet: https://www.duden.de/rechtschreibung/Wetter_Zustand_Klima_Gewitter_Gas (13.08.2020).
- DUSKE, P. (2017): Bilingualer Unterricht im Fokus der Biologiedidaktik: Auswirkungen von Unterrichtssprache und -kontext auf Motivation und Wissenserwerb. Wiesbaden.
- Escaperooms Gießen (o.J.): Was ist ein Escape Room? Internet: <https://www.escaperooms-giessen.de/mobile/escape-room.html> (16.04.2020).
- FICKERT, T. und J. HERGET (2019): Klima, Klimawandel und Klimafolgen. In: Geographische Rundschau (12): 4 – 5.
- FILSECKER WAGNER, M. K. (2014): Engagement in educational games: An exploration of the interaction between game features, players' perceptions and learning. Duisburg-Essen.
- Geographie aktuell und Schule (2014): Bedrohung für die Umwelt: Der Treibhauseffekt. In: Geographie aktuell und Schule 36 (208): 46 – 48.
- HAGEMANN, R. (2005): Treibhaus Erde – Ein Leben hinter G(l)asscheiben!? Der Treibhauseffekt – so verändern Spurengase unser Klima. In: Praxis Geographie 5: 8 – 13.
- HANTEL, M. (2016): Grundkurs Klima. Berlin. Heidelberg.
- HAUBRICH, H. (2001): Lernbox Geographie. Das Methodenbuch. Velber.
- HAVERSATH, J.-B. (2012): Geographiedidaktik. Braunschweig.

- HEINEMANN, G. (2015): Die Rolle des Meereises im Klimasystem. In: Geographie aktuell und Schule 37 (214): 4 – 9.
- HIEBER, U. (2011): Aufgabentypen – die Vielfalt macht’s. Abwechslungsreiche Aufgabenstellung im Geographieunterricht. In: Geographie heute (291/292): 16 – 19.
- HOFFMANN, T. (2015): Nicht mehr als plus zwei Grad! Der Budgetansatz. In: Geographie heute (326): 42 – 45.
- INGENKAMP, K.-H. und U. LISSMANN (⁶2008): Lehrbuch der Pädagogischen Diagnostik. Weinheim. Basel.
- IPCC (2013): Klimaänderungen 2013. Naturwissenschaftliche Grundlagen. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Bonn.
- KANWICHER, D. und A. KOHLY (2006): Land unter in Schleswig-Holstein. Eine Unterrichts Anregung zu Klimawandel und Meeresspiegelanstieg. In: Geographie heute (241/242): 16 – 24.
- KIRCHER, E. et al. (⁴2019): Physikdidaktik Grundlagen. Würzburg.
- KLOSE, B. (³2016): Meteorologie. Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. Berlin. Heidelberg.
- KONZ, M. (2019): Klimaphysik in der Schule. Konzeption, Durchführung und Evaluation einer Unterrichtsreihe für den Physikunterricht der Sekundarstufe II. Mainz.
- KOTZTIN, S. (2019): Die Gletscher schmelzen. Eine Learning App zu den Folgen der Gletscherschmelze erstellen. In: Geographie heute (342): 27 – 31.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2004): Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10). München, Neuwied.
- LATIF, M. (2009a): Klimawandel und Klimadynamik. Stuttgart.
- LATIF, M. (2009b): Klimawandel. In: Praxis Geographie (3): 6 – 8.
- LAWRENCE, M. G. (2019): Herausforderungen des Pariser Abkommens. Vortrag. Mainz. 04.08.2019.
- LAWRENCE, M. G. et al. (2018): Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals.
- Lehr-Lern-Forschungslabor Universität Mainz (o.J.): Definition kognitive Aktivierung. Internet: <https://llf.uni-mainz.de/> (20.10.2020).
- LEISEN, J. (2018): Was Lehrkräfte brauchen – Ein praktikables Lehr-Lern-Modell. Mainz.

- LEUJAK, W., H. GINZKY und U. CLAUSSEN (2012): Eisendüngung – Mehr CO₂ Fixierung durch das Meer? In: LOZAN, J. (Hrsg.) (2012): Warnsignal Klima: Die Meere – Änderungen und Risiken. Hamburg.
- LÜDERS, K. und G. VON OPPEN (2012): Klassische Physik – Mechanik und Wärme. Berlin. Boston.
- MARTIN et al. (2001c): Nachhaltigkeit. Internet: <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/nachhaltigkeit/5312> (01.09.2020).
- MARTIN, C. et al. (2001a): Albedo. Lexikon der Geographie. Internet: <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/albedo/241#abb> (14.04.2020).
- MARTIN, C. et al. (2001b): Eis-Albedo-Rückkopplung. Lexikon der Geographie. Internet: <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/eis-albedo-rueckkopplung/1949> (14.04.2020).
- MARZEION, B. (2019): Anstieg des Meeresspiegels in Vergangenheit und Zukunft. Prozesse und Mechanismen. In: Geographische Rundschau (12): 18 – 23.
- Max-Planck-Gesellschaft (MPG) (2010): Der Kohlenstoffkreislauf im Erdsystem. Internet: https://www.mpg.de/21324/Kohlenstoffkreislauf_im_Erdsystem (13.06.2020).
- Max-Planck-Institut für Meteorologie (o.J.): Der Aufbau der Atmosphäre. Internet: <https://mpi-met.mpg.de/kommunikation/mediathek/abbildungen/aufbau-der-atmosphaere> (20.08.2020).
- MERTINS, H.-C. und M. GILBERT (2011): Prüfungstrainer Experimentalphysik. Physik verstehen und lernen für die mündliche Prüfung im Bachelor (Haupt- und Nebenfach). Heidelberg.
- Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur (MBWWK) (2010): Rahmenlehrplan Naturwissenschaften für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz. Klassenstufen 5 und 6. Mainz.
- Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur (MBWWK) (2014): Lehrpläne für die naturwissenschaftlichen Fächer für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz. Biologie – Chemie – Physik. Klassenstufen 7 bis 9/10. Mainz.
- Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur (MBWWK) (2016): Lehrplan für die gesellschaftswissenschaftliche Fächer. Erdkunde, Geschichte, Sozialkunde. Mainz.
- MÖNTER, L. und K.-H. OTTO (2016): Experimentelle Arbeiten im Geographieunterricht. Grundlagen, Erkenntnisse, Konsequenzen. In: Geographie und Schule 38 (219): 4 – 13.
- MÖNTER, L. und M. SCHLITT (2014): Klimawandel, „Cool Roofs“ & Co. Anpassungsstrategien und Handlungsmöglichkeiten im urbanen Raum – Didaktische Ansätze unter Gesichtspunkten des forschenden Lernens. In: Geographie aktuell und Schule 36 (212): 14 – 20.

- MÜLLER, W. und N. VAN BIEN (2009): Klimawandel in der Diskussion. Fragen an und Antworten von Stefan Rahmstorf vom Potsdamer Institut für Klimaforschung (PIK) als Ausgangspunkt für Unterricht. In: Unterricht Physik (111/112): 61 – 70.
- OPPENHEIMER, M. et al. (2019): Sea-Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities. In: IPCC (Hrsg.) (2019): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Internet: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/08_SROCC_Ch04_FINAL.pdf (12.08.2020).
- PHET a (o.J.): Schwarzkörper Strahlung. Internet: <https://phet.colorado.edu/de/simulation/blackbody-spectrum> (20.10.2020).
- PHET b (o.J.): Der Treibhauseffekt. Internet: <https://phet.colorado.edu/de/simulation/greenhouse> (20.10.2020).
- RAITH, W. et al. (²2001): Lehrbuch der Experimentalphysik 7. Erde und Planeten. Berlin.
- RICHTER, C (2019): Korallenriffe im Klimawandel. In: Geographische Rundschau 71 (3): 16 – 19.
- RINSCHEDI, G. (³2007): Geographiedidaktik. Paderborn.
- Santa Monica Mirror (2017): Board of supervisors takes first step toward energy-saving “cool roofs” being built. Internet: <https://smmirror.com/2017/08/board-supervisors-takes-first-step-toward-energy-saving-cool-roofs-built/> (22.09.2020).
- SCHÖNWIESE, C.-D. (1996): Anthropogene Verstärkung des Treibhauseffektes. Weltklima im Wandel. In: Geographie aktuell und Schule 18 (101): 14 – 24.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2009): Klimawandel im Industriezeitalter: Fakten und Interpretation der Vergangenheit. In: Geographische Rundschau (9): 4 – 11.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (²2003): Klimatologie. Stuttgart.
- SCHULZ, K. und U. RIEBESELL (2012): Versauerung des Meerwassers durch anthropogenes CO₂. In: LOZAN, J. (Hrsg.) (2012): Warnsignal Klima: Die Meere – Änderungen und Risiken. Hamburg.
- SCHWARZ, O. (2009): Das Konzept des Strahlungsantriebes verstehen. Kosmische Strahlungsantriebe in elementarer Darstellung als Weg zum Verständnis anthropogener Strahlungsantriebe. In: Unterricht Physik (111/112): 13 – 19.
- SIRTL, S. (2010): Absorption thermischer Strahlung durch atmosphärische Gase. Experimente für den Physikunterricht. Freiburg.

- TATUM, J.B. (o.J.): Online lecture notes. Stellar Atmospheres. Chapter 2. Blackbody Radiation. <http://astrowww.phys.uvic.ca/~tatum/stellatm/atm2.pdf> (24.07.2020).
- THUNBERG, G. (2018): Greta Thunberg's speech to the world. UN Climate Change COP24 Conference. Vortrag. Katowice. (12.12.2018).
- TIPLER, P. et al. (2019): Physik für Studierende der Naturwissenschaften und Technik. Berlin.
- UHLENWINKEL, A. (2008): Binnendifferenzierung im Geographieunterricht. In: Praxis Geographie (3): 4 – 6.
- UHLENWINKEL, A. (2010): Spielen im Geographieunterricht. Möglichkeiten und Herausforderungen. In: Praxis Geographie (7-8): 4 – 8.
- Umweltbundesamt (2006): Klimagefahr durch tauenden Permafrost? In: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/357/dokumente/klimagefahr_durch_tauenden_permafrost.pdf (06.08.2020).
- VON HUMBOLDT, A. (1844): Central-Asien. Untersuchungen zu den Gebirgsketten und zur vergleichenden Klimatologie. Frankfurt am Mainz.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2006): Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten. Berlin.
- WEISCHET, W. und W. ENDLICHER (2012): Einführung in die Allgemeine Klimatologie. Berlin. Stuttgart.
- Wikimedia Commons (2006): Korallenbleiche Réunion. Internet: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EL18p-Réunion.jpg> (10.08.2020).
- Wikimedia Commons (2016): Atmospheric Transmission. Internet: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_Transmission_de.png (02.09.2020).
- WITTLICH, C. (2012): Im Treibhaus: Die Ozean-CO₂-Rückkopplung. In: Praxis Geographie (7-8): 27 – 31.
- WODZINSKI, R. (2004): Kooperatives Lernen: mehr als nur Gruppenarbeit. Gründe für kooperatives Arbeiten im Physikunterricht. In: Unterricht Physik (84): 4 – 7.
- World Meteorological Organization (WMO) (2019): WMO Greenhouse Gas Bulletin. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018. No. 15. Internet: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10100 (19.10.2020).

Worldwatchers (o.J.): klimakompass – Quellen und Berechnungen. Internet: <https://www.notion.so/klimakompass-Quellen-und-Berechnungen-worldwatchers-c2647d3492404e2a9c27500613ccad84> (01.09.2020).

Zentrum für Schulqualität und Lehrerbildung Baden-Württemberg (ZSL) (o.J.): Operatorenkatalog. Basisoperatorenkatalog in den gesellschaftswissenschaftlichen Fächern in Baden-Württemberg. Internet: https://lehrerfortbildung-bw.de/u_gewi/gwg/gym/bp2004/fb1/modul1/geo/operator/ (19.19.2020).

IV. DANKSAGUNGEN

Die Konzeption des Schülerlabors "Climate Escape" war ein Projekt, das mir persönlich sehr am Herzen lag und deshalb freue ich mich umso mehr, dass ich fast alle meine Ideen verwirklichen konnte. Alleine hätte ich es nicht geschafft, ein solch großes Projekt zu stemmen, weshalb ich sehr froh bin, dass mich so viele verschiedene Menschen unterstützt haben.

Mein erster Dank geht an Filip Sirrenberg, der das Schülerlabor mit mir zusammen konzipiert hat. Filip hat mir bei der Umsetzung von aller meinen Ideen geholfen, auch wenn er der Meinung war, dass ich manchmal etwas über das Ziel hinausschieße. Gemeinsam haben wir die unterschiedlichen Stationen entwickelt und er hat mir immer geholfen, wenn ich ihn brauchte.

Dann möchte ich mich noch bedanken, für meine sehr gute Betreuung durch Professor Dr. Uwe Oberlack und Professor Dr. Klaus Wendt. Sie haben mir bei unseren regelmäßigen Treffen immer wieder neue Impulse gegeben und das Projekt finanziell unterstützt. Auch haben sie sich immer Zeit genommen, wenn ich ein Problem hatte. Besonderer Dank geht hierbei an Johannes Lhotzky, der als Ansprechpartner immer zu Stelle war, bei Problemen geholfen hat und mir immer Feedback geben konnte.

Auch geht ein Danke an die Mitarbeiter*innen des Instituts Physik und dem Max-Planck-Institut für ihre Unterstützung. Besonders an Joachim Strübig, der uns mit Chemikalien versorgt hat und uns bei Chemiefragen beraten hat, an Henrik Winnemöller, der mich beim Programmieren unterstützt hat, an Karl-Heinz Geib, der die Versuchsaufbauten für uns optimierte, an Michael Boeßenecker, der uns bei der Elektronik geholfen hat, an Frank Fiedler und Sigrid Hirschmann, die uns die Geräte vom Demo-Praktikum zur Verfügung stellten, an Peter Motzko, der uns bei den Vorversuchen unterstützte, an Prof. Dr. Stefan Borrmann, der uns den Versuch „Treibhauseffekt“ als Leihgabe zur Verfügung stellte und Dr. Christiane Schulz, die uns auch mit ihren Ideen unterstützte.

Ein weiteres Danke geht an meine Familie für ihre Unterstützung. Besonders an meinen Vater Hans-Jürgen Graffe, der die elektronischen Bauteile verbaute, an meinen Bruder Torben Vetter, der die Arbeit Korrektur las und die Stationen testete und an meinen Bruder Ruben Vetter, der mich beim Programmieren unterstützte.

Dann möchte ich mich noch bei folgenden Personen bedanken: bei Arsim Bozkurt, dass er die Halterung für den Albedo- und Meeresspiegel-Versuch gebaut hat, bei Baris Agus, dass er uns aus physikdidaktischer Perspektive ein Feedback zu den Stationen gegeben hat, bei Markus Monnerjahn, dass er eine Umfrage zum Thema Klimawandel bei seinen Schulklassen durchgeführt hat, bei Dr. Christine Kubitza, dass sie meine Arbeit Korrektur gelesen hat und bei Peter Burkard, Mirko Herche und Jessica

Schilling, dass sie mich bei Problemen unterstützt haben. Nichts zu vergessen, bedanke ich mich auch bei meinen Versuchskaninchen: Anna Oberlack, Aya Chbeb, Johanna Michalewicz, Elisa Schöttke und Jule Cerny sowie bei Paula Schöttke für die Vermittlung.

Zum Schluss gehen noch ein paar Grüße nach ganz Deutschland an Personen, die uns mit ihren Ideen unterstützt haben. Hierbei besonderen Dank an Ingo Mennerich vom Schulbiologie Zentrum Hannover und Prof. Dr. Peter Menzel.

V. ANHANG

V.I. Lernaufgaben (Kurzfassung)

Im Folgenden sind für jede Station die Lernaufgaben ohne Kontext aufgelistet. Im Schülerlabor werden diese noch in den Kontext des Escape-Rooms eingebettet. Zudem werden noch Material, Anforderungsbereich und didaktische Funktion zu jeder Lernaufgabe genannt.

V.I.I. Station 1: Albedo (Überwachungszentrale für Wetterstationen)

Aufgabe	Aufgabenstellung	Material	AFB	Didaktische Funktion
α	Betrachtet die Klimadaten der unterschiedlichen Wetterstationen auf der Karte. Benennt die drei Stationen, welche eine Abweichung im Vergleich zu den anderen Stationen aufweisen.	Karte der globalen Wetterstationen	1	Entwicklung der Problemstellung
β	Vergleicht die Bilder von früher und heute miteinander. Wenn ihr eine Auffälligkeit entdeckt habt, dann notiert ein passendes Schlagwort.	Bilder von den drei Stationen früher und heute	2	Entwicklung der Problemstellung
γ	Ordnet den Definitionen den passenden Begriff zu A) Der Begriff bezeichnet das Aufnehmen von Licht durch ein Medium. B) Der Begriff bezeichnet das Zurückwerfen von Licht an einer Grenzfläche. C) Der Begriff bezeichnet das Aussenden von Licht durch ein Medium. 1) Inklination 2) Transmission 3) Emission 4) Reflexion 5) Extinktion 6) Absorption		1	Vorwissen aktivieren

Ω	Ordnet jedem Kasten einen Landschaftstyp zu.	Bilder von Modelllandschaftskästen, Begriffskarten	1	Übergang von Real- in den Modellraum
ϵ	In folgender Abbildung wurden verschiedene Durchschnittswerte von der Erdoberfläche in Watt pro Quadratmeter aufgetragen. Berechnet mithilfe dieser Werte die terrestrische Albedo.	Abbildung „Solare Einstrahlung“	2	Erkenntnisgewinn: Berechnung des Albedowertes
ζ	Stellt eine eigene Vermutung für den Ausgang des Versuchs auf, indem ihr die Bilder an der Wand von niedriger bis hoher Albedo anordnet.	Bilder von Kästen	2	Hypothesenbildung 1
η	Führt mithilfe der beiden Luxmeter eine Messung über jeder Modelllandschaft durch und berechnet die Albedo für jeden Kasten. Die gemessenen und berechneten Werte werden auf den Kärtchen an der Wand notiert.	Luxmeter, Versuch „Albedo“	2	Messung Versuch 1
θ	Benennt die Eigenschaft, in welcher sich die vier Landschaften neben der Oberflächenbeschaffenheit noch voneinander unterscheiden.		2	Interpretation des Versuchs, Hypothese 2: Farbe der Landschaft hat Auswirkung auf Albedo
κ	Führt mithilfe der beiden Luxmeter eine zweite Messung über den verschiedenen Holzplatten durch und berechnet die Albedo.	bunte Holzplatten, Luxmeter, Versuch „Albedo“	2	Messung Versuch 2 (Überprüfung der Hypothese)
λ	Ergänzt die folgende Formulierung, damit sie mit euren Versuchsergebnissen übereinstimmt: Je heller der Farbton desto höher/niedriger die Albedo.		2	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinn: Albedo hängt von Oberflächenfarbe ab
μ	Stellt eine eigene Vermutung für den Ausgang des Versuchs auf, indem ihr die Bilder an der Wand von niedriger bis hoher Temperatur anordnet.	Bilder von Kästen	2	Hypothesenbildung 3
ν	Führt mithilfe der Wärmebildkamera eine Messung über jeder Modelllandschaft durch und notiert die gemessenen Temperaturen.	Wärmebildkamera, Versuch „Albedo“	2	Messung Versuch 3

ρ	Ergänzt dafür die folgende Formulierung. Je niedriger die Albedo (bzw. reflektierte Strahlung) der Landschaft, desto höher/niedriger die absorbierte Strahlung. Je höher die absorbierte Strahlung desto höher/niedriger die Oberflächentemperatur.		2	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinnung: Zusammenhang zwischen Albedo und Oberflächentemperatur
π	Leider ist die Legende mit der richtigen Zuordnung der Farben zum Landschaftstyp verloren gegangen. Ordnet jedem Landschaftstyp die richtige Farbe (Prozentanteil) zu. Dabei hilft euch die Weltkarte.	Abbildung mit der graphischen Darstellung der Prozentwerte, Weltkarte	2	Übergang vom Modell- in den Realraum (Flächenanteile der Landschaften im Realraum)
ρ	Bestimmt die Auswirkungen auf die globale Durchschnittstemperatur, wenn das komplette Eis schmelzen würde und wenn alle Wälder komplett gerodet werden würden.	Programm zur Berechnung der globalen Durchschnittstemperatur	2	Übergang vom Modell- in den Realraum (Auswirkung der Albedo auf die globale Durchschnittstemperatur)

Hauptaufgabe

Aufgabenstellung	Material	AFB	Didaktische Funktion
Schreibt einen kurzen Bericht, in dem ihr beurteilt, welche Auswirkungen die Veränderung der Landschaft auf die globale Albedo und den globalen Klimawandel haben kann.		3	Sicherung der neuen Erkenntnisse

Zusätzliche Aufgaben

Aufgabe	Aufgabenstellung	Material	AFB
σ	Überlegt, welche Zusammenhänge zwischen den einzelnen Begriffen bestehen. Achte auf Ursachen und Auswirkungen. Ordnet die Schnipsel in eine sinnvolle Reihenfolge an, dass ihr alle Begriffe mit Pfeilen verbindet. Beginnt mit Schnipsel 1.	Schnipsel und Pfeile	2
τ	Erläutert kurz, was Professor Ledderbogen mit dem Problem gemeint haben könnte.		2

<p>ϕ</p>	<p>Gestaltet ein Dorf (mit ca. 200 Einwohner*innen) so, damit die Albedo so hoch wie möglich ist. Wichtig: Jedes Gruppenmitglied zieht einen Zettel und liest sich den Inhalt gut durch. Wenn ihr damit fertig seid, dann misst über jedem Quadrat den Albedowert und bestimmt die Durchschnittsalbedo. Im Anschluss macht ein Bild von eurem Dorf.</p> <p>Position: Mobilität Du bist für die Mobilität des Dorfes zuständig. Sorge dafür, dass die Verkehrsinfrastruktur so gut ausgebaut ist, dass die Personen alle Gebäude und Anlagen problemlos erreichen können. Vergiss nicht, dass Ziel ist es eine möglichst hohe Albedo zu erreichen.</p> <p>Position: Lebensmittel Du bist für die Nahrungsmittelversorgung des Dorfes zuständig. Sorge dafür, dass genug Ackerflächen vorhanden sind, um das Dorf zu ernähren. Vergiss nicht, dass Ziel ist es eine möglichst hohe Albedo zu erreichen.</p> <p>Position: Wohnen und Arbeiten Du bist für Wohnen und Arbeiten im Dorf zuständig. Es sollten genug Wohnungen und Arbeitsplätze für die Bewohner*innen zur Verfügung stehen. Auch den Wohnkomfort sollte nicht zu kurz kommen. Vergiss nicht, dass Ziel ist es eine möglichst hohe Albedo zu erreichen.</p> <p>Position: Vegetation Du bist für die Grünanlagen des Dorfes zuständig. Bäume und Wiesen sind gut für Körper und Geist. Sorge dafür, dass genug Grünanlagen im Dorf vorhanden sind. Vergiss nicht, dass Ziel ist es eine möglichst hohe Albedo zu erreichen.</p>	<p>Holzkasten mit Spielzubehör</p>	<p>3</p>
--------------------------	---	------------------------------------	----------

V.I.II. Station 2: Treibhauseffekt (Abteilung für Klimaschwankungen)

Aufgabe	Aufgabenstellung	Material	AFB	Didaktische Funktion
β	Berechnet die durchschnittliche Oberflächentemperatur der Erde in Celsius. Bei der Strahlungsleistung pro Fläche (S) handelt es sich um das Sonnenlicht, das von der Atmosphäre und der Erdoberfläche absorbiert wird.	Arbeitsblatt zum Stefan-Boltzmann-Gesetz und Abbildung „Strahlungshaushalt“	2	Entwicklung der Problemstellung
γ	Vergleicht den Wert (-18°C) mit dem realen durchschnittlichen Temperaturwert und bestimmt, deren Abweichung.	Plakat „Wetterstationen und Temperaturmessung“ an der Wand	2	Entwicklung der Problemstellung
δ	Ordnet der Abbildungen der Versuchsteile in der Reihenfolge wie beim Versuchsaufbau an und ordnet den einzelnen Versuchsteilen die richtigen Begriffe zu.	Versuch „Treibhauseffekt“, Abbildung mit Kästchen, Kärtchen mit Bildern und Begriffen	1	Übergang von Real- in den Modellraum
ϵ	Bei dem Versuch wird Kohlenstoffdioxid (CO ₂) als Treibhausgas verwendet. Dieses wird später in die Atmosphäre gegeben. Stellt eine Vermutung auf, welche Auswirkung das CO ₂ auf die Temperaturmessung des Satelliten, der sich außerhalb der Atmosphäre befindet, hat.	Abbildung „Thermometer“	2	Hypothesenbildung
ζ	Dreht an der Rückseite des Satelliten an dem Metallrad bis der Zeiger auf den oberen, vorletzten Strich zeigt. Die Skala kann als Temperaturskala betrachtet werden. Das heißt, je höher der Zeiger steht, desto höher die Temperatur. Überprüft, ob der graue Gummistopfen unten in der Atmosphäre steckt. Füllt mithilfe des Sodastreams (grauer Knopf drücken) CO ₂ in die Atmosphäre ein und beobachtet die Skala. Danach macht den Gummistopfen ab, damit das CO ₂ entweichen kann. Beobachtet erneut die Skala.	Versuch „Treibhauseffekt“, Sodastream	2	Versuchsdurchführung

η	Benennt, was ihr beobachten konntet, nachdem ihr das CO ₂ eingefüllt habt. Die Temperatur ist ... <input type="checkbox"/> ... gesunken. <input type="checkbox"/> ... gleich geblieben. <input type="checkbox"/> ... angestiegen.		1	Beobachtung Versuch
θ	Simulation: Zuerst einmal wollen wir die Atmosphäre ohne Treibhausgase untersuchen. Tragt eure Messwerte auf das Blatt „Simulation Treibhauseffekt“ ein. a) Zählt 2 Minuten lang, wie viele sichtbare Lichtteilchen den Satelliten berühren. b) Zählt 2 Minuten lang, wie viele infrarote Lichtteilchen den Satelliten berühren. c) Zählt 2 Minuten lang, wie viele infrarote Lichtteilchen das gelbe Haus (auf der rechten Seite) berühren.	Simulation „Treibhauseffekt“	1	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinnung: Erklärung natürlicher Treibhauseffekt
ι	Wählt die Aussage aus, welche die Bewegung der sichtbaren Lichtteilchen am besten beschreibt (Aufgabe ι). <input type="checkbox"/> Startet von der oberen Atmosphäre und bewegt sich geradlinig zur Erde. <input type="checkbox"/> Startet von der Erde und bewegt sich geradlinig zur oberen Atmosphäre. <input type="checkbox"/> Startet von der oberen Atmosphäre, bewegt sich in Richtung Erde und bewegt sich plötzlich wieder in entgegengesetzte Richtung. <input type="checkbox"/> Startet von der Erde, bewegt sich in Richtung oberer Atmosphäre und bewegt sich plötzlich wieder in entgegengesetzte Richtung.		1	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinnung: Erklärung natürlicher Treibhauseffekt
κ	Wählt die Aussage aus, welche die Bewegung der infraroten Lichtteilchen am besten beschreibt. <input type="checkbox"/> Startet von der oberen Atmosphäre und bewegt sich geradlinig zur Erde. <input type="checkbox"/> Startet von der Erde und bewegt sich geradlinig zur oberen Atmosphäre.		1	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinnung: Erklärung natürlicher Treibhauseffekt

	<input type="checkbox"/> Startet von der oberen Atmosphäre, bewegt sich in Richtung Erde und bewegt sich plötzlich wieder in entgegengesetzte Richtung. <input type="checkbox"/> Startet von der Erde, bewegt sich in Richtung oberer Atmosphäre und bewegt sich plötzlich wieder in entgegengesetzte Richtung.			
λ	<p>Nun wollen wir die Atmosphäre mit einer hohen Treibhausgaskonzentration untersuchen. Tragt eure Messwerte auf das Blatt „Simulation Treibhauseffekt“ ein.</p> <p>a) Zählt 2 Minuten lang, wie viele sichtbare Lichtteilchen den Satelliten berühren.</p> <p>b) Zählt 2 Minuten lang, wie viele infrarote Lichtteilchen den Satelliten berühren.</p> <p>c) Zählt 2 Minuten lang, wie viele infrarote Lichtteilchen das gelbe Haus berühren.</p>	Simulation „Treibhauseffekt“	1	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinnung: Erklärung natürlicher Treibhauseffekt
μ	<p>Wählt die Aussage aus, welche die Bewegung der sichtbaren Lichtteilchen am besten beschreibt.</p> <input type="checkbox"/> Startet von der oberen Atmosphäre und bewegt sich geradlinig zur Erde. <input type="checkbox"/> Startet von der Erde und bewegt sich geradlinig zur oberen Atmosphäre. <input type="checkbox"/> Startet von der oberen Atmosphäre, bewegt sich in Richtung Erde und bewegt sich plötzlich wieder in entgegengesetzte Richtung. <input type="checkbox"/> Startet von der Erde, bewegt sich in Richtung oberer Atmosphäre und bewegt sich plötzlich wieder in entgegengesetzte Richtung.		1	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinnung: Erklärung natürlicher Treibhauseffekt
ν	<p>Wählt die Aussage aus, welche die Bewegung der infraroten Lichtteilchen am besten beschreibt (Aufgabe ν).</p> <input type="checkbox"/> Startet von der oberen Atmosphäre und bewegt sich geradlinig zur Erde. <input type="checkbox"/> Startet von der Erde und bewegt sich geradlinig zur oberen Atmosphäre.		1	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinnung: Erklärung natürlicher Treibhauseffekt

	<input type="checkbox"/> Startet von der oberen Atmosphäre, bewegt sich in Richtung Erde und bewegt sich plötzlich wieder in entgegengesetzte Richtung. <input type="checkbox"/> Startet von der Erde, bewegt sich in Richtung oberer Atmosphäre und bewegt sich plötzlich wieder in entgegengesetzte Richtung.			
ξ	<p>Wählt die Aussage aus, welche eure Beobachtungen bei der Simulation zutreffend beschreibt:</p> <p>3. Sichtbare Lichtteilchen</p> <input type="checkbox"/> Anzahl der sichtbaren Lichtteilchen hat bei der Simulation mit Treibhausgasen stark zugenommen. <input type="checkbox"/> Anzahl der sichtbaren Lichtteilchen hat bei der Simulation mit Treibhausgasen stark abgenommen. <input type="checkbox"/> Anzahl der sichtbaren Lichtteilchen ist bei der Simulation mit Treibhausgasen fast gleich geblieben. <p>2. Infrarote Lichtteilchen beim Satelliten</p> <input type="checkbox"/> Anzahl der infraroten Lichtteilchen hat bei der Simulation mit Treibhausgasen beim Satelliten stark zugenommen. <input type="checkbox"/> Anzahl der infraroten Lichtteilchen hat bei der Simulation mit Treibhausgasen beim Satelliten stark abgenommen. <input type="checkbox"/> Anzahl der infraroten Lichtteilchen ist bei der Simulation mit Treibhausgasen beim Satelliten fast gleich geblieben. <p>3. Infrarote Lichtteilchen beim gelben Haus</p> <input type="checkbox"/> Anzahl der infraroten Lichtteilchen hat bei der Simulation mit Treibhausgasen beim gelben Haus stark zugenommen. <input type="checkbox"/> Anzahl der infraroten Lichtteilchen hat bei der Simulation mit Treibhausgasen beim gelben Haus stark abgenommen. <input type="checkbox"/> Anzahl der infraroten Lichtteilchen ist bei der Simulation mit Treibhausgasen beim gelben Haus fast gleich geblieben.		1	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinnung: Erklärung natürlicher Treibhauseffekt

π	<p>Wählt die richtige Antwort aus, welche die Beobachtungen bei der Simulation erklärt.</p> <p><input type="checkbox"/> Treibhausgase haben keinen Einfluss auf die sichtbaren Lichtteilchen.</p> <p><input type="checkbox"/> Treibhausgase haben keinen Einfluss auf die infraroten Lichtteilchen.</p> <p><input type="checkbox"/> Treibhausgase sorgen dafür, dass einige sichtbaren Lichtteilchen ihre Bewegungsrichtung umkehren.</p> <p><input type="checkbox"/> Treibhausgase sorgen dafür, dass einige infraroten Lichtteilchen ihre Bewegungsrichtung umkehren.</p>		2	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinnung: Erklärung natürlicher Treibhauseffekt
ρ	<p>Ein Infrarotthermometer misst die Anzahl der infraroten Lichtteilchen. Je mehr infrarote Lichtteilchen vom Thermometer registriert werden, desto höher ist die Temperatur.</p> <p>Wählt die richtige Antwort aus.</p> <p>Ein Temperaturabfall beim Satelliten bei einer hohen Treibhausgaskonzentration kann dadurch erklärt werden, dass ...</p> <p><input type="checkbox"/> ... die Treibhausgase dafür sorgen, dass einige infraroten Teilchen ihre Bewegungsrichtung umkehren und dadurch weniger zum Satellit gelangen.</p> <p><input type="checkbox"/> ... die Treibhausgase eine schmale Schicht bilden, welche die infraroten Teilchen nicht durchqueren können und dadurch weniger zum Satellit gelangen.</p> <p><input type="checkbox"/> ... die Treibhausgase dafür sorgen, dass mehr infrarote Lichtteilchen zum Satellit gelangen.</p>		2	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinnung: Erklärung natürlicher Treibhauseffekt und Reduktion von Fehlvorstellungen
σ	<p>Wählt die richtige Antwort aus.</p> <p>Eine ansteigende Treibhausgaskonzentration am gelben Haus sorgt ...</p> <p><input type="checkbox"/> ... für einen Anstieg der Temperatur an dieser Stelle.</p> <p><input type="checkbox"/> ... für eine konstante Temperatur an dieser Stelle.</p> <p><input type="checkbox"/> ... für einen Abfall der Temperatur an dieser Stelle.</p>		2	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinnung: Erklärung natürlicher Treibhauseffekt

Hauptaufgabe

Aufgabenstellung	Material	AFB	Didaktische Funktion
Ergänzt die Beschriftung in der Abbildung zum Strahlungshaushalt.	Abbildung Strahlungshaushalt	2	Sicherung der neuen Erkenntnisse

V.I.III. Station 3: Eigenschaften von Treibhausgasen (Abteilung für Molekularforschung)

Aufgabe	Aufgabenstellung	Material	AFB	Didaktische Funktion
β	Ordnet jedem Gas seinen Prozentanteil in der Luft und seinen molekularen Aufbau zu.	15 Kärtchen (5 Namen von Gasen, 5 Prozentzahlen, 5 Abbildungen mit Aufbau der Moleküle), Periodensystem	1	Aktivierung Vorwissen (Zusammensetzung Luft)
γ	Ordnet die Atomkerne nach der Stärke ihrer positiven Ladung an.	5 Kärtchen (Atomkerne), Periodensystem	1	Aktivierung Vorwissen (Stärke der positiven Ladung bei unterschiedlichen Atomkernen)
δ	Stellt eine Vermutung auf, bei welchen zwei Gasen es sich um Treibhausgase handelt.	Marker, Apparatur mit Röhren	2	Hypothesenbildung 1
ϵ	<p>Es gibt eine einfache Möglichkeit eine ungleichmäßige Ladungsverteilung und damit Treibhausgase ausfindig machen. Nehmt die Abbildungen von den vier Molekülen und versucht bei jedem Molekül zwei Spiegelachsen einzuzeichnen, sodass die Atome die gleichen bleiben.</p> <p>Sobald man zwei Spiegelachsen einzeichnen kann, handelt es sich um eine gleichmäßige Ladungsverteilung.</p> <p>Bestimmt, bei welchem Molekül es sich um ein Treibhausgas handeln muss.</p> <p><input type="checkbox"/> CO₂</p> <p><input type="checkbox"/> N₂</p> <p><input type="checkbox"/> Ar</p> <p><input type="checkbox"/> H₂O</p>	4 Abbildungen mit Aufbau der Moleküle, Spiegel	2	Beantwortung der Hypothese über Theorie, Erkenntnisgewinnung: molekularer Aufbau eines Treibhausgases
ζ	<p>Die infraroten Lichtteilchen können eine Schwingung anregen und damit eine ungleichmäßige Ladungsverteilung erzeugen, indem die Moleküle ihre Form ändern.</p> <p>Überprüft, ob man ein Molekül so deformieren kann, damit man zwei Spiegelachsen einzeichnen kann. Die Federn sind dabei zu vernachlässigen.</p>	Molekülmodelle, Spiegel	2	Beantwortung der Hypothese über Theorie, Erkenntnisgewinnung: molekularer Aufbau eines Treibhausgases

η	Bestimmt, bei welchem Molekül es sich um ein Treibhausgas handeln muss. <input type="checkbox"/> CO ₂ <input type="checkbox"/> N ₂ <input type="checkbox"/> Ar	Molekülmodelle, Spiegel	2	Beantwortung der Hypothese über Theorie, Erkenntnisgewinnung: molekularer Aufbau eines Treibhausgases
θ	Überlegt, welchen Bereich bzw. Gegenstand die verschiedenen Begriffe im Modellversuch entsprechen. Ordnet im Anschluss an Versuch A die richtigen Begriffe zu.	Begriffskärtchen, Versuch A „Aufbau Wasserdampf“	1	Übergang von dem Real- in den Modellraum
ι	Stellt eine Vermutung auf, welche Auswirkung der Wasserdampf und das CO ₂ auf die Temperaturmessung des Satelliten, der sich außerhalb der Atmosphäre befindet, hat. Die Temperatur ... <input type="checkbox"/> ... sinkt. <input type="checkbox"/> ... bleibt gleich. <input type="checkbox"/> ... steigt.		2	Hypothesenbildung 2
κ	Führt die Messungen bei Versuch A und B gleichzeitig durch. Beobachtet auf dem iPad das Verhalten der Temperaturkurve, solange bis sich die Kurve auf einer konstanten Temperatur bewegt.	Versuch A „Wasserdampf“ und B „CO ₂ “, iPad mit App „Smart Probes“, Sodastream	2	Versuchsdurchführung
λ	Benennt, was ihr beobachten konntet, nachdem ihr das CO ₂ und den Wasserdampf eingefüllt habt. Die Temperatur ist ... <input type="checkbox"/> ... gesunken. <input type="checkbox"/> ... gleich geblieben. <input type="checkbox"/> ... angestiegen.		1	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinnung: CO ₂ und H ₂ O sind Treibhausgase, experimentelle Beantwortung der Hypothese

μ	Stellt eine Vermutung auf, welche Auswirkung Argon auf die Temperaturmessung des Satelliten, der sich außerhalb der Atmosphäre befindet, hat. Die Temperatur ... <input type="checkbox"/> ... sinkt. <input type="checkbox"/> ... bleibt gleich. <input type="checkbox"/> ... steigt.		2	Hypothesenbildung 3
ν	Schaut euch das Video an und beobachtet die Temperaturkurve.	Video „Messung Argon“	1	Versuchsdurchführung
π	Benennt, was ihr beobachten konntet, nachdem das Gas eingefüllt wurde. Die Temperatur ist ... <input type="checkbox"/> ... gesunken. <input type="checkbox"/> ... gleich geblieben. <input type="checkbox"/> ... angestiegen.		1	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinnung: Argon ist kein Treibhausgas, experimentelle Beantwortung der Hypothese

Hauptaufgabe

Aufgabenstellung	Material	AFB	Didaktische Funktion
Ergänzt im Dokument den Text zum dazugehörigen Bild bzw. das Bild zum dazugehörigen Text.	Abbildung „Treibhausgase“	2	Sicherung der neuen Erkenntnisse

V.I.IV. Station 3b: Anthropogener Treibhauseffekt und Kipppunkte (Abteilung für Messdatenanalyse und Klimasimulation)

Aufgabe	Aufgabenstellung	Material	AFB	Didaktische Funktion
α	Bestimmt, um wie viel ppm die atmosphärische CO ₂ -Konzentration zwischen 1800 und 2015 angestiegen ist.	Kurvendiagramm: Anstieg der globalen CO ₂ -Konzentration der letzten 250 Jahre	1	Entwicklung der Problemstellung
β	Andere Wissenschaftler*innen haben bestimmt, dass die Atmosphäre bei einem Anstieg des CO ₂ -Gehaltes von 213 ppm um 1°C wärmer wird. Hinzu kommt noch, dass auch andere Treibhausgase in der Atmosphäre zugenommen haben seit 1800 und für eine Erwärmung der Atmosphäre von 0,33°C gesorgt haben. Berechnet, um wie viel °C sich die Atmosphäre zwischen 1800 bis 2015 erwärmt hat.		2	Entwicklung der Problemstellung
γ	Die Landschaften zeigen zum Teil die verschiedenen Ursachen für einen gestiegenen CO ₂ -Gehalt in der Atmosphäre. Zu jedem Modell gehört ein Prozentwert, der angibt, zu welchem Anteil sie zum globalen CO ₂ -Anstieg beitragen. Ordnet die Werte wieder den Landschaften zu.	6 Bildkärtchen, 6 Prozentkärtchen	2	Erkenntnisgewinnung: Ursachen für einen anthropogenen CO ₂ -Anstieg in der Atmosphäre
δ	Führt das interaktive Visualisierungsmodell durch und bestimmt, auf wie viel °C die Temperatur der Atmosphäre nach 10 Zeiteinheiten gestiegen ist.	interaktiven Visualisierungsmodell	2	Erkenntnisgewinnung: Auswirkungen von Kipppunkten
ϵ	Aber was wäre gewesen, wenn der Mensch unter der 2°C-Grenze geblieben wäre und nur maximal 2 CO ₂ -Teilchen in die Atmosphäre gegeben hätte. Bestimmt, auf wie viel °C die Temperatur der Atmosphäre nach 10 Zeiteinheiten gestiegen wäre.	interaktiven Visualisierungsmodell	2	Erkenntnisgewinnung: Auswirkungen von Kipppunkten
ζ	Das interaktive Visualisierungsmodell sollte euch helfen folgende Fragen zu beantworten. Wählt die passende Antwort aus.		2	Beantwortung der problemorientierten Fragestellung

	<p>Was passiert, wenn die 2°C-Grenze durch die Menschen nicht überschritten wird?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Die Temperatur der Atmosphäre nimmt ab. <input type="checkbox"/> Die Temperatur der Atmosphäre bleibt konstant. <input type="checkbox"/> Die Temperatur der Atmosphäre nimmt immer weiter zu, ohne dass der Mensch weitere Treibhausgase in die Atmosphäre emittiert. <p>Wie verhält sich die Temperatur in der Atmosphäre, wenn die Kippunkte überschritten wurden?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Die Temperatur steigt langsamer als vorher an. <input type="checkbox"/> Die Temperatur steigt schneller als vorher an. <input type="checkbox"/> Die Temperatur steigt weder langsamer noch schneller an. 			
--	---	--	--	--

Hauptaufgabe

Aufgabenstellung	Material	AFB	Didaktische Funktion
Beurteilt, ob das 2°C-Ziel bis zum Jahre 2100 noch erreicht werden kann.	Tabelle mit den Treibhausgaskonzentrationen im Jahre 2100 der unterschiedlichen RCP-Szenarien, Temperaturkurve bis zum Jahre 2100 für die unterschiedlichen RCP-Szenarien	3	Sicherung der neuen Erkenntnisse

Zusätzliche Aufgaben

Aufgabe	Aufgabenstellung	Material	AFB
η	<p>Stellt euch vor, ihr seid die Regierung eines Landes. Leider wurde schon so viel CO₂ in die Atmosphäre gegeben, dass bloß die Reduktion des CO₂-Ausstoßes nicht mehr ausreicht, um einen menschengemachten Klimawandel zu verhindern. Ihr seht als letzte Möglichkeit euer Land vor dem Klimawandel zu beschützen, indem ihr großflächig Geoengineering betreibt.</p> <p>a) Füllt die Tabelle aus.</p> <p>b) Beurteilt, welchen der drei Lösungsvorschläge ihr als Regierung für euer Land auswählen würdet, um dieses vorm Klimawandel zu beschützen.</p>	3 Lösungsstrategien (Geoengineering), Tabelle	3

V.I.V. Station 4: Meeresspiegelanstieg (Ozeanüberwachungszentrale)

Aufgabe	Aufgabenstellung	Material	AFB	Didaktische Funktion
β	Verortet das Dorf Halebüll auf der Landkarte.	Landkarte	1	Entwicklung der Problemstellung
γ	Bestimmt den Unterschied zwischen Meer- und Gletschereis. Dazu helfen euch Eisproben aus den beiden Flaschen. Mögliche Antworten: a) Meereis ist Eis, das von einem Gletscher an Land abgebrochen ist und ins Meer gestürzt ist. Jetzt schwimmt es auf dem Meer und wird als Meereis bezeichnet. b) Meereis ist ehemaliges Gletschereis, das auf dem Meer schwimmt, aber noch mit dem Gletschereis an Land verbunden ist. c) Meereis ist Eis, das aus gefrorenem Meerwasser besteht und auf dem Meer schwimmt.	Eisproben mit Meer- und Gletschereis	2	Erkenntnisgewinnung: Meereis ist gefrorenes Meerwasser
δ	Ordnet die Begriffe „Dorf“ und „Meer“ der richtigen Stelle im Modell zu.	Versuchsaufbau „Aquarium“ und Begriffskärtchen	1	Übergang von Real- in den Modellraum
ϵ	Markiert die Höhe, welche ihr vermutet, bis zu der der Meeresspiegel ansteigen wird.	Millimeterskala (Wasserpegel) an der Wand und Papierpfeil	2	Hypothesenbildung 1
ζ	Beobachtet die Skala, bis das Eis komplett geschmolzen ist und misst, um wie viel Millimeter der Meeresspiegel angestiegen ist.	Versuchsaufbau „Aquarium“ und Eiswürfel	1	Messung Versuch 1, Erkenntnisgewinnung: Meeresspiegel steigt nicht an
ι	Benennt die Folge für den Meeresspiegel, wenn das Meereis in der Arktis schmilzt. a) Meeresspiegels bleibt gleich. b) Meeresspiegel steigt an. c) Meeresspiegel fällt.		1	Übergang von dem Modell- in den Realraum
κ	Ergänzt die Begriffe „Gletscher“ und „Sonne“ an der richtigen Stelle im Modell.	Versuchsaufbau „Aquarium“ und Begriffskärtchen	1	Übergang von dem Real- in den Modellraum 2

λ	<p>Wählt die richtige Formel aus, welche den Zusammenhang zwischen Volumen und Masse beschreibt.</p> <p>a. $Volumen = Masse \cdot Dichte$</p> <p>b. $Volumen = \frac{Masse}{Dichte}$</p> <p>c. $Volumen = \frac{Dichte}{Masse}$</p>		1	Vorwissen aktivieren 2																						
μ	<p>Die Masse unseres Modellgletscher beträgt 750 g. Berechnet das Volumen des Schmelzwassers.</p> $Volumen = \frac{Masse}{Dichte}$ <table border="1" data-bbox="300 584 736 708"> <thead> <tr> <th>Stoff</th> <th>Dichte</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Eis</td> <td>0,9 g/cm³</td> </tr> <tr> <td>Wasser</td> <td>1,0 g/cm³</td> </tr> <tr> <td>Wasserdampf (bei 100°C)</td> <td>0,00059 g/cm³</td> </tr> </tbody> </table>	Stoff	Dichte	Eis	0,9 g/cm ³	Wasser	1,0 g/cm ³	Wasserdampf (bei 100°C)	0,00059 g/cm ³		2	Hypothesenbildung 2														
Stoff	Dichte																									
Eis	0,9 g/cm ³																									
Wasser	1,0 g/cm ³																									
Wasserdampf (bei 100°C)	0,00059 g/cm ³																									
ν	<p>Berechnet den Wert, um wie viele Millimeter der Pegel ansteigen müsste, wenn das komplette Gletschereis schmilzt. Markiert an dem Pegel an der Wand eure Erwartungen.</p> <table border="1" data-bbox="300 847 647 1225"> <thead> <tr> <th colspan="2">Benötigte Menge an Wasser bei einem Anstieg ...</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Von 0 auf 1 mm</td> <td>60 ml</td> </tr> <tr> <td>Von 1 auf 2 mm</td> <td>75 ml</td> </tr> <tr> <td>Von 2 auf 3 mm</td> <td>88 ml</td> </tr> <tr> <td>Von 3 auf 4 mm</td> <td>100 ml</td> </tr> <tr> <td>Von 4 auf 5 mm</td> <td>100 ml</td> </tr> <tr> <td>Von 5 auf 6 mm</td> <td>100 ml</td> </tr> <tr> <td>Von 6 auf 7 mm</td> <td>110 ml</td> </tr> <tr> <td>Von 7 auf 8 mm</td> <td>115 ml</td> </tr> <tr> <td>Von 8 auf 9 mm</td> <td>115 ml</td> </tr> <tr> <td>Von 9 auf 10 mm</td> <td>140 ml</td> </tr> </tbody> </table>	Benötigte Menge an Wasser bei einem Anstieg ...		Von 0 auf 1 mm	60 ml	Von 1 auf 2 mm	75 ml	Von 2 auf 3 mm	88 ml	Von 3 auf 4 mm	100 ml	Von 4 auf 5 mm	100 ml	Von 5 auf 6 mm	100 ml	Von 6 auf 7 mm	110 ml	Von 7 auf 8 mm	115 ml	Von 8 auf 9 mm	115 ml	Von 9 auf 10 mm	140 ml	Millimeterskala (Wasserpegel) an der Wand und Papierfeil	2	Hypothesenbildung 2
Benötigte Menge an Wasser bei einem Anstieg ...																										
Von 0 auf 1 mm	60 ml																									
Von 1 auf 2 mm	75 ml																									
Von 2 auf 3 mm	88 ml																									
Von 3 auf 4 mm	100 ml																									
Von 4 auf 5 mm	100 ml																									
Von 5 auf 6 mm	100 ml																									
Von 6 auf 7 mm	110 ml																									
Von 7 auf 8 mm	115 ml																									
Von 8 auf 9 mm	115 ml																									
Von 9 auf 10 mm	140 ml																									
ξ	Beobachtet die Skala bis da Eis komplett geschmolzen ist und misst, um wie viel Millimeter der Meeresspiegel angestiegen ist.	Versuchsaufbau „Aquarium“ und Eis	1	Messung Versuch 2																						

π	Falls der Messwert vom berechneten Wert abweicht: Eine solche Abweichung vom berechneten Wert kann verschiedene Ursachen haben. Wählt mögliche Ursachen aus: <input type="checkbox"/> Verdunstung <input type="checkbox"/> ungenaues Messen <input type="checkbox"/> Wasserrückstände im Eimer <input type="checkbox"/> Masse verändert sich beim Schmelzen		2	Interpretation des Versuchs 2 (Fehleranalyse)																						
ρ	Analoges vorgehen, wie eben: Das Volumen des grönländischen Eisschildes beträgt 2,9 Millionen km ³ und das Volumen des antarktischen Eisschildes beträgt 24,7 Millionen km ³ . Berechnet das Volumen des Schmelzwassers.		2	Übergang von dem Modell- in den Realraum 2																						
σ	Berechnet den Wert, um wie viele Meter der Pegel ansteigen müsste, wenn die kompletten Eisschilde schmelzen. <table border="1" data-bbox="297 778 714 1134"> <thead> <tr> <th colspan="2">Benötigte Menge an Wasser bei einem Anstieg ...</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Von 0 auf 10 m</td><td>3,65 Mill. km³</td></tr> <tr><td>Von 10 auf 20 m</td><td>3,67 Mill. km³</td></tr> <tr><td>Von 20 auf 30 m</td><td>3,69 Mill. km³</td></tr> <tr><td>Von 30 auf 40 m</td><td>3,71 Mill. km³</td></tr> <tr><td>Von 40 auf 50 m</td><td>3,74 Mill. km³</td></tr> <tr><td>Von 50 auf 60 m</td><td>3,76 Mill. km³</td></tr> <tr><td>Von 60 auf 70 m</td><td>3,78 Mill. km³</td></tr> <tr><td>Von 70 auf 80 m</td><td>3,80 Mill. km³</td></tr> <tr><td>Von 80 auf 90 m</td><td>3,82 Mill. km³</td></tr> <tr><td>Von 90 auf 100 m</td><td>3,84 Mill. km³</td></tr> </tbody> </table>	Benötigte Menge an Wasser bei einem Anstieg ...		Von 0 auf 10 m	3,65 Mill. km ³	Von 10 auf 20 m	3,67 Mill. km ³	Von 20 auf 30 m	3,69 Mill. km ³	Von 30 auf 40 m	3,71 Mill. km ³	Von 40 auf 50 m	3,74 Mill. km ³	Von 50 auf 60 m	3,76 Mill. km ³	Von 60 auf 70 m	3,78 Mill. km ³	Von 70 auf 80 m	3,80 Mill. km ³	Von 80 auf 90 m	3,82 Mill. km ³	Von 90 auf 100 m	3,84 Mill. km ³		2	Übergang von dem Modell- in den Realraum 2
Benötigte Menge an Wasser bei einem Anstieg ...																										
Von 0 auf 10 m	3,65 Mill. km ³																									
Von 10 auf 20 m	3,67 Mill. km ³																									
Von 20 auf 30 m	3,69 Mill. km ³																									
Von 30 auf 40 m	3,71 Mill. km ³																									
Von 40 auf 50 m	3,74 Mill. km ³																									
Von 50 auf 60 m	3,76 Mill. km ³																									
Von 60 auf 70 m	3,78 Mill. km ³																									
Von 70 auf 80 m	3,80 Mill. km ³																									
Von 80 auf 90 m	3,82 Mill. km ³																									
Von 90 auf 100 m	3,84 Mill. km ³																									
τ	Berechnet die Fläche eines Kreises, dessen Durchmesser 4 mm beträgt und rundet das Ergebnis falls nötig auf die erste Nachkommastelle.		2	Vorwissen aktivieren 3																						
ν	Ordnet die Begriffe „Meer“, „Meeresoberfläche“ und „Atmosphäre“ der Versuchsaufbau an der Wand zu.	Abb. Versuchsaufbau „thermische Ausdehnung“ und Begriffskärtchen	1	Übergang von dem Real- in den Modellraum 3																						

ϕ	Die thermische Ausdehnung von Wasser kann mit folgender Formel bestimmt werden: $\Delta V = V \cdot \gamma$ ΔV : Volumenzunahme V : Wasservolumen (es beträgt 2150 000 mm ³) γ : Volumenausdehnungskoeffizient von Wasser ($\gamma = 0,00021/K$) Berechnet die Volumenzunahme ΔV unseres Modellmeers bei einer Erwärmung 5 Kelvin.		2	Hypothesenbildung 3
χ	Das Glasrohr kann man als Zylinder betrachten. Das heißt, es gilt: $\Delta V_{Zylinder} = A_{Grundfläche} \cdot \Delta h$ Berechnet die Höhenzunahme Δh unseres Modellmeeresspiegels. Markiert eure Vermutung an der Skala an der Wand.		2	Hypothesenbildung 3
ψ	Bestimmt, um wie viel Millimeter das Wasser im Glasrohr angestiegen ist.	Versuchsaufbau „thermische Ausdehnung“	2	Messung Versuch 3
ω	Falls der Messwert vom berechneten Wert abweicht: Eine solche Abweichung vom berechneten Wert kann verschiedene Ursachen haben. Wählt mögliche Ursachen aus: <input type="checkbox"/> Verdunstung <input type="checkbox"/> ungenaues Messen <input type="checkbox"/> Wassertemperatur ist nicht im ganzen Gefäß gleich <input type="checkbox"/> Gefäß ist undicht		2	Interpretation des Versuchs 3 (Fehleranalyse)
Γ	Die Temperaturerwärmung der Meere ist schwierig vorherzusagen, da sich die oberen Wasserschichten schneller erwärmen als die tieferen Wasserschichten. Klimaforscher nehmen eine Erhöhung der Durchschnittstemperatur der Meere um 0,5K bis 2100 an. Das Volumen aller Meere beträgt 1,3 Mrd. km ³ , die Wasseroberfläche 0,36 Mrd. km ² und der Volumenausdehnungskoeffizient von Wasser beträgt $\gamma = 0,00021/K$. Berechnet die Höhenzunahme Δh des Meeresspiegels bis zum Jahre 2100.		2	Übergang von dem Modell- in den Realraum 3

<p>Δ</p>	<p>Schätzt die Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs auf Halebüll ...</p> <p>a. ... in 100 Jahren (für RCP 2.6 und 8.5) ab.</p> <p>b. ... in 300 Jahren (für RCP 2.6 und 8.5) ab.</p> <p>c. ... ab, wenn das grönländische und antarktische Eisschild geschmolzen sind (Anstieg ca. 70m).</p>	<p>Diagramm „zukünftiger Meeresspiegelanstieg nach RCP 2.6 und 8.5“, interaktive Weltkarte mit einstellbarer Meereshöhe</p>	<p>2</p>	<p>Beantwortung der problemorientierten Fragestellung</p>
<p>Θ</p>	<p>Doch es gibt noch eine weitere Gefahr und das sind Sturmfluten. Das bedeutet es können bis zu 4 Meter hohe Wellen auf die Küste treffen.</p> <p>Schätzt die Auswirkungen einer solchen Sturmflut auf den Ort Halebüll ab, wenn der Meeresspiegel bereits 2m angestiegen wäre.</p>	<p>interaktive Weltkarte mit einstellbarer Meereshöhe</p>	<p>2</p>	<p>Beantwortung der problemorientierten Fragestellung</p>

Hauptaufgabe

Aufgabenstellung	Material	AFB	Didaktische Funktion
<p>Dreht mithilfe des iPads ein zweiminütiges Informationsvideo, in dem ihr die Bevölkerung über die Ursachen des Meeresspiegelanstiegs informiert und die möglichen Folgen für das Dorf Halebüll beurteilt.</p>	<p>iPad, ggf. Modellexperimente</p>	<p>3</p>	<p>Sicherung der neuen Erkenntnisse</p>

Zusätzliche Aufgaben

Aufgabenstellung	Material	AFB								
<p>Jeder bekommt eine Rollenkarte zugewiesen und liest sich diese durch. Das Dorf soll vor den Sturmfluten geschützt werden, dafür steht ein Budget von 1,600 Millionen Euro zur Verfügung.</p> <p>Es gibt folgende Optionen:</p> <table border="1" data-bbox="168 470 900 622"> <thead> <tr> <th>Maßnahme</th> <th>Kosten</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Umsiedlung eines Hauses (d.h. Abriss des alten Hauses und Bau eines neuen Hauses)</td> <td>500 000€</td> </tr> <tr> <td>Bau eines Deiches</td> <td>300 000€</td> </tr> <tr> <td>5 Tetrapoden</td> <td>100 000€</td> </tr> </tbody> </table> <p>Gestaltet gemeinsam aus Sicht eurer Charaktere das Dorf so um, dass Halebüll vor den nächsten Sturmfluten sicher ist und das Budget nicht überschritten wird. Macht von eurem Ergebnis ein Bild.</p>	Maßnahme	Kosten	Umsiedlung eines Hauses (d.h. Abriss des alten Hauses und Bau eines neuen Hauses)	500 000€	Bau eines Deiches	300 000€	5 Tetrapoden	100 000€	<p>Rollenkarten, Versuchsaufbau „Aquarium“, Wellenmaschine, Deiche, Tetrapoden</p>	<p>3</p>
Maßnahme	Kosten									
Umsiedlung eines Hauses (d.h. Abriss des alten Hauses und Bau eines neuen Hauses)	500 000€									
Bau eines Deiches	300 000€									
5 Tetrapoden	100 000€									

V.I.VI. Station 5: Ozeanversauerung und Erwärmung der Ozeane (Abteilung für Ozeanwasserchemie)

Aufgabe	Aufgabenstellung	Material	AFB	Didaktische Funktion
α	Verortet das Boot im Dr. Fuchs (bzw. Verortet das Great Barrier Reef auf der Weltkarte).	Weltkarte, UV-Taschenlampe	1	Im Lernkontext ankommen
β	Bestimmt, welche Flüssigkeit sauer, neutral und basisch ist.	Zitronensäure, gefärbtes Wasser, Soda, pH-Indikator	2	Vorwissen aktivieren
γ	Sucht den Stoff heraus, aus dem das Skelett der Korallen besteht. Überprüft, ob der Stoff mit einer der Flüssigkeiten reagiert.	Behälter mit Kalk, Holz, Granit und Schiefer, Zitronensäure, gefärbtes Wasser, Soda	3	Erkenntnisgewinn: Säure löst Kalk der Korallen auf
δ	Ordnet der Abbildung des Versuchs an der Wand die richtigen Begriffe zu.	Begriffe (Meer, Atmosphäre, Kraftwerk), Abbildung vom Versuch	1	Übergang von Real- in den Modellraum
ϵ	Stellt eine Vermutung auf, welche Auswirkung das CO ₂ auf den pH-Wert des Meerwassers hat. Markiert eure Erwartung an der pH-Skala an der Wand.	pH-Skala	1	Hypothesenbildung 1
ζ	Bestimmt den pH-Wert, den das Wasser im Moment besitzt mithilfe der pH-Farbskala.	Becken mit Wasser und pH-Indikator, pH-Tabelle mit Farbcode	2	Messung Versuch 1
η	Bestimmt den pH-Wert, den das Wasser nach der Versuchsdurchführung besitzt.	Becken mit Wasser und pH-Indikator, pH-Tabelle mit Farbcode, (Sodastream)	2	Messung Versuch 1
θ	Ergänzt die folgende Formulierung zu der Auswirkung auf das Meer: Das Meer ... <input type="checkbox"/> ... ist sauer geworden <input type="checkbox"/> ... ist basisch geworden <input type="checkbox"/> ... hat seinen pH-Wert nicht verändert.		2	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinn: Ozean versauert
ι	Stellt mithilfe der Schnipsel aus der Box die Reaktionsgleichung auf, welche die Reaktion zwischen Kohlenstoffdioxid und Wasser beschreibt.	Schnipsel mit chemischen Stoffen und Formelzeichen	2	Interpretation des Versuchs, Erkenntnisgewinn: CO ₂ bildet mit Wasser Kohlensäure => Erklärung der Versauerung

κ	Stellt eine Vermutung auf, welches der beiden Becken bei der gleichen Menge CO ₂ stärker versauert. Macht die Markierung aus der Box an euer ausgewähltes Becken.		2	Hypothesenbildung 2
λ	Bestimmt den pH-Wert, den das Wasser der beiden Becken im Moment besitzt.	Zwei Becken mit warmem und kaltem Wasser und pH-Indikator, pH-Tabelle mit Farbcode	2	Messung Versuch 2
μ	Bestimmt den pH-Wert, den das Wasser nach der Versuchsdurchführung besitzt.	Zwei Becken mit warmem und kaltem Wasser und pH-Indikator, pH-Tabelle mit Farbcode, (Sodastream)	2	Messung Versuch 2
ν	Ergänzt die folgende Formulierung zu der Auswirkung auf das Meer: Je wärmer das Wasser ist, desto ... <input type="checkbox"/> weniger <input type="checkbox"/> mehr ... CO ₂ kann das Wasser aufnehmen.		2	Interpretation des Versuchs 2, Erkenntnisgewinn: warmes Wasser kann weniger CO ₂ aufnehmen
ξ	Führt die Veranschaulichung durch.	Anleitung mit der Durchführung und Materialien	2	Auflösung von Fehlvorstellungen
π	Die Veranschaulichung sollte euch helfen folgende Fragen zu beantworten. Wählt die passende Antwort aus. Sorgt die Erwärmung des Ozeans dafür, dass diese nicht versauern? <input type="checkbox"/> Ja, durch die Erwärmung der Ozeane wird eine Versauerung verhindert. <input type="checkbox"/> Nein, durch die Erwärmung der Ozeane wird die Versauerung nur verlangsamt. <input type="checkbox"/> Nein, durch die Erwärmung der Ozeane wird die Versauerung sogar beschleunigt.		2	Auflösung von Fehlvorstellungen

	<p>Was würde mit dem pH-Wert passieren, wenn keine CO₂-Teilchen durch die Industrie in die Atmosphäre gegeben werden?</p> <p><input type="checkbox"/> Nichts. Der pH-Wert würde sich nicht verändern. <input type="checkbox"/> Der pH-Wert im Ozean würde trotzdem geringer werden. <input type="checkbox"/> Der pH-Wert im Ozean würde sogar ansteigen.</p> <p>Wie verhält sich die Temperatur in Atmosphäre und Ozean, wenn die CO₂-Aufnahmekapazität des Ozeans verringert wurde?</p> <p><input type="checkbox"/> Die Temperatur steigt langsamer als vorher an. <input type="checkbox"/> Die Temperatur steigt schneller als vorher an. <input type="checkbox"/> Die Temperatur steigt weder langsamer noch schneller an.</p>			
ρ	Benennt das Schlagwort, was für das Sterben der Korallen verantwortlich ist.	Ausschnitt eines Lexikons	1	Erkenntnisgewinn: erhöhte Wassertemperatur sorgt auch für Korallensterben (Korallenbleiche)
σ	Ordnet jedes Szenario einem Graphen zu. Bestimmt mithilfe des Graphen den Zeitpunkt, an dem der Grenzwert von 8,0 unterschritten wird.	Wertetabelle, Blatt mit Koordinatensystem	2	Übergang von dem Modell- in den Realraum

Hauptaufgabe

Aufgabenstellung	Material	AFB	Didaktische Funktion
Gestaltet mithilfe der Schablone an der Wand und den unterschiedlichen Begriffskärtchen ein Wirkungsgefüge, was den Zusammenhang zwischen anthropogenen Klimawandel und Korallensterben aufzeigt.	Schablone, Begriffskärtchen	3	Sicherung der neuen Erkenntnisse

Zusätzliche Aufgaben

Aufgabe	Aufgabenstellung	Material	AFB
τ	Führt folgenden Versuch durch: Gebt etwas von jeder Substanz in ein Reagenzglas und beobachtet, welches Reagenzglas entsauert wird.	6 Reagenzgläser mit saurem Wasser, 6 Chemikalien	2
ϕ	Bestimmt die Gemeinsamkeit der drei Substanzen.	6 Chemikalien	2
χ	Stellt euch vor, ihr seid ein wissenschaftlicher Berater der Regierung. Beurteilt, ob ihr als Wissenschaftler*in einer solchen großflächigen Verteilung von Chemikalien zur Entsauerung der Meere zustimmen würdet.		3
ψ	Stellt euch vor, ihr seid ein wissenschaftlicher Berater der Regierung. Beurteilt, ob ihr als Wissenschaftler*in einer solchen großflächigen Düngung zur Entsauerung der Meere zustimmen würdet.	Experten-Kommentare	3

V.I.VII. Station 6: Nachhaltigkeit (Abteilung für nachhaltiges Handeln)

Aufgabe	Aufgabenstellung	Material	AFB	Didaktische Funktion
β	Wählt eine Person aus eurem Team aus und bestimmt mithilfe der App deren persönlichen CO ₂ -Verbrauch.	iPad mit App „Klima-Kompass“	1	Entwicklung der Problemstellung
γ	Die Weltklimakonferenz in Kopenhagen berechnete 2010, dass wir nur noch insgesamt bis zum Jahr 2050 nur noch 750 Mrd. t CO ₂ in die Atmosphäre emittieren dürfen, um eine Klimakatastrophe zu verhindern. Berechnet, wie viel Tonnen CO ₂ eine Person im Jahr verbrauchen darf. Ihr müsst dafür folgendes berücksichtigen. <ol style="list-style-type: none"> 1. Es sind schon 10 Jahre vergangen, in denen ca. 42 Mrd. t CO₂ pro Jahr in die Atmosphäre emittiert wurden. 2. Es gibt 7,8 Mrd. Menschen auf der Erde, von denen jeder das gleiche CO₂-Emissionbudget besitzt. 		2	Entwicklung der Problemstellung
δ	Benennt mindestens fünf Möglichkeiten, um den eigenen CO ₂ -Verbrauch zu reduzieren und notiert sie auf dem Forschungsprotokollblatt, das sich auf dem Tisch befindet.	AB Forschungsprotokoll	1	Vorwissen aktivieren
ϵ	Spiel: Führt das Spiel nach den Regeln der Anleitung durch.	Spielmaterial	2	Lernprodukt erstellen (Erkenntnisgewinnung)
ζ	Schaut euch noch kurz die restlichen Ereigniskarten an und ergänzt die CO ₂ -Einsparung eurer Handlungsmöglichkeiten.	Ereigniskarten und AB Forschungsprotokoll	2	Lernprodukt erstellen (Erkenntnisgewinnung)
η	Wenn das Spielziel nicht erreicht wurde: Erläutert die Gründe dafür.	AB Forschungsprotokoll	2	Lernprodukt diskutieren
η	Erläutert kurz, was euch am Spiel gut gefallen hat und was ihr verbessern würdet.	AB Forschungsprotokoll	2	Lernprodukt diskutieren
η	Beurteilt, ob das Spiel realistisch die Lebenswelt der Menschen widerspiegelt.	AB Forschungsprotokoll	3	Lernprodukt diskutieren

η	Beurteilt, ob es im realen Leben umsetzbar ist die CO ₂ -Emission auf nur 1t zu reduzieren.	AB Forschungsprotokoll	3	Lernprodukt diskutieren
----------	--	------------------------	---	-------------------------

Hauptaufgabe

Aufgabenstellung	Material	AFB	Didaktische Funktion
Schreibt einen Brief an euer „Ich“ in zwei Monaten und plant, was ihr bis dahin an eurem Lebensstil verändern wollt und was nicht.	Papier und Briefumschläge	3	Sicherung der neuen Erkenntnisse

Zusätzliche Aufgaben

Aufgabe	Aufgabenstellung	Material	AFB
θ	<p>Ihr seid Bewohner*innen eines fiktiven Dorfes. Die Besonderheit dieses Dorfes ist es, dass nicht mit Geld, sondern mit CO₂ bezahlt wird. Jede/r Bewohner*in hat ein bestimmtes Budget, das er nicht überziehen darf.</p> <p>1. Einzelarbeit: Lest euch eure Charakterkarte durch und schaut, welche „Gegenstände“ sich die Person demnächst anschaffen will. Überprüft im „Laden für alles“, ob das CO₂-Budget dafür ausreicht.</p> <p>2. in der Gruppe: Stellt kurz euren Charakter vor. Vergesst dabei nicht zu erzählen, was ihr euch demnächst kaufen wollt und ob dafür euer CO₂-Budget ausreicht.</p> <p>3. in der Gruppe: Sollte es ein Problem geben, plant wie ihr es gemeinsam lösen könnt. Im Anschluss beurteilt, ob eure Lösung auch auf die reale Welt übertragbar ist und welchen Vorteil sie bietet.</p>	Personenkarten, Karte „Laden für alles“	3

V.IV. Blanko-Fragebogen

Fragebogen: Station _____

Station allgemein

- | | | | | | | | |
|---|---------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------|
| 1. Die Schwierigkeit der Station war... | zu hoch | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | zu gering |
| 2. Die Menge an neuem Wissen ... | zu viel | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | zu wenig |
| 3. Die Bearbeitungszeit war ... | zu viel | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | zu wenig |
| | | trifft
zu | trifft
eher
zu | teils/
teils | trifft
eher
nicht zu | trifft
nicht
zu | |
| 4. Die Station war interessant und motivierend. | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 5. Die Bearbeitung der Station hat mir Spaß gemacht. | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 6. Die Thematik wurde verständlich übermittelt und
ich konnte den Inhalt nachvollziehen. | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

Zu den Versuchen

- | | | | | | |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 7. Die Versuche waren interessant und motivierend. | <input type="checkbox"/> |
| 8. Die Versuche durzuführen, hat Spaß gemacht. | <input type="checkbox"/> |
| 9. Die Versuchsdurchführung war schwierig. | <input type="checkbox"/> |
| 10. Die Versuche waren anschaulich gestaltet. | <input type="checkbox"/> |
| 11. Der Modellcharakter der Versuche hat mir geholfen, den Sachverhalt
besser zu verstehen. | <input type="checkbox"/> |
| 12. Die Versuchsbeschreibungen waren verständlich. | <input type="checkbox"/> |

Zum Arbeitsmaterial

- | | | | | | |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 13. Die Arbeitsaufträge waren verständlich formuliert. | <input type="checkbox"/> |
| 14. Die Aufgaben haben aufeinander aufgebaut. | <input type="checkbox"/> |
| 15. Das Knacken von Schlössern und das Lösen der Rätsel hat mich
motiviert die Aufgaben zu bearbeiten. | <input type="checkbox"/> |
| 16. Die Rätsel waren gut lösbar. | <input type="checkbox"/> |
| 17. Es hat mir Spaß gemacht die Rätsel zu lösen und die Schlösser zu
knacken. | <input type="checkbox"/> |
| 18. Die Story des Escape Rooms war motivierend. | <input type="checkbox"/> |
| 19. Zur Erklärung wurden Medien, wie Bilder, Diagramme oder Videos
genutzt. | <input type="checkbox"/> |

20. Die Hilfekärtchen waren verständlich formuliert.

21. Bei Schwierigkeiten haben die Hilfekärtchen weitergeholfen.

22. Was hat dir besonders gut bei der Station gefallen?

23. Was kann man bei der Station besser machen?

V.V. Auswertung Fragebogen

Insgesamt

Station allgemein

1. Die Schwierigkeit der Station war...	zu hoch	0	8	15	1	0	zu gering
2. Die Menge an neuem Wissen ...	zu viel	2	4	17	1	0	zu wenig
3. Die Bearbeitungszeit war ...	zu viel	1	2	16	5	0	zu wenig
		trifft zu	trifft eher zu	teils/teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu	
4. Die Station war interessant und motivierend.		16	4	4	0	0	
5. Die Bearbeitung der Station hat mir Spaß gemacht.		16	7	1	0	0	
6. Die Thematik wurde verständlich übermittelt und ich konnte den Inhalt nachvollziehen.		17	7	0	0	0	

Zu den Versuchen

7. Die Versuche waren interessant und motivierend.		19	4	1	0	0	
8. Die Versuche durzuführen, hat Spaß gemacht.		19	4	1	0	0	
9. Die Versuchsdurchführung war schwierig.		0	0	6	4	14	
10. Die Versuche waren anschaulich gestaltet.		22	2	0	0	0	
11. Der Modellcharakter der Versuche hat mir geholfen, den Sachverhalt besser zu verstehen.		14	6	0	0	0	
12. Die Versuchsbeschreibungen waren verständlich.		6	10	6	2	0	

Zum Arbeitsmaterial

13. Die Arbeitsaufträge waren verständlich formuliert.		13	6	4	1	0	
14. Die Aufgaben haben aufeinander aufgebaut.		23	0	0	1	0	
15. Das Knacken von Schlössern und das Lösen der Rätsel hat mich motiviert die Aufgaben zu bearbeiten.		20	3	1	0	0	
16. Die Rätsel waren gut lösbar.		18	5	0	0	0	

17. Es hat mir Spaß gemacht die Rätsel zu lösen und die Schlösser zu knacken.	22	2	0	0	0
18. Die Story des Escape Rooms war motivierend.	21	1	2	0	0
19. Zur Erklärung wurden Medien, wie Bilder, Diagramme oder Videos genutzt.	17	4	2	1	0
20. Die Hilfekärtchen waren verständlich formuliert.	13	9	1	1	0
21. Bei Schwierigkeiten haben die Hilfekärtchen weitergeholfen.	10	8	5	0	0

Station 1

Station allgemein

1. Die Schwierigkeit der Station war...	zu hoch	0	1	3	0	0	zu gering
2. Die Menge an neuem Wissen ...	zu viel	1	2	1	0	0	zu wenig
3. Die Bearbeitungszeit war ...	zu viel	0	1	0	3	0	zu wenig
		trifft zu	trifft eher zu	teils/teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu	
4. Die Station war interessant und motivierend.	4	0	0	0	0	0	
5. Die Bearbeitung der Station hat mir Spaß gemacht.	4	0	0	0	0	0	
6. Die Thematik wurde verständlich übermittelt und ich konnte den Inhalt nachvollziehen.	1	3	0	0	0	0	

Zu den Versuchen

7. Die Versuche waren interessant und motivierend.	4	0	0	0	0
8. Die Versuche durzuführen, hat Spaß gemacht.	4	0	0	0	0
9. Die Versuchsdurchführung war schwierig.	0	0	1	0	3
10. Die Versuche waren anschaulich gestaltet.	3	1	0	0	0
11. Der Modellcharakter der Versuche hat mir geholfen, den Sachverhalt besser zu verstehen.	2	2	0	0	0
12. Die Versuchsbeschreibungen waren verständlich.	0	2	2	0	0

Zum Arbeitsmaterial

13. Die Arbeitsaufträge waren verständlich formuliert.	0	2	2	0	0
14. Die Aufgaben haben aufeinander aufgebaut.	4	0	0	0	0
15. Das Knacken von Schlössern und das Lösen der Rätsel hat mich motiviert die Aufgaben zu bearbeiten.	4	0	0	0	0
16. Die Rätsel waren gut lösbar.	3	1	0	0	0
17. Es hat mir Spaß gemacht die Rätsel zu lösen und die Schlösser zu knacken.	4	0	0	0	0
18. Die Story des Escape Rooms war motivierend.	4	0	0	0	0
19. Zur Erklärung wurden Medien, wie Bilder, Diagramme oder Videos genutzt.	4	0	0	0	0
20. Die Hilfekärtchen waren verständlich formuliert.	2	1	1	0	0
21. Bei Schwierigkeiten haben die Hilfekärtchen weitergeholfen.	2	0	2	0	0

22. Was hat dir besonders gut bei der Station gefallen?

- Das Dorf bauen war sehr lustig und das Experiment mit den vier Landschaften war interessant. Außerdem fand ich die versteckten Rätsel gut.
- Das Messen mit der Wärmebildkamera.
- Das Dorf bauen war lustig und das Experiment mit der vier Landschaften war interessant.
- Das Messen mit der Wärmebildkamera.

23. Was kann man bei der Station besser machen?

- Lampenständer müsste verbessert werden und bei der einen Station mit den Kästchen wäre eine Legende hilfreich.
- Der Lampenständer muss verbessert werden. Die Aufgaben manchmal etwas besser formulieren.
- Genauere Versuchsdurchführung – aber war gut!
- Eine bisschen genauere Versuchsdurchführung.

Station 2

Station allgemein

1. Die Schwierigkeit der Station war...	zu hoch	0	2	2	0	0	zu gering
2. Die Menge an neuem Wissen ...	zu viel	0	1	3	0	0	zu wenig
3. Die Bearbeitungszeit war ...	zu viel	0	0	4	0	0	zu wenig
		trifft zu	trifft eher zu	teils/ teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu	
4. Die Station war interessant und motivierend.		2	1	1	0	0	
5. Die Bearbeitung der Station hat mir Spaß gemacht.		2	1	1	0	0	
6. Die Thematik wurde verständlich übermittelt und ich konnte den Inhalt nachvollziehen.		3	1	0	0	0	

Zu den Versuchen

7. Die Versuche waren interessant und motivierend.		2	1	1	0	0	
8. Die Versuche durzuführen, hat Spaß gemacht.		2	1	1	0	0	
9. Die Versuchsdurchführung war schwierig.		0	0	2	0	2	
10. Die Versuche waren anschaulich gestaltet.		4	0	0	0	0	
11. Der Modellcharakter der Versuche hat mir geholfen, den Sachverhalt besser zu verstehen.		3	1	0	0	0	
12. Die Versuchsbeschreibungen waren verständlich.		3	0	0	1	0	

Zum Arbeitsmaterial

13. Die Arbeitsaufträge waren verständlich formuliert.		3	0	1	0	0	
14. Die Aufgaben haben aufeinander aufgebaut.		4	0	0	0	0	
15. Das Knacken von Schlössern und das Lösen der Rätsel hat mich motiviert die Aufgaben zu bearbeiten.		3	1	0	0	0	
16. Die Rätsel waren gut lösbar.		3	1	0	0	0	
17. Es hat mir Spaß gemacht die Rätsel zu lösen und die Schlösser zu knacken.		3	1	0	0	0	
18. Die Story des Escape Rooms war motivierend.		2	1	1	0	0	

19. Zur Erklärung wurden Medien, wie Bilder, Diagramme oder Videos genutzt.	2	2	0	0	0
20. Die Hilfekärtchen waren verständlich formuliert.	3	1	0	0	0
21. Bei Schwierigkeiten haben die Hilfekärtchen weitergeholfen.	2	2	0	0	0
22. Was hat dir besonders gut bei der Station gefallen?					
<ul style="list-style-type: none"> • Die Simulation • Der Versuch und Simulation • Es war ein sehr schönes und anschauliches Modell, das die Sachverhalte gut demonstriert hat. • Mir hat das Modell gut gefallen und die Simulation, da man es sich so besser vorstellen konnte. 					
23. Was kann man bei der Station besser machen?					
<ul style="list-style-type: none"> • Teilchen (Simulation) nochmal kontrollieren • Anzahl der roten Teilchen am Satelliten überprüfen • Die Rechnungen könnten ein wenig verständlicher sein. • Rechnungen und Einheiten könnten besser erklärt werden. 					

Station 3+3b

Station allgemein

1. Die Schwierigkeit der Station war...	zu hoch	0	1	3	0	0	zu gering
2. Die Menge an neuem Wissen ...	zu viel	0	0	4	0	0	zu wenig
3. Die Bearbeitungszeit war ...	zu viel	0	0	4	0	0	zu wenig
		trifft zu	trifft eher zu	teils/teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu	
4. Die Station war interessant und motivierend.	4	0	0	0	0	0	
5. Die Bearbeitung der Station hat mir Spaß gemacht.	3	1	0	0	0	0	
6. Die Thematik wurde verständlich übermittelt und ich konnte den Inhalt nachvollziehen.	2	2	0	0	0	0	

Zu den Versuchen

7. Die Versuche waren interessant und motivierend.	3	1	0	0	0
8. Die Versuche durzuführen, hat Spaß gemacht.	3	1	0	0	0
9. Die Versuchsdurchführung war schwierig.	0	0	0	1	3
10. Die Versuche waren anschaulich gestaltet.	4	0	0	0	0
11. Der Modellcharakter der Versuche hat mir geholfen, den Sachverhalt besser zu verstehen.	3	1	0	0	0
12. Die Versuchsbeschreibungen waren verständlich.	0	3	1	0	0

Zum Arbeitsmaterial

13. Die Arbeitsaufträge waren verständlich formuliert.	3	1	0	0	0
14. Die Aufgaben haben aufeinander aufgebaut.	4	0	0	0	0
15. Das Knacken von Schlössern und das Lösen der Rätsel hat mich motiviert die Aufgaben zu bearbeiten.	4	0	0	0	0
16. Die Rätsel waren gut lösbar.	3	1	0	0	0
17. Es hat mir Spaß gemacht die Rätsel zu lösen und die Schlösser zu knacken.	4	0	0	0	0
18. Die Story des Escape Rooms war motivierend.	4	0	0	0	0
19. Zur Erklärung wurden Medien, wie Bilder, Diagramme oder Videos genutzt.	3	1	0	0	0
20. Die Hilfekärtchen waren verständlich formuliert.	3	1	0	0	0
21. Bei Schwierigkeiten haben die Hilfekärtchen weitergeholfen.	2	1	1	0	0

22. Was hat dir besonders gut bei der Station gefallen?

- Der Versuch b und das Spiel bei Station 3b haben mir besonders gut gefallen.
- Das Atmosphäre Spie (besonders war es interessant zu sehen, wie es ausgeht wenn wir das 2°C Ziel erreichen)
- Ich fand die zwei Experimente sehr gut, da sie den Sachverhalt gut erklärt haben. Außerdem fand ich, die Zusammenfassung, die man am Ende selbst schreiben musste gut, da man sich so ein Überblick verschaffen konnte.

23. Was kann man bei der Station besser machen?

- Man könnte manchmal die Hilfekarten hilfreicher machen.

Station 4

Station allgemein

1. Die Schwierigkeit der Station war...	zu hoch	0	2	2	0	0	zu gering
2. Die Menge an neuem Wissen ...	zu viel	1	1	2	0	0	zu wenig
3. Die Bearbeitungszeit war ...	zu viel	0	0	4	0	0	zu wenig
		trifft zu	trifft eher zu	teils/ teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu	
4. Die Station war interessant und motivierend.		0	2	2	0	0	
5. Die Bearbeitung der Station hat mir Spaß gemacht.		1	3	0	0	0	
6. Die Thematik wurde verständlich übermittelt und ich konnte den Inhalt nachvollziehen.		4	0	0	0	0	

Zu den Versuchen

7. Die Versuche waren interessant und motivierend.		2	2	0	0	0	
8. Die Versuche durzuführen, hat Spaß gemacht.		4	0	0	0	0	
9. Die Versuchsdurchführung war schwierig.		0	0	1	1	2	
10. Die Versuche waren anschaulich gestaltet.		4	0	0	0	0	
11. Der Modellcharakter der Versuche hat mir geholfen, den Sachverhalt besser zu verstehen.		4	0	0	0	0	
12. Die Versuchsbeschreibungen waren verständlich.		2	2	0	0	0	

Zum Arbeitsmaterial

13. Die Arbeitsaufträge waren verständlich formuliert.		3	1	0	0	0	
14. Die Aufgaben haben aufeinander aufgebaut.		4	0	0	0	0	
15. Das Knacken von Schlössern und das Lösen der Rätsel hat mich motiviert die Aufgaben zu bearbeiten.		3	1	0	0	0	
16. Die Rätsel waren gut lösbar.		2	2	0	0	0	

17. Es hat mir Spaß gemacht die Rätsel zu lösen und die Schlösser zu knacken.	4	0	0	0	0
18. Die Story des Escape Rooms war motivierend.	4	0	0	0	0
19. Zur Erklärung wurden Medien, wie Bilder, Diagramme oder Videos genutzt.	3	1	0	0	0
20. Die Hilfskärtchen waren verständlich formuliert.	1	3	0	0	0
21. Bei Schwierigkeiten haben die Hilfskärtchen weitergeholfen.	1	2	1	0	0

22. Was hat dir besonders gut bei der Station gefallen?

- Mir hat die Nachsimulierung vom Anstieg des Meeresspiegel sehr gut gefallen und die verschiedenen Rätsel.
- Der Gletscher schmelzen Modell war interessant und hat Spaß gemacht.

23. Was kann man bei der Station besser machen?

- weniger Rechenaufgaben
- viel zu viel rechnen

Station 5

Station allgemein

1. Die Schwierigkeit der Station war...	zu hoch	0	2	2	0	0	zu gering
2. Die Menge an neuem Wissen ...	zu viel	0	0	4	0	0	zu wenig
3. Die Bearbeitungszeit war ...	zu viel	1	1	0	2	0	zu wenig
		trifft zu	trifft eher zu	teils/teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu	
4. Die Station war interessant und motivierend.	4	0	0	0	0	0	
5. Die Bearbeitung der Station hat mir Spaß gemacht.	4	0	0	0	0	0	
6. Die Thematik wurde verständlich übermittelt und ich konnte den Inhalt nachvollziehen.	4	0	0	0	0	0	

Zu den Versuchen

7. Die Versuche waren interessant und motivierend.	4	0	0	0	0
8. Die Versuche durzuführen, hat Spaß gemacht.	4	0	0	0	0
9. Die Versuchsdurchführung war schwierig.	0	0	2	1	1
10. Die Versuche waren anschaulich gestaltet.	4	0	0	0	0
11. Der Modellcharakter der Versuche hat mir geholfen, den Sachverhalt besser zu verstehen.	2	2	0	0	0
12. Die Versuchsbeschreibungen waren verständlich.	1	1	2	0	0

Zum Arbeitsmaterial

13. Die Arbeitsaufträge waren verständlich formuliert.	1	2	1	0	0
14. Die Aufgaben haben aufeinander aufgebaut.	4	0	0	0	0
15. Das Knacken von Schlössern und das Lösen der Rätsel hat mich motiviert die Aufgaben zu bearbeiten.	4	0	0	0	0
16. Die Rätsel waren gut lösbar.	3	1	0	0	0
17. Es hat mir Spaß gemacht die Rätsel zu lösen und die Schlösser zu knacken.	4	0	0	0	0
18. Die Story des Escape Rooms war motivierend.	4	0	0	0	0
19. Zur Erklärung wurden Medien, wie Bilder, Diagramme oder Videos genutzt.	4	0	0	0	0
20. Die Hilfekärtchen waren verständlich formuliert.	2	2	0	0	0
21. Bei Schwierigkeiten haben die Hilfekärtchen weitergeholfen.	2	2	0	0	0

22. Was hat dir besonders gut bei der Station gefallen?

- Die versteckten Zahlen auf der Karte
- pH-Wert messen
- Aquarium-Experiment
- Die versteckten Zahlen auf der Karte
- pH-Wert messen
- Aquarium-Experiment
- Das Spiel war interessant und hat Spaß gemacht.

23. Was kann man bei der Station besser machen?

- Die Aufgabenstellung bei der „Lexikon“ besser formulieren.
- Die Aufgabenstellung bei dem „Lexikon“ besser erläutern.
- Mir hat besonders gut bei der Station gefallen, dass wir viel experimentieren konnten. Außerdem hat man bei der Station mehr Escape Room Rätsel lösen müssen und das hat Spaß gemacht.

Station 6

Station allgemein

1. Die Schwierigkeit der Station war...	zu hoch	0	0	3	1	0	zu gering
2. Die Menge an neuem Wissen ...	zu viel	0	0	3	1	0	zu wenig
3. Die Bearbeitungszeit war ...	zu viel	0	0	4	0	0	zu wenig
		trifft zu	trifft eher zu	teils/teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu	
4. Die Station war interessant und motivierend.		2	1	1	0	0	
5. Die Bearbeitung der Station hat mir Spaß gemacht.		2	2	0	0	0	
6. Die Thematik wurde verständlich übermittelt und ich konnte den Inhalt nachvollziehen.		3	1	0	0	0	

Zu dem Spiel

7. Das Spiel war interessant und motivierend.		2	1	1	0	0	
8. Das Spiel durzuführen, hat Spaß gemacht.		2	2	0	0	0	
9. Die Spieldurchführung war schwierig.		0	0	0	1	3	
10. Das Spiel war anschaulich gestaltet.		3	1	0	0	0	
11. Der Modellcharakter der Versuche hat mir geholfen, den Sachverhalt besser zu verstehen.		6	0	0	0	0	
12. Die Spielanleitung war verständlich.		0	2	1	1	0	

Zum Arbeitsmaterial

13. Die Arbeitsaufträge waren verständlich formuliert.	3	0	0	1	0
14. Die Aufgaben haben aufeinander aufgebaut.	3	0	1	0	0
15. Das Knacken von Schlössern und das Lösen der Rätsel hat mich motiviert die Aufgaben zu bearbeiten.	2	1	1	0	0
16. Die Rätsel waren gut lösbar.	4	0	0	0	0
17. Es hat mir Spaß gemacht die Rätsel zu lösen und die Schlösser zu knacken.	3	1	0	0	0
18. Die Story des Escape Rooms war motivierend.	3	0	1	0	0
19. Zur Erklärung wurden Medien, wie Bilder, Diagramme oder Videos genutzt.	1	0	2	1	0
20. Die Hilfekärtchen waren verständlich formuliert.	2	1	0	1	0
21. Bei Schwierigkeiten haben die Hilfekärtchen weitergeholfen.	1	3	0	0	0

22. Was hat dir besonders gut bei der Station gefallen?

- Das Spiel ist sehr schön gestaltet
- das Spiel

23. Was kann man bei der Station besser machen?

- Das Ziel des Spiels ist zu schwierig zu erreichen