

Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik
Fakultät Physik und Astronomie

Schriftliche Hausarbeit
im Rahmen der ersten Staatsprüfung
für das Lehramt an Gymnasien

Experimentierzirkel zum Treibhauseffekt

Eingereicht von
Julian Schrauth

im
September 2021

Betreuer:
Dr. Stephan Lück

Prüfer:
Dr. Stephan Lück

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Die Physikalischen Grundlagen des Treibhauseffekts	7
2.1	Das elektromagnetische Spektrum	7
2.2	Schwarzkörperstrahlung	9
2.3	Spektrum der Sonne und Opazität der Atmosphäre	11
2.4	Die Atmosphäre und Treibhausgase	13
3	Der Treibhauseffekt der Erde	19
3.1	Der Strahlungshaushalt der Atmosphäre	19
3.2	Der anthropogene Treibhauseffekt und Klimawandel	24
3.3	Folgen des Klimawandels	28
4	Didaktische Hintergründe zum Experimentieren im Physikunterricht	35
4.1	Der Klimawandel im Physikunterricht an bayrischen Gymnasien	35
4.2	Das Kompetenzstrukturmodell im Fach Physik	36
4.3	Das Facettenmodell experimenteller Kompetenz	38
5	Experimentierzirkel zum Treibhauseffekt	41
5.1	Versuch: Modellexperiment zum CO ₂ -verursachten Treibhauseffekt	42
5.2	Versuch: Grundlagen zur Wärmestrahlung	51
5.3	Versuch: Leslie-Würfel	56
5.4	Versuch: Natürlicher Treibhauseffekt und Albedo	60
5.5	Versuch: Das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid	64
5.6	Zusammenfassung des Lernzirkels	67
6	Fazit	69
	Literaturverzeichnis	71
A	Anhang: Arbeitsmaterialien zum Experimentierzirkel	75

1 Einleitung

Kaum ein anderes Thema wird so oft in den Medien diskutiert wie der Klimawandel. Wissenschaftler sind sich einig, dass die Menschheit durch die fortschreitende Verbrennung von fossilen Brennstoffen den sogenannten anthropogenen Treibhauseffekt antreibt, der eine Temperaturerhöhung unserer Atmosphäre zur Folge hat. Von vielen wird deshalb kritisiert, dass seitens der Politik noch immer zu wenig unternommen wird. Ein weiteres Problem ist die Ausbreitung von Verschwörungstheorien, die vor allem auf Internet-Plattformen Resonanz finden und den menschengemachten Klimawandel nicht anerkennen. Umso wichtiger ist es, dass schon junge Menschen die wissenschaftlichen Hintergründe und Folgen der voranschreitenden Erderwärmung kennenlernen.

Das bayrische Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung hat im neuen LehrplanPLUS dem Erdklima einen eigenen Themenblock in der 9. Klasse an bayrischen Gymnasien zugeordnet. Die Schülerinnen und Schüler lernen den anthropogenen Treibhauseffekt selbständig in einem Modellversuch kennen. Ziel dieser Arbeit ist es, ein bestehendes Modellexperiment der Ludwig-Maximilians-Universität München auszuwerten, Schwierigkeiten zu identifizieren und Lehrkräften einen Leitfaden für das Experimentieren zu geben. Außerdem wird der Versuch mit Alternativen verglichen, bevor er in einen eigens zusammengestellten Experimentierzirkel rund um das Thema Treibhauseffekt eingegliedert wird. Dort wird auf weitere relevante Aspekte wie Eigenschaften von Wärmestrahlung, Rückstrahlungsvermögen von Oberflächen oder das Gas Kohlenstoffdioxid eingegangen.

Nach den physikalischen Grundlagen und einer ausführlichen Beschreibung des Treibhauseffektes der Erde wird im Rahmen der didaktischen Hintergründe die Einbettung des Themas in den Fachlehrplan Physik gegeben sowie ein Modell vorgestellt, anhand dessen die Versuche eingestuft werden. Im Anschluss folgt eine ausführliche Beschreibung der Experimente, die jeweils den Aufbau und die Durchführung, die Ergebnisse mit fachlichen Hintergründen sowie eine didaktische Einordnung mit Hinweisen für Lehrkräfte umfasst. Die Arbeitsmaterialien selbst sind im Anhang zu finden.

Die Arbeit soll primär als Unterrichtsstütze für Lehrkräfte dienen. Da die Umsetzung eines schülergerechten, reliablen Experiments, das den anthropogenen Treibhauseffekt im Modell zeigen soll, ohne aufwändige Messapparaturen sehr schwierig ist, wird mit dem

ausgearbeiteten Modellversuch der Universität München ein solches vorgestellt. Auch die Ausarbeitung dieses Versuches war mit Schwierigkeiten verbunden. Deshalb wird ein Hauptaugenmerk darauf gelegt, alle Problemquellen und Störfaktoren ausführlich zu beschreiben, um Lehrkräften, die den Versuch selbst im Unterricht einbauen wollen, einen Leitfaden zu geben.

2 Die Physikalischen Grundlagen des Treibhauseffekts

Um die genauen Abläufe sowohl des natürlichen als auch des anthropogenen Treibhauseffektes verstehen zu können, bedarf es einiger physikalischer Grundlagen, die in den folgenden Kapiteln erläutert werden. Hierbei wird zunächst auf das elektromagnetische Spektrum eingegangen, um dann die Grundlagen der Wärmelehre und spezifische Eigenschaften unserer Sonne sowie der Erdatmosphäre genauer zu beleuchten.

2.1 Das elektromagnetische Spektrum

Das elektromagnetische Spektrum umfasst alle elektromagnetischen Wellen und ist in Tabelle 2.1 aufgelistet. Es ist in verschiedene Bereiche nach der Wellenlänge bzw. Energie der auftretenden Photonen gegliedert. Die hier dargestellte Einteilung folgt dabei Kapitel 3.6 in (Hecht, 2018). Die Wellenlänge λ eines Teilchens ist direkt verknüpft mit der Frequenz f und der Energie E , denn es gilt

$$c = \lambda f \tag{2.1}$$

$$E = hf, \tag{2.2}$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit und h das Planck'sche Wirkungsquantum bezeichnet.

Am unteren Ende des Spektrums der Wellenlängen befinden sich Gammastrahlen. Diese besitzen Wellenlängen im Picometer-Bereich und sind nach den Gleichungen 2.1 und 2.2 die hoch-energetischsten elektromagnetischen Wellen. Sie erstrecken sich über einen Energiebereich von 10^4 eV bis etwa 10^{19} eV. Gammastrahlung ist oft das Produkt radioaktiven Zerfalls. Ist ein Atomkern nach einem vorangehenden Beta- oder Alpha-Zerfall in einem angeregten Zustand, so gibt er beim Übergang in einen niedrigeren Zustand Energie in Form von Gammastrahlen ab. Gammastrahlen können des Weiteren durch Paarvernichtungsprozesse erzeugt werden. Aufgrund ihrer extrem hohen Energie und des damit verbundenen starken Ionisationsvermögens wirken sie auf biologisches Gewebe äußerst schädlich. Gammastrahlung kann allerdings auch gewinnbringend in der Medizin, beispielsweise bei Strahlentherapien, angewandt werden. Mit zunehmender Wellenlänge

Tabelle 2.1 | Das elektromagnetische Spektrum. Während Gammastrahlen die energiereichsten und damit kürzesten Wellen sind, besitzen manche Radiowellen Wellenlängen im Kilometerbereich. Das sichtbare Licht macht nur einen sehr kleinen Teil des Spektrums aus. Daten entnommen aus (Hecht, 2018).

Strahlungstyp	Energie	Wellenlänge
Gamma-Strahlung	10^{19} - 10^4 eV	< 100 pm
Röntgenstrahlung	0,2 MeV - 100 eV	< 10 nm
UV-Strahlung	100 eV - 3,2 eV	10 nm - 400 nm
Sichtbares Licht	3,2 eV - 1,6 eV	390 nm - 780 nm
Nahes Infrarot	1,6 eV - 0,4 eV	780 nm - 3000 nm
Mittleres Infrarot	0,4 eV - 0,2 eV	3000 - 6000 nm
Fernes Infrarot	0,2 eV - 0,08 eV	6000 - 15000 nm
Extremes Infrarot	0,08 eV - 1,2 meV	15000 nm - 1 mm
Mikrowellen	< 1 meV	1 mm - 0,3 m
Radiowellen	< 10^{-6} eV	> 0,3 m

sinkt auch die Energie der zugehörigen elektromagnetischen Wellen. Angrenzend an die Gammastrahlen tritt die Röntgenstrahlung auf. Sie erstreckt sich in einem Energiebereich von 100 eV bis 0,2 MeV. Die Wellenlängen solcher Photonen liegen im Nanometer- bis Picometer-Bereich. Röntgenstrahlen entstehen durch starke Beschleunigung von geladenen Teilchen, beispielsweise durch sehr starke Abbremsung von Elektronen beim Beschuss auf Materie wie einer Kupferplatte, was zu einem kontinuierlichen Bremsstrahlungsspektrum führt. Wird ein Atom ionisiert, kann Röntgenstrahlung außerdem durch den Übergang von Elektronen aus hoch-energetischen Zuständen in den Grundzustand emittiert werden. Man spricht hier von der charakteristischen Röntgenstrahlung, die im Gegensatz zur Bremsstrahlung ein diskretes Energiespektrum besitzt.

An das obere Wellenlängen-Ende der Röntgenstrahlung grenzt der ultraviolette Bereich des Lichts. Dieser ist mit dem menschlichen Auge nicht sichtbar. Die Wellenlängen reichen dabei von 10 nm bis 400 nm, was Photonenenergien von ca. 120 eV bis 3,2 eV entspricht. UV-Photonen entstehen bei der Relaxation von Elektronen aus einem stark angeregten Zustand. Dies geschieht beispielsweise bei einem Natriumatom, das nach Ionisierung ein freies Elektron aufnimmt. Fällt dieses vom höchsten Zustand, der bei Natrium bei 5,1 eV liegt, in den Grundzustand, wird ein UV-Photon entsprechender Energie emittiert. UV-Strahlung ist auch ein wesentlicher Bestandteil des Spektrums der Sonne. Weitere kosmische Objekte wie z.B. Pulsare strahlen ebenfalls Wellen im UV-Bereich ab.

Das Spektrum des für das menschliche Auge sichtbaren Lichts liegt in einem sehr schmalen Wellenlängen-Band zwischen ca. 380 nm und 780 nm. Licht, welches Photonen aus dem

unteren Ende dieses Wellenlängenbereichs enthält, erscheint dem menschlichen Auge violett. Das eher langwellige Licht am oberen Ende wird hingegen als rot wahrgenommen. Sonnenstrahlen aber auch das Licht einer Glühlampe erscheinen dem menschlichen Auge weiß, da hier alle Farben des sichtbaren Spektrums überlagert auftreten. Ein Prisma kann das Spektrum einer Lichtquelle sichtbar machen. Gleiches passiert in der Atmosphäre bei der Entstehung von Regenbögen, wobei hier die Wassertropfen das Licht der Sonne in die einzelnen Bestandteile des sichtbaren Lichts wieder aufspalten. Das Farbsehen entsteht dadurch, dass an Objekten nur ein bestimmter Teil des Spektrums einer Lichtquelle (Sonne, Glühlampe) reflektiert wird. Andere Strahlungsquellen wie z.B. Gasentladungslampen besitzen hingegen ein diskretes Energiespektrum. So leuchtet eine Natriumdampflampe fast monochrom, da das Spektrum von den zwei spezifischen Na-Absorptionslinien bei 589,00 nm und 589,59 nm dominiert wird. Das Licht erscheint somit orange.

Verlässt man den roten Bereich des sichtbaren Lichts, so gelangt man in den infraroten Bereich, kurz IR. Er wird unterteilt in den Nahinfrarot-Bereich (NIR), der an das sichtbare Spektrum angrenzt und Wellenlängen von 780 nm bis 3000 nm umfasst, den mittleren IR-Bereich (3000 bis 6000 nm), den fernen IR-Bereich (6000 bis 15000 nm) sowie den extremen IR-Bereich (15000 nm bis 1 mm). IR-Strahlung wird auch als Wärmestrahlung bezeichnet und resultiert aus der thermischen Bewegung der in einem Körper vorhandenen Moleküle. So strahlt jeder Körper IR-Strahlung ab, auch solche, die sich nur knapp oberhalb des absoluten Nullpunkts von $-273,15\text{ °C}$ befinden. Infrarot-Strahlung ist für das menschliche Auge nicht mehr wahrnehmbar. Allerdings kann die Wärmestrahlung vieler Objekte über Sensoren in der Haut wahrgenommen werden. Heiße Objekte wie z.B. Herdplatten oder Glühlampen besitzen ein kontinuierliches IR-Spektrum.

Kommt man in einen Wellenlängenbereich von Millimetern bis ca. 30 cm, spricht man von Mikrowellen. Diese Wellen können von Dipolmolekülen wie z.B. Wasser absorbiert werden, wodurch es zu einer Anregung kommt. Da sich die Dipole in einem Wechselfeld ständig neu ausrichten wollen, entsteht Wärme, die genutzt wird, um beispielsweise im Mikrowellenherd Essen zu erwärmen. Die langwelligsten elektromagnetischen Wellen besitzen Wellenlängen von ca. 0,3 m bis hin zu vielen Kilometern (keine Grenze) und werden Radiowellen genannt. Radiowellen können durch einfache Schwingkreise erzeugt werden und werden hauptsächlich zum Übertragen von Funk- und Radiowellen aber auch zur Ortung (Radar) bzw. zur Navigation (GPS) verwendet.

2.2 Schwarzkörperstrahlung

Befindet sich ein Körper im thermischen Gleichgewicht, so entspricht die von ihm absorbierte Strahlungsenergie genau der von ihm emittierten. Daraus folgt, dass ein Körper,

der eine hohe Absorptionsfähigkeit besitzt, gleichzeitig auch ein sehr guter Strahler ist. Absorbiert nun ein Körper sämtliche eintreffende Strahlung jeglicher Wellenlänge, so wird er als schwarzer Strahler bezeichnet. Die gesamte abgestrahlte Leistung eines schwarzen Körpers wird durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$P = \sigma AT^4 \quad (2.3)$$

beschrieben. Es besagt, dass die Strahlungsleistung eines Schwarzkörpers direkt proportional zu seiner Fläche A und zur vierten Potenz seiner Temperatur T ist. Die Proportionalitätskonstante σ wird als Stefan-Boltzmann-Konstante bezeichnet und beträgt $6.5597 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ kg}^{-4}$. Eine Herleitung findet sich in jedem gängigen Lehrbuch. Betrachtet man nun die Emissionsspektren solcher Körper, so fällt auf, dass die spektrale spezifische Ausstrahlung nur von der Temperatur des Strahlers selbst abhängt, was in Abbildung 2.1 zu sehen ist. Zu beobachten ist ein, vom Strahlungsmaximum aus betrachtet, starker Abfall der Intensität in Richtung kürzerer Wellenlängen und ein schwächerer auslaufender Abfall mit zunehmender Wellenlänge. Die Flächen unter den Kurven entsprechen den Strahlungsleistungen, die nach Gleichung 2.3 berechnet werden können. Die Spektren folgen dem Planckschen Strahlungsgesetz

$$I_e^\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}} - 1 \right], \quad (2.4)$$

das die spezifische Ausstrahlung schwarzer Körper beschreibt, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum, c die Lichtgeschwindigkeit, λ die Wellenlänge und k die Boltzmann-Konstante darstellt. Auf eine Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet.

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich das Intensitätsmaximum des Spektrums mit zunehmender Temperatur zu niedrigeren Wellenlängen hin verschiebt. Diese Gesetzmäßigkeit wird in dem von Wilhelm Wien ermittelten und nach ihm benannten Wienschen Verschiebungsgesetz

$$\lambda_{max} = \frac{2,8979 \cdot 10^{-3} \text{ mK}}{T} \quad (2.5)$$

beschrieben, das aus einer Maximumbetrachtung des Planckschen Strahlungsgesetzes abgeleitet werden kann.

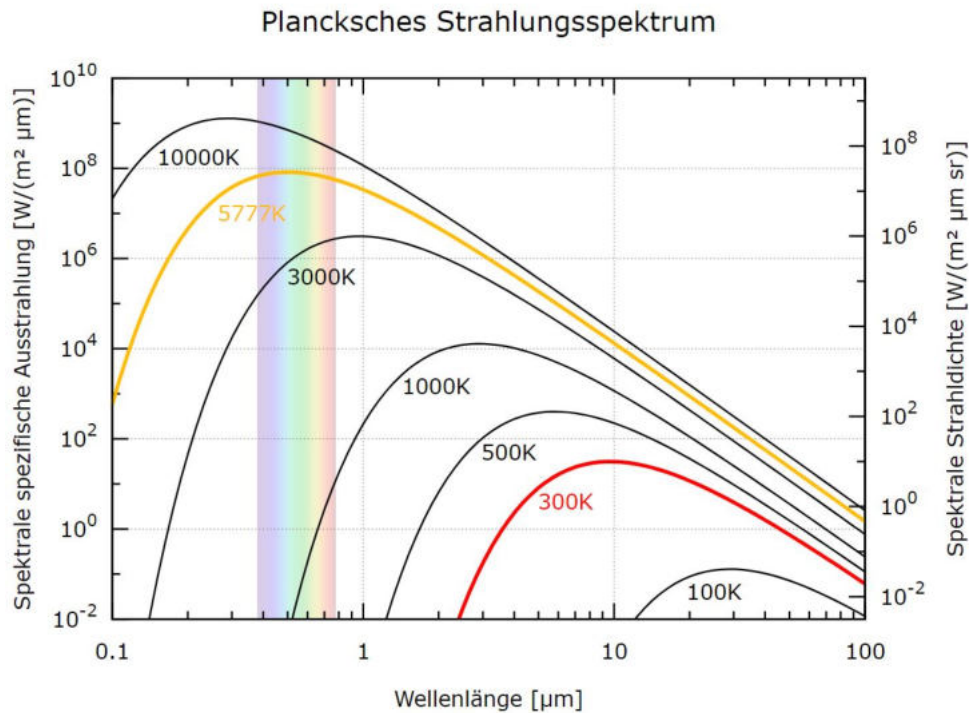


Abbildung 2.1 | Plancksches Strahlungsspektrum von schwarzen Strahlern unterschiedlicher Temperatur in doppelt-logarithmischer Auftragung. Der sichtbare Wellenlängenbereich ist farblich gekennzeichnet. Die Kurve für 5777 K entspricht der Ausstrahlung eines Körpers, der die Oberflächentemperatur der Sonne besitzt, die für 300 K einem auf Raumtemperatur. Quelle: (Wikimedia Commons, 2017).

2.3 Spektrum der Sonne und Opazität der Atmosphäre

Betrachtet man das Spektrum der Sonne, das ein Maximum bei einer Wellenlänge von etwa $\lambda_{max} = 500 \text{ nm}$ aufweist, lässt sich die Oberflächentemperatur nach Gleichung 2.5 zu ca. 5796 K bestimmen. Im Vergleich dazu lässt sich die Temperatur der Sonne auch über das Stefan-Boltzmann-Gesetz (Gleichung 2.3) ermitteln. Dabei wird für die Strahlungsleistung P angenommen, dass die Sonne mit einer konstanten Leistung von $1367 \text{ W}/\text{m}^2$ eine Kugel im Abstand einer astronomischen Einheit (Abstand Erde-Sonne) bestrahlt. Anzumerken ist, dass diese Solarkonstante S einen Wert darstellt, der ohne Atmosphäre und bei senkrechtem Einfall zu erwarten ist. Stellt man Gleichung 2.3 um, so erhält man für die Temperatur

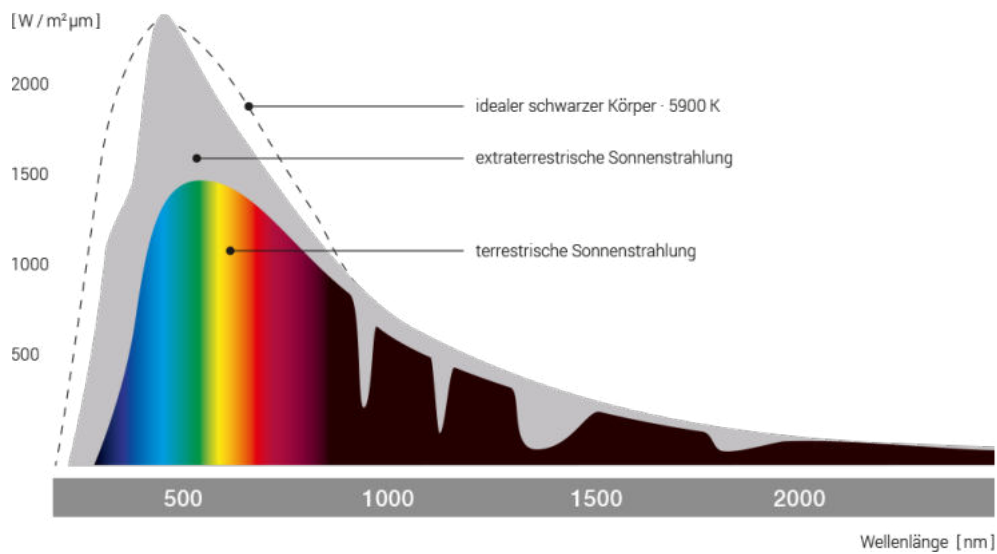


Abbildung 2.2 | Strahlungsintensität der Sonne gemessen außerhalb der Erdatmosphäre (grau), auf der Erdoberfläche (farbig, schwarz) und die eines idealen schwarzen Körpers mit $T = 5900 \text{ K}$ (gestrichelt). Quelle: (BEGA, 2020).

$$\begin{aligned}
 T &= \sqrt[4]{\frac{P}{\sigma A}} = \sqrt[4]{\frac{S \cdot 4\pi d^2}{\sigma \cdot 4\pi r^2_{\text{Sonne}}}} = \sqrt[4]{\frac{S \cdot d^2}{\sigma \cdot r^2_{\text{Sonne}}}} \\
 &= \sqrt[4]{\frac{1367 \cdot (1,496 \cdot 10^{11})^2}{5,670 \cdot 10^{-8} \cdot (6,959 \cdot 10^8)^2}} \text{ K} = 5777 \text{ K}.
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Ein schwarzer Strahler müsste somit die hier ermittelte Temperatur besitzen, um eine gleiche Strahlungsleistung zu besitzen. Daher wird diese Temperatur auch Effektive Temperatur genannt. Das Spektrum (siehe Abb. 2.2) ähnelt dem eines schwarzen Strahlers nach Gleichung 2.4 mit einer Temperatur von ca. 5900 K im UV- bis Mikrowellenbereich sehr stark. Das Spektrum der Sonne umfasst dabei neben dem sichtbaren Licht auch Röntgen- und UV-Strahlung sowie Infrarot-Strahlung. Das Maximum der Strahlungsintensität liegt bei ca. 500 nm. Allerdings kommt nicht Licht jeder Wellenlänge auf der Erdoberfläche an. Abbildung 2.2 zeigt auch, dass Gammastrahlen, Röntgenstrahlung sowie ein Großteil des UV-Lichts durch die oberen Schichten der Atmosphäre geblockt werden. Auch der Hauptteil des Infrarot-Spektrums wird von verschiedenen Gasen in den Atmosphärenschichten absorbiert und dringt nicht bis zur Erdoberfläche durch, ebenso wenig wie langwellige Radiowellen. Im Spektrum stellen diese Wellenlängen-Bereiche Absorptionsbanden dar.

Im Gegensatz zu Absorptionsbanden stehen die sogenannten atmosphärischen Fenster.

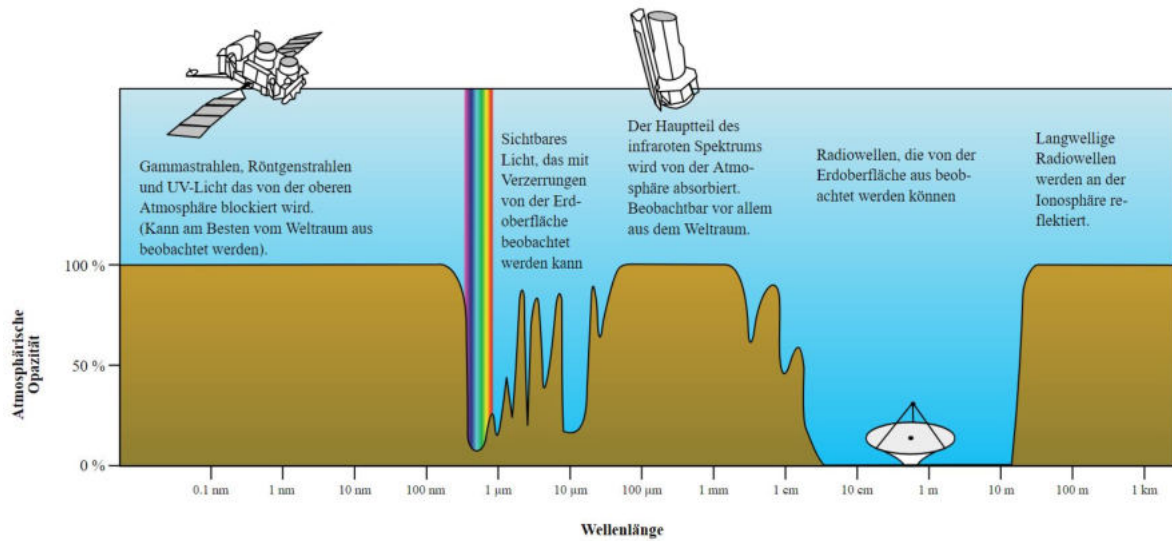


Abbildung 2.3 | Opazität der Erdatmosphäre mit Absorptionsbanden und atmosphärischen Fenstern. Der Großteil der von der Sonne ausgehenden Strahlung wird von der Atmosphäre absorbiert. Es gibt nur wenige atmosphärische Fenster im sichtbaren bzw. nahen Infrarot-Spektrum sowie im Radiowellen-Bereich. Quelle: (NASA, 2012).

Diese beschreiben Wellenlängen-Bereiche im Spektrum, in denen die Strahlung quasi ungehindert auf die Erdatmosphäre trifft. Dazu gehört der Bereich sichtbaren Lichts, der auch optisches Fenster genannt wird sowie einzelne Bereiche im Nahinfrarot-Spektrum. Ein weiterer, relativ großer durchlässiger Wellenlängenbereich liegt im Bereich kurzer Radiowellen (1 cm bis 10 m). Die Opazität der Erdatmosphäre hat starke Auswirkungen auf die Analyse von Spektren eingehender Strahlung, beispielsweise von anderen Himmelskörpern. Abbildung 2.3 zeigt die atmosphärische Opazität in Abhängigkeit der Wellenlänge. Während Radiowellen von der Erde aus registriert werden können, sind für die Detektierung von Gamma-, Röntgen-, UV- und den meisten IR-Strahlen also Teleskope außerhalb der Atmosphäre im Weltall vorteilhaft (Graham, 1999).

2.4 Die Atmosphäre und Treibhausgase

Dass auf der Erde überhaupt Leben möglich ist, verdanken wir ihrer Atmosphäre. Im Vergleich zu den anderen Planeten unseres Sonnensystems gewährleistet die Atmosphäre eine relativ stabile Oberflächentemperatur von durchschnittlich $14,5^{\circ}\text{C}$ und somit die Existenz von großen Mengen an Wasser in flüssiger Form. Neben der Temperatur sind auch die Dichte sowie die Zusammensetzung der Atmosphäre von entscheidender Bedeutung, in der Hinsicht, ob Leben auf einem Planeten möglich ist. So haben zwar andere Planeten ebenfalls Atmosphären, die oftmals für Lebewesen giftige Zusammensetzung als

Tabelle 2.2 | Zusammensetzung und Eigenschaften der Atmosphären im Sonnensystem. Die Temperatur- und Druckwerte beziehen sich auf die jeweilige Planetenoberfläche. Nur die Erde besitzt eine Atmosphäre, die Leben ermöglicht. Daten entnommen aus (Brönnimann, 2018).

Planet	Temperatur in °C	Druck in atm	Zusammensetzung
Merkur	-184 bis 426	10^{-14}	42% O ₂ , 29% Na, 22% H ₂
Venus	460	90	96,5% CO ₂ , 3,5% N ₂
Erde	14,5	1	78% N ₂ , 21% O ₂ , 1% Ar
Mars	-55	0.006	95,3% CO ₂ , 2,7% N ₂ , 1,5% Ar
Jupiter	-145	>1000	90% H ₂ , 10% He
Saturn	-178	>1000	96% H ₂ , 3% He
Uranus	-224	>1000	83% H ₂ , 15% He, 2,5% CH ₄
Neptun	-218	>1000	80% H ₂ , 19% He, 1% CH ₄

auch der Oberflächendruck machen Leben dort aber unmöglich. Eine Übersicht über die Atmosphären im Sonnensystem ist in Tabelle 2.2 zu sehen. Im Folgenden werden die Zusammensetzung und der Aufbau der Erdatmosphäre genauer betrachtet. Wie oben erwähnt, spielt sie eine wichtige Rolle für die klimatischen Verhältnisse und ist somit hauptverantwortlich für den Treibhauseffekt.

Den Hauptbestandteil der Erdatmosphäre bilden Stickstoff (N₂) mit einem Anteil von ca. 78% und Sauerstoff mit einem Anteil von ca. 21%. Daneben kommt das Edelgas Argon (1%) sowie Wasserdampf vor, dessen Menge aber im Vergleich zu den anderen drei Bestandteilen zeitlich und räumlich variiert. Der übrige Teil der Atmosphäre besteht aus den sogenannten Spurengasen. Diese machen zwar nur weniger als 0,05% der Atmosphäre aus, nehmen aber eine signifikante Rolle in unserem Klimasystem ein. Den Hauptanteil an den Spurengasen besitzt Kohlenstoffdioxid (CO₂). Weitere wichtige Spurengase sind Distickstoffmonoxid (N₂), auch als Lachgas bekannt, Methan (CH₄), Ozon (O₃) und Wasserdampf (H₂O). Eine Übersicht über die wichtigsten Komponenten der Erdatmosphäre ist in Tabelle 2.3 zu sehen.

Abbildung 2.4 zeigt den stockwerkförmigen Aufbau der Erdatmosphäre, der in (Roedel, 2017, Kapitel 2.2.4) beschrieben ist: An der Erdoberfläche angrenzend befindet sich die Troposphäre. Durch den ständigen Transport von Wärme von der Erdoberfläche ausgehend in höhere Lagen und die damit verbundene Abkühlung der Luft nimmt die Temperatur der Troposphäre mit steigender Höhe kontinuierlich ab. Die Rate liegt dabei zwischen -0,5 bis -1 K pro 100 m. Die Höhe der Troposphäre variiert sehr stark. In den Tropen beträgt sie ca. 17 bis 18 km, wohingegen sie in höheren Breiten nur 9 bis 13 km hoch ist. Die Grenze der Troposphäre zur angrenzenden Stratosphäre wird als Tropopause bezeichnet.

Die Stratosphäre hingegen ist relativ konvektionsarm. Dort befindet sich unter ande-

Tabelle 2.3 | Wichtige Komponenten der Erdatmosphäre und ihre Anteile. Die Einheit ppm (parts per million) gibt an, wie viele Teilchen der jeweiligen Substanz auf eine Million Teilchen kommen, Daten entnommen aus (Brönnimann, 2018).

Substanz	Anteil in %	ppm
Stickstoff	78,08	$7,8 \cdot 10^5$
Sauerstoff	20,95	$2,1 \cdot 10^5$
Argon	0,93	9340
Kohlendioxid	0,0407	408
Methan	0,00018	1,8
Wasserstoff	0,00005	0,5
Lachgas	0,000033	0,33
Ozon	0,000002 - 0,001	0 - 10

rem die Ozonschicht, welche ein Durchdringen von UV-Strahlung auf die Erdoberfläche verhindert. Durch die Strahlungsabsorption von Sauerstoff und Ozon nimmt die Temperatur in der Stratosphäre kontinuierlich zu. Anschließend an der Stratosphäre und ihrer Grenzschicht, die Stratopause, die in ca. 50 km Höhe über dem Erdboden liegt, folgt die Mesosphäre. Diese Schicht besitzt einen ähnlichen Temperaturverlauf wie die Troposphäre. Darüber, ab ca. 75 km Höhe, liegt die Thermosphäre, bei der es durch eine hohe Absorption von UV-Licht zu einer starken Erwärmung kommt.

Wie schaffen es nun die Treibhausgase, die nur ca. 0,05% der atmosphärischen Zusammensetzung ausmachen, einen so starken Einfluss auf unser Klima zu haben? Die Antwort liegt in der Molekülstruktur und den spektralen Eigenschaften dieser Gase und wird am Beispiel von Kohlenstoffdioxid erklärt. Die Absorption bzw. Emission von Strahlung kann nur in Molekülen erfolgen, die ein elektrisches Dipolmoment besitzen. Dies geschieht durch asymmetrische Schwingungen um den Molekülschwerpunkt. Die Hauptbestandteile der Atmosphäre, Stickstoff und molekularer Sauerstoff, sind zweiatomig. Sie können daher ausschließlich symmetrische Schwingungen ausführen und besitzen somit keine Absorptionsfähigkeit im Infrarotbereich. Das drei-atomige Molekül CO_2 besitzt hingegen vier Schwingungsmoden, die in Abb. 2.5 zu sehen sind. Bei der symmetrischen Streck-schwingung bei einer Wellenzahl von 1337 cm^{-1} wird kein Dipolmoment induziert und somit auch keine IR-Strahlung absorbiert. Die zwei entarteten Biegeschwingungen treten bei einer Wellenzahl von 667 cm^{-1} , was einer Wellenlänge von ca. $15 \mu\text{m}$ entspricht und einer Wellenzahl von 2349 cm^{-1} , was einer Wellenlänge von etwa $4 \mu\text{m}$ entspricht, auf. Da beide Schwingungsanregungen ein oszillierendes Dipolmoment erzeugen, tritt hier IR-Absorption auf. Das Rotationsschwingungsspektrum von CO_2 mit den charakteristischen Banden ist in Abb. 2.6 zu sehen.

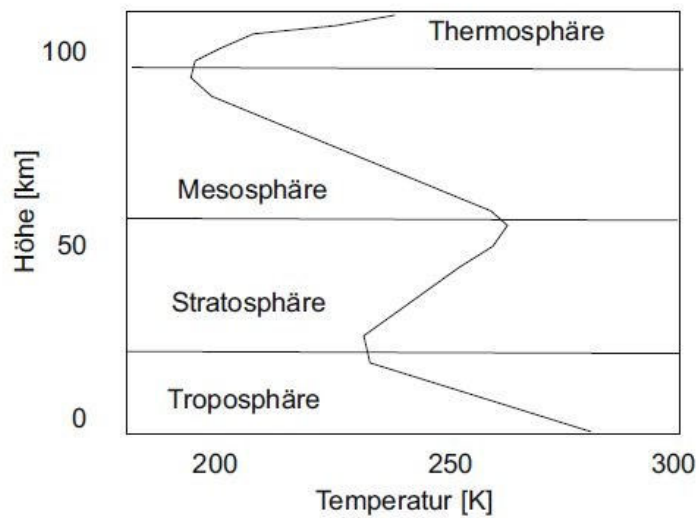


Abbildung 2.4 | Stockwerkförmiger Aufbau der Erdatmosphäre mit höhen-abhängigem Temperaturverlauf. Quelle: (Hanslmeier, 2002).

Betrachtet man das Emissionsspektrum der Erde in Abb. 2.7, das näherungsweise dem eines schwarzen Strahlers mit einer Temperatur von 280 bis 300 K entspricht, so ist der für CO_2 charakteristische Einbruch der Intensität im Infrarot-Bereich bei $15 \mu\text{m}$ zu beobachten. Auch die Absorptionsbanden der Treibhausgase Ozon (O_3) und Methan (CH_4) sind deutlich zu erkennen. Die Wärmestrahlung in diesen Wellenlängenbereichen verlässt also nur zu einem kleinen Anteil unsere Atmosphäre, wohingegen im Bereich des atmosphärischen Fensters die ausgehende Strahlungsleistung fast exakt dem eines vergleichbaren schwarzen Körpers der Temperatur 300 K entspricht.

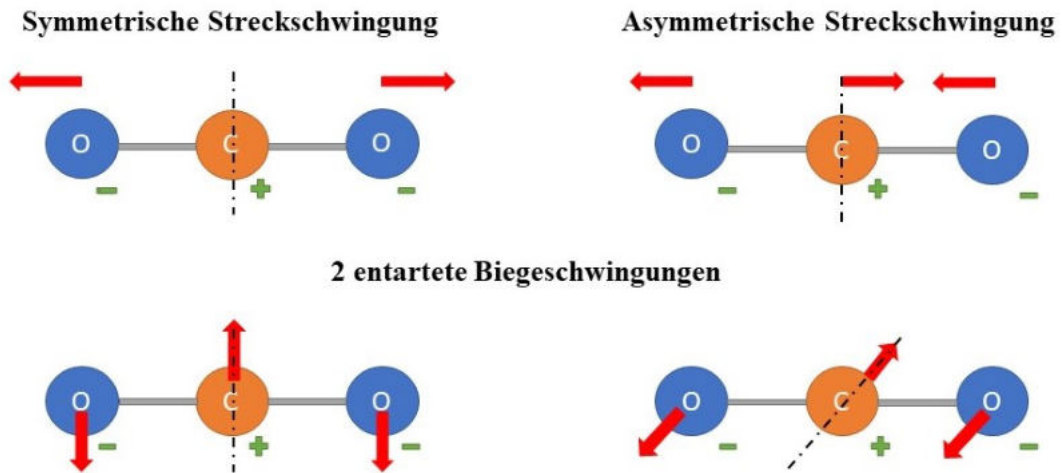


Abbildung 2.5 | Die vier Schwingungsmoden vom Molekül. Nur die Symmetrische Streckschwingung oben links kann keine Strahlung im Infrarot-Bereich des elektromagnetischen Spektrums absorbieren.

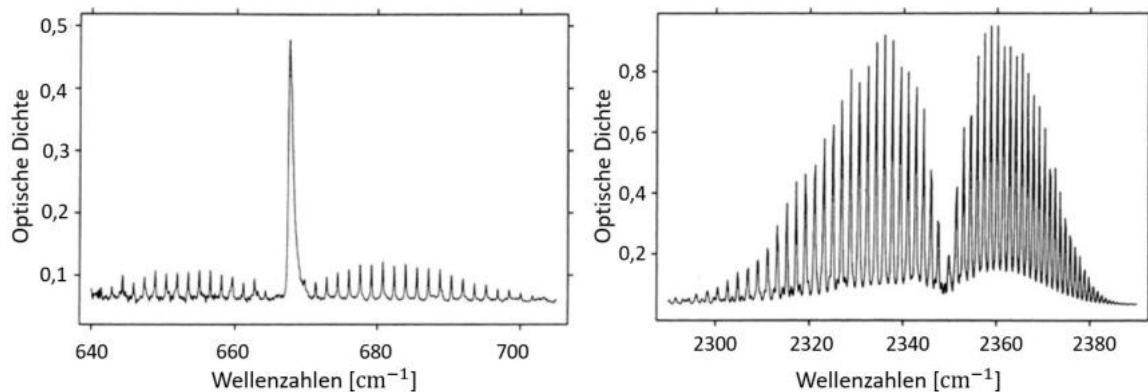


Abbildung 2.6 | Rotationsschwingungsspektrum von H_2O . Links: Bande der entarteten Biegeschwingungen bei 667 cm^{-1} . Rechts: Bande der asymmetrischen Streckschwingung bei 2349 cm^{-1} . Die kleinen regelmäßig auftretenden Banden links und rechts der betrachteten Wellenzahl stellen Rotations-Niveaus dar. Der Einschnitt im rechten Bild resultiert aus quantenmechanischen Auswahlregeln. Bearbeitete Abbildung, ursprünglich entnommen aus (Haken & Wolf, 2013).

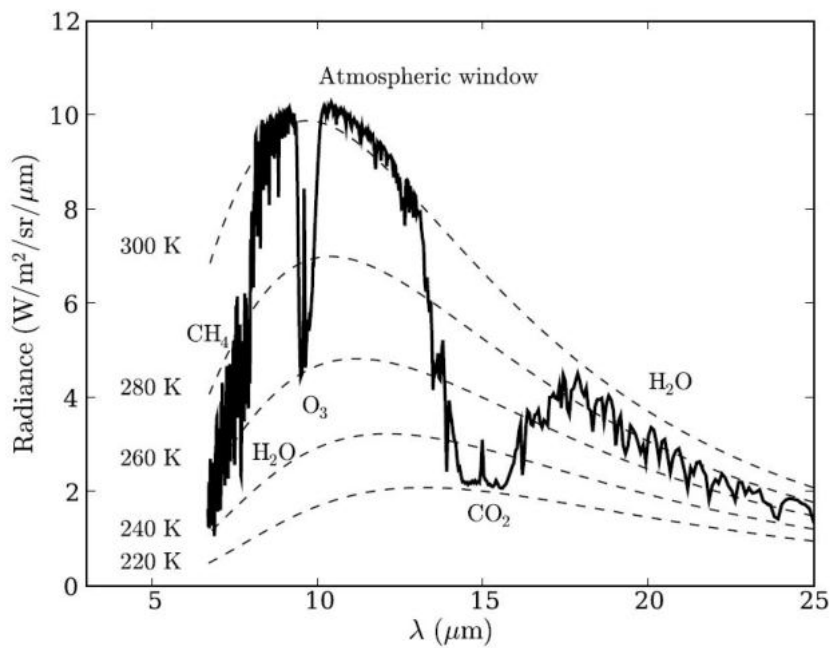


Abbildung 2.7 | Spektrum der von der Erde ausgehenden Infrarot-Strahlung, gemessen in einer Höhe von 70 km über dem Meeresboden bei einer Temperatur von 305 K. Bei den Absorptionsbanden sind die dafür verantwortlichen Treibhausgase gekennzeichnet. Zum Vergleich sind die Planck'schen Strahlungsspektren von Schwarzkörpern der Temperaturen 220, 240, 260, 280 und 300 K gestrichelt aufgetragen. Quelle: (Sportisse, 2010).

3 Der Treibhauseffekt der Erde

Mit den Grundlagen aus dem vorherigen Kapitel können wir jetzt genauer auf den von den Treibhausgasen verursachten Effekt, den sogenannten Treibhauseffekt, eingehen. Dabei wird zunächst mithilfe des Strahlungshaushalts der Atmosphäre der natürliche und im Anschluss der anthropogene Treibhauseffekt, der eng mit dem Klimawandel zusammenhängt, erläutert. Am Ende des Kapitels werden noch einige Folgen der globalen Erwärmung erörtert.

3.1 Der Strahlungshaushalt der Atmosphäre

Wie in Kapitel 2.4 erwähnt, beträgt die Solarkonstante, also „die Energieflussdichte der von der Sonne kommenden Strahlung am Ort der Erde durch eine senkrecht auf der Verbindungsgeraden zwischen Sonne und Erde stehenden Fläche, gemittelt über die Erdbahn bzw. über ein Jahr“ (Roedel, 2017, S. 19), ca. 1367 W/m^2 . Bei dieser Überlegung wird von einer kreisförmigen Fläche πR^2 , wobei R der Erdradius ist, ausgegangen. Die Erdoberfläche als Ganze besitzt allerdings eine Fläche von $4\pi R^2$. Die mittlere solare Einstrahlung auf die Erdoberfläche S_0 beträgt damit nur noch ein Viertel der Solarkonstante, nämlich

$$S_0 = 342 \text{ W/m}^2. \quad (3.1)$$

Zu bemerken ist, dass die solare Einstrahlung sowohl von den Jahreszeiten als auch von der geographischen Breite abhängt. Während S_0 am Äquator über das Jahr hinweg weitgehend konstant bleibt, beträgt die Einstrahlung am Nordpol in den Wintermonaten quasi null (Polarnacht) und hat ihr Maximum an der Sommersonnenwende, wo Werte über 500 W/m^2 angenommen werden (Roedel, 2017, S. 21). Der jährliche Verlauf der Solarkonstante wird in Abb. 3.1 dargestellt.

Ein weiterer Faktor, der die Strahlungsintensität der Sonne beeinflusst, sind Sonnenfleckenzyklen. Sonnenflecken sind dunkle, auch von der Erde aus beobachtbare Bereiche auf der Sonnenoberfläche, die durch Austreten von heißem Plasma aus dem Inneren der Sonne und dem damit verbundenen Abkühlen entstehen. Die Strahlungsleistung hängt somit direkt von der Anzahl der beobachtbaren Sonnenflecken ab, die sich in einem Zyklus von

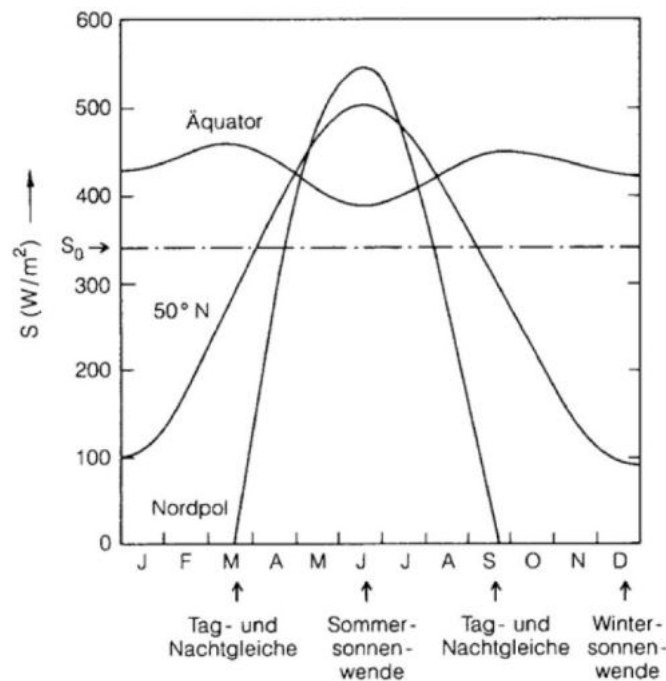


Abbildung 3.1 | Solarkonstante im Jahresverlauf an verschiedenen Breitengraden (Äquator, 50° Nord, Nordpol). Gemittelt ergibt sich so ein Wert von ca. $340, \text{W/m}^2$. Quelle: (Roedel, 2017).

ca. elf Jahren bewegen. Die durch Sonnenflecken verursachte Unsicherheit der Solarkonstante beträgt ca. 1 W/m^2 , was zu einer effektiven Änderung der mittleren Temperatur auf der Erde von $0,6^\circ \text{C}$ beitragen könnte (Barry & Chorley, 2009, S. 31).

Tritt die Sonnenstrahlung nun in die Erdatmosphäre ein, kommt es zu einer Reihe von Reflexions- und Absorptionsprozessen, die in Abb. 3.2 dargestellt sind. Von den durchschnittlich 342 W/m^2 an Strahlungsleistung werden insgesamt 107 W/m^2 , also ca. 31%, wieder zurück ins All reflektiert. Dies geschieht zum einen durch eine Reflexion der Strahlung durch die Atmosphäre, Wolken und kleine Luftpartikel, auch Aerosole genannt, zum anderen durch die Erdoberfläche selbst. Dieses Reflexionsvermögen wird Albedo genannt. Betrachtet man das Rückstreuvermögen eines Planeten aus dem All, so spricht man von der planetarischen Albedo. Bei der Erde beträgt diese also ca. 30%. Die Rückstreuung der Erdoberfläche selbst wird als Boden-albedo bezeichnet (vgl. (Roedel, 2017, S. 22ff.)). Der Anteil dieses Effekts an der solaren Einstrahlung beträgt 9% und wird hauptsächlich von Schnee- und Eisflächen, Gletschern und Wüsten verursacht (vgl. (Solomon et al., 2007, S. 94)). Niedriges Rückstrahlvermögen besitzen vor allem Ozeane bei senkrechtem Lichteinfall (4%) und Erdboden bzw. Ackerland (10%). Tabelle 3.1 zeigt die Werte für das Rückstrahlvermögen für verschiedene Oberflächen. Neben diesen Reflexionsprozes-

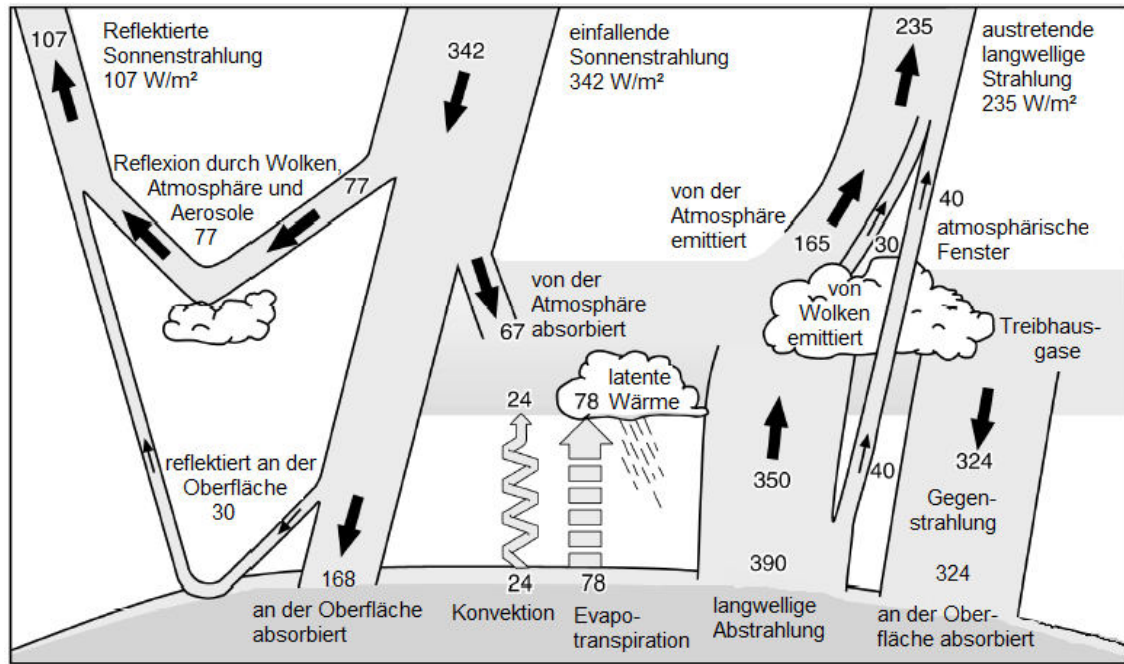


Abbildung 3.2 | Strahlungshaushalt der Erde. Die einfallenden Sonnenstrahlung durchläuft in der Atmosphäre und am Erdboden verschiedene Absorptions- und Reflexionsprozesse und wird zum Teil als langwellige Strahlung wieder emittiert. Quelle: (Zentralamt für Meteorologie und Geodynamik, 2007), bearbeitet nach (Solomon et al., 2007).

sen kommt es zu Absorptionsprozessen in der Atmosphäre und auf der Erdoberfläche, sodass dort mit 168 W/m^2 ca. die Hälfte der solaren Einstrahlung absorbiert wird (Solomon et al., 2007, S. 94). Ein Teil der absorbierten Strahlung sorgt für Konvektions- und Verdunstungsprozesse, die zyklisch ablaufen und somit insgesamt keinen Beitrag zur Strahlungsbilanz liefern. Wie jeder Körper, der eine gewisse Zeit einer Strahlungsquelle ausgesetzt ist, so befindet sich auch die Erde im thermischen Gleichgewicht, d.h. die absorbierte solare Strahlung entspricht der wieder emittierten langwelligeren thermischen Strahlung. Würde die Erdoberfläche mit der gleichen Energie pro Fläche zurückstrahlen, die sie absorbiert (also in diesem Fall ca. 235 W/m^2), so wäre die Oberflächentemperatur deutlich niedriger als die tatsächliche. Setzt man die absorbierte Strahlungsleistung pro Quadratmeter in das Stefan-Boltzmann-Gesetz (Gl. 2.3) ein und stellt nach der Temperatur um, so ergibt sich:

$$T = \sqrt[4]{\frac{235 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{5,670 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}}} \approx 254 \text{ K} = -19 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (3.2)$$

Die Erde hätte also eine Temperatur, die $33 \text{ }^\circ\text{C}$ unter der mittleren globalen Durchschnittstemperatur von $14 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt. Wasser käme nur in gefrorenem Zustand vor und Leben in der

Tabelle 3.1 | Albedowerte für verschiedene Oberflächen. Während helle Flächen wie Eis oder Schnee ein sehr hohes Rückstrahlvermögen besitzen, absorbiert frischer Asphalt fast die gesamte auftreffende Strahlung. Daten entnommen aus (Roedel, 2017).

Oberfläche	Albedo (%)
Erdboden, Ackerland	10
Wüstensand	40
Wald	8 - 18
Grasland	25
Frischer Asphalt	4
Meer, bei senkrechtem Einfall	4
Meer, bei streifendem Einfall	90
Meereis	50 - 70
Schnee	80 - 90

heutigen Form wäre nicht möglich. Warum ist es aber tatsächlich nicht so kalt auf der Erde, wie eben berechnet? Die Antwort liegt in der Zusammensetzung der Atmosphäre. Die gesamte langwellige Abstrahlung der Erdoberfläche beträgt 390 W/m^2 , wovon tatsächlich 235 W/m^2 (also der Betrag der absorbierten Strahlung) wieder ins All abgestrahlt wird. Die thermische Strahlung, die von der Erde emittiert wird, wird allerdings von den Treibhausgasen wie Wasserdampf und CO_2 absorbiert, wohingegen die Hauptbestandteile der Atmosphäre, nämlich Wasserstoff und Stickstoff, keine IR-absorbierenden Eigenschaften besitzen. Die Treibhausgase selbst strahlen diese gespeicherte thermische Energie in alle Richtungen ab und verursachen so auch eine Gegenstrahlung von 342 W/m^2 in Richtung Erde, die wiederum von der Erdoberfläche absorbiert wird und zu einer Erwärmung führt. Dieser Effekt wird natürlicher Treibhauseffekt genannt, da die gleichen Prozesse im Prinzip auch in einem Glas- oder Treibhaus ablaufen. Die kurzwellige Sonnenstrahlung kann in den Innenbereich eindringen. Die langwellige thermische Strahlung, die vom Boden und den Pflanzen darin ausgeht, bleibt im Treibhaus gefangen und sorgt somit für eine erhöhte Temperatur. Allerdings verhindert in diesem Fall das Glasdach auch den Abtransport von turbulenter Wärme, ein Effekt, der ebenfalls zur Erhöhung der Temperatur beiträgt (Barry & Chorley, 2009, S. 51).

Welche der in Kapitel 2.4 erwähnten Bestandteile der Atmosphäre tragen nun am meisten zum Treibhauseffekt bei? Betrachtet man die spektrale Verteilung der Bodenstrahlung sowie die Intensität der Gegenstrahlung, was in Abb. 3.3 dargestellt ist, so sind deutliche Absorptionsbanden zu beobachten. Wie bereits erwähnt, strahlt die Erde infrarotes Licht ab und besitzt somit auch ein Strahlungsspektrum, das dem eines schwarzen Strahlers nach Gleichung 2.4 ähnelt. Das Spektrum der Gegenstrahlung weist einen starken Ein-

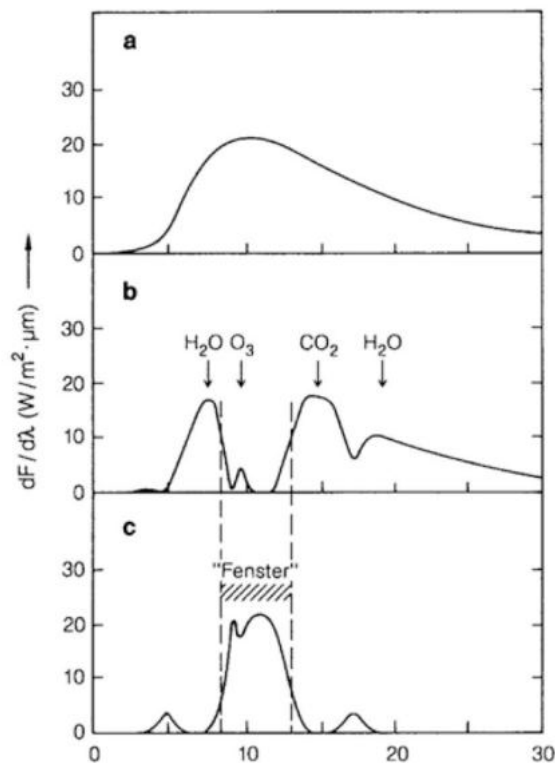


Abbildung 3.3 | Dargestellt ist die spektrale Verteilung der Bodenstrahlung (a), der von der atmosphärende reflektierten Gegenstrahlung (b) und die Differenz der beiden (c) in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Quelle: (Roedel, 2017).

bruch der Intensität im Bereich des optischen Fensters auf, da Licht dieser Wellenlänge die Atmosphäre ungehindert durchdringen kann. Die einzelnen Absorptionsbanden, die den Treibhausgasen eindeutig zugeordnet werden können, folgen prinzipiell wieder der spektralen Verteilung eines Schwarzen Körpers: Licht im Bereich dieser Wellenlänge wird also fast vollständig absorbiert und teilweise wieder in Richtung Erdoberfläche emittiert. Zu den großen Absorptionsbanden gehört die von Wasser, das im Wellenlängenbereich von 5 bis 8 μm eine starke Schwingungsrotationsbande mit einem Maximum bei ca. 6.3 μm sowie eine breite Absorptionsbande bei einer Wellenlänge von ca. 16 μm besitzt. Die zweite dominierende Bande im Spektrum der Gegenstrahlung lässt sich Kohlenstoffdioxid zuordnen, das, wie bereits in Kapitel 2.4 erwähnt, eine charakteristische Bande um ein Maximum von ca. 15 μm besitzt. Ozon besitzt eine sehr schmale Bande bei ca. 9.6 μm . Die weiteren Treibhausgase, die in Kapitel 2.4 erwähnt wurden, nämlich Methan und Lachgas, besitzen Banden zwischen 7 und 8 μm . Diese fallen somit in den Bereich der rechten Flanke der Absorptionsbande von Wasser und sind deshalb nicht explizit in der Abbildung aufgeführt (vgl. (Roedel, 2017, S. 45ff.)).

Zu der berechneten, von Treibhausgasen verursachten Erwärmung von 33 K ist der

Hauptanteil, nämlich 21 K, auf Wasserdampf zurückzuführen. Der Anteil von Kohlendioxid in der Atmosphäre ist für eine Erwärmung von ca. 7 K verantwortlich, der von Ozon für 2 K und die Anteile der restlichen Treibhausgase (Methan, Lachgas) für die restlichen 2 K. Neben den eben beschriebenen temperaturerhöhenden Effekten sorgen vor allem Wolken dafür, dass ein Teil der ankommenden Strahlung reflektiert wird. Sie reduzieren aufgrund ihrer hohen Albedo die von der Erde absorbierte solare Strahlung um 50 W/m^2 , schwächen die von der Erde emittierte terrestrische Strahlung allerdings nur um 30 W/m^2 ab. Wäre der gesamte Globus mit Wolken bedeckt, würden 20 W/m^2 an Strahlungsleistung verloren gehen. Dabei fällt dieser Effekt in niedrigen Höhen deutlich stärker aus, wohingegen in größerer Höhe die Bilanz sogar positiv sein kann (Barry & Chorley, 2009, S. 51ff.).

3.2 Der anthropogene Treibhauseffekt und Klimawandel

Der Treibhauseffekt ist ein natürlich stattfindender Prozess. Ohne weitere Einflüsse auf die Umwelt würde die Erdtemperatur stabil bleiben. Seit 1750 ist die durchschnittliche Temperatur allerdings um ca. 1,3 K angestiegen. Die Ursache für diesen Anstieg ist der anthropogene, also der menschengemachte Treibhauseffekt. Betrachtet man die Einflüsse auf die Durchschnittstemperatur, so stellt man fest, dass die Erwärmung durch vier grundlegende Prozesse stattfindet (Jacobson, 2019): Die Emission von anthropogenen Treibhausgasen, anthropogene Aerosole, die chemische Elemente enthalten, welche das Sonnenlicht absorbieren, anthropogene Wärmeemissionen und der städtische Wärmeinsel-Effekt (*urban heat island effect*). Eine Übersicht über den Beitrag des jeweiligen Effekts zur globalen Erwärmung seit 1750 ist in Abbildung 3.4 zu sehen. Die anthropogenen Treibhausgase, die den Hauptanteil der Erwärmung ausmachen, sind Kohlenstoffdioxid, Methan, Lachgas sowie Ozon, Wasser und weitere Halogene.

Emission anthropogener Treibhausgase

Mit dem Beginn der Industrialisierung in Europa und den USA im 18. Jahrhundert begann die Menschheit große Mengen an fossilen Brennstoffen wie Kohle und Öl zu verbrennen. Abbildung 3.5 zeigt, dass sich der CO_2 -Anteil in der Atmosphäre seit 1750 um ca. 50% erhöht hat und dabei von in etwa 280 ppm bis auf über 400 ppm im Jahr 2018 angestiegen ist. Neben dem Anstieg an CO_2 ist auch ein deutlicher Zuwachs an Methan und Lachgas ab der industriellen Revolution zu beobachten. Der Methangehalt der Atmosphäre stieg in den letzten 150 Jahren um 150%, nämlich von ca. 0,7 ppm auf 1,8 ppm an, während sich der Anteil von Lachgas versechsfacht hat, von 0,27 ppm auf 1,86 ppm. Erhöht sich

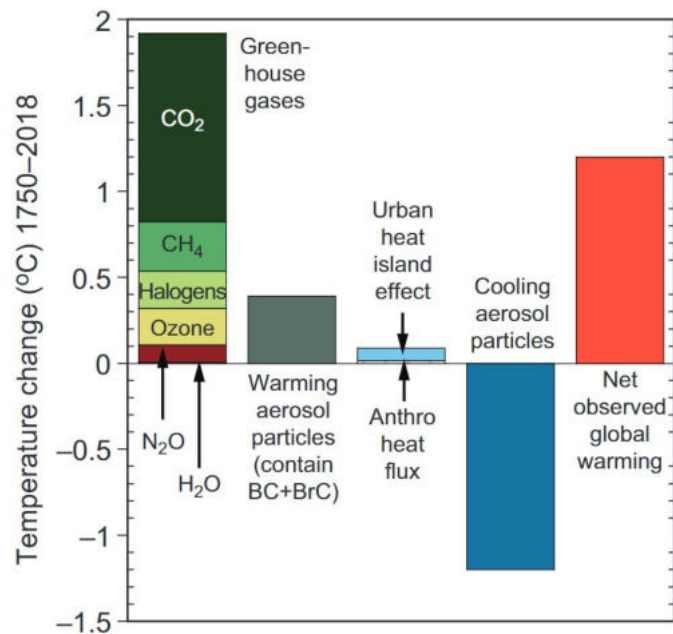


Abbildung 3.4 | Geschätzter Beitrag verschiedener Effekte zum Temperaturverlauf seit 1750. Während Treibhausgase (vor allem CO₂), wärmende Aerosole und der Urban heat island effect einen positiven Beitrag zur globalen Temperatur liefern, wirken kühlende Aerosole dem entgegen. Daraus ergibt sich die beobachtete Netto Globale Erwärmung (rot). Quelle: (Jacobson, 2020).

der Anteil an Treibhausgasen in der Luft, so steigt auch die Absorptionsfähigkeit der Atmosphäre für thermische Strahlung. Je mehr Strahlung von den in Kapitel 3.1 erwähnten 390 W/m^2 von der Atmosphäre absorbiert werden kann, desto höher ist der Betrag der dadurch verursachten Gegenstrahlung. Es kommt somit zu einer höheren Gleichgewichtstemperatur. Tabelle 3.2 zeigt die Länder mit den größten CO₂-Emissionen im Jahr 2018. Den größten Gesamt-CO₂-Ausstoß (Stand: 2018) verursacht China mit über 110.000 Megatonnen pro Jahr, gefolgt von den USA und Indien. Deutschland liegt auf Platz 6 mit ca. 750 Megatonnen CO₂ pro Jahr (Crippa et al., 2019).

Ozon hingegen wird nicht vom Menschen emittiert, trägt aber trotzdem einen beträchtlichen Anteil zur Erwärmung bei: Es lässt sich in troposphärische und stratosphärisches Ozon einteilen. Ersteres wirkt als Treibhausgas, ist allerdings nur von kurzer Lebensdauer und ungleichmäßig auf dem Globus verteilt (Cooper et al., 2014). Seit der Industrialisierung ist ein stetiger Anstieg von troposphärischen Ozon zu beobachten. Dieser resultiert aus der vom Menschen verursachten Emission von Stickstoffoxiden, Methan und Kohlenstoffmonoxiden (Jacobson, 2019). Hauptverursacher der Emissionen von Stickstoffoxiden sind Verbrennungsprozesse von Kohle, Öl, Gas oder Abfällen. Auch der Straßenverkehr in Ballungsräumen trägt zum Ausstoß von Stickstoffmonoxid bei. Methanemis-

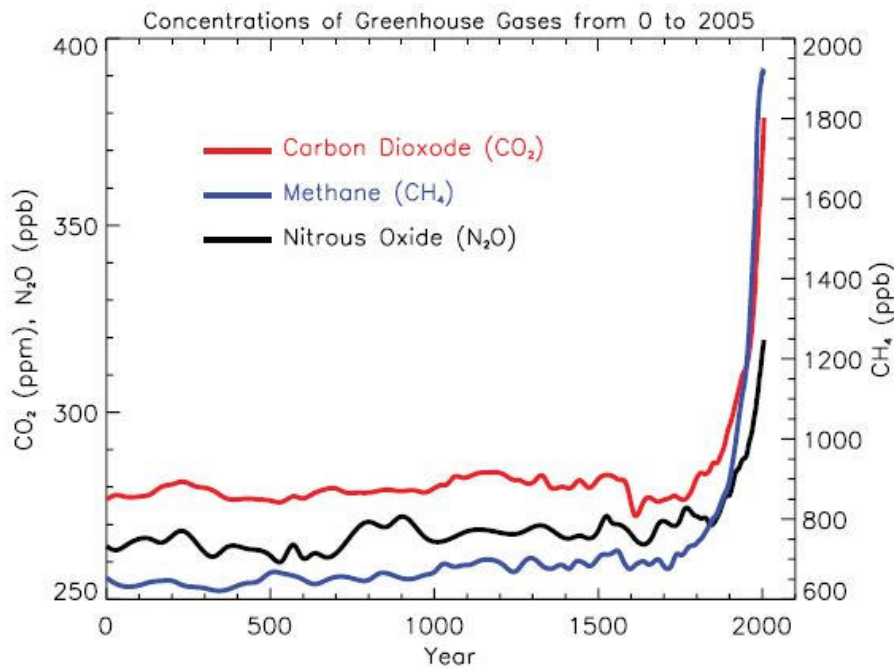


Abbildung 3.5 | Konzentration der Treibhausgase CO₂ (rot), Methan (blau) und Lachgas (schwarz) vom Jahr 0 bis 2005. Die Einheit ppm (parts per million) bzw. ppb (parts per billion) beschreibt, wie viele Treibhausgasmoleküle auf 1 Million bzw. 1 Milliarde Luftmoleküle kommen. Quelle: (Solomon et al., 2007).

sionen stammen von Massentierhaltung, der Förderung und Gewinnung von Brennstoffen wie Erdgas und Steinkohle sowie von offenen Mülldeponien, wohingegen Kohlenmonoxide hauptsächlich vom Ausstoß von Kraftfahrzeugen stammen (Umweltbundesamt, 2020b). Stratosphärisches Ozon, das sich am oberen Ende der Stratosphäre befindet, entsteht durch die Aufspaltung von molekularem Sauerstoff O₂ in atomaren Wasserstoff. Reagiert der atomare Wasserstoff wiederum mit O₂, entsteht Ozon. Das so entstehende Ozon befindet sich in einem natürlichen Gleichgewicht und absorbiert schädliche UV-Strahlung. Es verhindert somit ein Eintreten dieser in untere Atmosphärenschichten. Mit dem Beginn der Emission von ozonschädigenden Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen, kurz FCKW, und Halogenen seit Anfang des 20. Jahrhunderts hat der Anteil des stratosphärisches Ozons um 5% abgenommen. Diese Stoffe wurden vor allem in Kühlschränken, Klimaanlage oder als Treibgas in Sprays eingesetzt (vgl. (Umweltbundesamt, 2020a)). Durch das stetige Aufsteigen dieser Gase in die oberen Atmosphärenschichten in den letzten 100 Jahren und der damit verbundenen Aufspaltung in Chlor und Brom kommt es zu einer chemischen Reaktion mit Ozon, das dadurch kontinuierlich zerstört wird (vgl. (Jacobson, 2019)).

1987 wurde im Montrealer Protokoll eine Eindämmung in der Produktion und Verwendung von FCKW-Stoffen beschlossen, nachdem der ozonschädigende Effekt bekannt

Tabelle 3.2 | Die zehn Länder mit der größten CO₂-Emission im Jahr 2018 in Megatonnen. Der Anteil ist auf den weltweiten Ausstoß im Jahr 2018 bezogen. Daten entnommen von (Crippa et al., 2019).

Land	CO ₂ -Emission 2018 in Megatonnen	Anteil in %
Volksrepublik China	11256	29,7
Vereinigte Staaten	5275	13,9
Indien	2622	6,9
Russland	1749	4,6
Japan	1199	3,1
Deutschland	753	2,0
Iran	728	1,9
Südkorea	695	1,8
Saudi-Arabien	625	1,6
Kanada	594	1,6

wurde. Die Ausdehnung des durch die Emission dieser Stoffe entstandenen Ozonloches über der Antarktis, ein Bereich der Erdatmosphäre, der besonders ozonarm ist, ist seit dem Beschluss dieses Vertrags 20 Jahre später so gering wie zuletzt 1988 (vgl. (Mersmann et al., 2017)).

Anthropogene Aerosole

Neben den Treibhausgasen spielen Aerosole eine wichtige Rolle bei der globalen Erwärmung. Hauptverursacher solcher Aerosole sind Verbrennungsprozesse von Biomasse und die Gewinnung von fossilen Brennstoffen. Aerosole wie z.B. Sulfate, welche die Strahlung der Sonne reflektieren können, mindern die Strahlungsintensität, die an der Erdoberfläche ankommt und besitzen somit einen kühlenden Effekt auf die Erdtemperatur. Aerosole wie schwarzer Kohlenstoff, welche die Fähigkeit besitzen, Sonnenlicht zu absorbieren, verursachen eine Erwärmung der absorbierenden Atmosphärenschicht mit einer damit verbundenen Abkühlung der darunterliegenden Oberfläche. Diese Partikel können jedoch die gespeicherte Energie in Form von langwelliger Strahlung wieder Richtung Oberfläche emittieren, was einer Abkühlung wiederum entgegenwirkt. Vor allem in Erdregionen mit einer hohen Albedo wie z.B. den Polarregionen bewirkt schwarzer Kohlenstoff durch seine absorbierenden Eigenschaften eine Reduzierung des sonst kühlenden Einflusses von anderen Aerosolen auf die Erdoberfläche. Der resultierende Effekt von Aerosolen auf den Strahlungshaushalt der Erde beträgt $-0,2 \text{ W/m}^2$. Eine Erhöhung der Konzentration von Partikeln wie schwarzem Wasserstoff verringert aber immer weiter den sonst kühlenden

Effekt und trägt somit effektiv zu einer Erwärmung der Erde bei (vgl. (Schult et al., 1997)).

Wärmeemission

Etwa 0,7% des Beitrages zur Erderwärmung tragen Wärmeemissionen bei. Diese Wärme entsteht beispielsweise bei der Verbrennung von Rohstoffen und Biomassen zur Energiegewinnung sowie in Kernkraftwerken beim Kühlen der Brennstäbe als auch allgemein bei der widerstandsbedingten Umwandlung elektrischer Energie in Wärme. Diese Wärme sorgt für eine direkte Temperaturerhöhung. Auch wenn im globalen Kontext diese Energie oft in andere Formen umgewandelt wird, bleibt sie dennoch in der Atmosphäre und hat einen Einfluss auf das globale Klima (vgl. (Jacobson, 2019)).

Urban Heat Island Effect

Der städtische Wärmeinsel-Effekt resultiert aus der immer fortschreitenden Urbanisierung der Menschheit. Durch das Pflastern und Teeren von Straßen und die Ausweitung von Wohnraum mit der damit verbundenen Zerstörung der natürlichen Vegetation wird der natürliche Boden fortschreitend durch Oberflächen ersetzt, welche die Evaporation des Bodens und die Evapotranspiration von Pflanzen mindert. Da diese beiden Effekte einen kühlenden Einfluss auf das Klima besitzen, wird so die Erwärmung der Erde vorangetrieben. Ca. 3% der Erderwärmung sind auf den urban heat island effect zurückzuführen (vgl. (Jacobson, 2019)).

3.3 Folgen des Klimawandels

Dass eine Erwärmung um nur 1,5 K massive Auswirkungen auf die Erde hat, ist unumstritten. Die kompletten Auswirkungen sind dabei so komplex, dass sie bis in die Einzelheiten kaum alle genannt werden können. Im Folgenden werden einige der gravierendsten direkt beobachtbaren globalen Folgen des Klimawandels erläutert. Dass diese wiederum regional die dort anzutreffende Fauna und Flora sowie das soziale Leben des Menschen beeinflussen, ist klar und wird an geeigneter Stelle nur angeschnitten.

Anstieg des Meeresspiegels

Im letzten Jahrhundert ist der Meeresspiegel jährlich um schätzungsweise 1,7 mm angestiegen, wobei die Raten in den letzten Jahren des 20. Jahrhundert deutlich über dem Durchschnitt lagen (Solomon et al., 2007, S. 409). Hauptverantwortlich für den Anstieg

sind nach (Cazenave et al., 2018) vier Prozesse: Die thermale Ausdehnung von Wasser bei steigender Temperatur (42%), das Abschmelzen von Gletschern und kleinen Eiskappen (21%) sowie der Rückgang arktischen Eises in den Polarregionen, im speziellen Grönland (15%) und der Antarktis (8%). Die Prozentzahl gibt dabei jeweils den Anteil an der gesamten Meeresspiegelerhöhung an. Betrachtet man den Einfluss der Ozeane auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre, so stieg die gespeicherte Wärmemenge der Meere seit Mitte des letzten Jahrhunderts bis zur Jahrtausendwende um 15×10^{22} J, was einer mittleren Wärmezunahme von $0,2 \text{ W/m}^2$ entspricht. Für die Jahre 1993 bis 2003 ist sogar eine Zunahme von $0,6 \text{ W/m}^2$ beobachtet worden. Diese vermehrte Energieaufnahme sorgt dafür, dass insgesamt mehr der von der solaren Strahlung ankommende Energie gespeichert als wieder abgegeben wird, was in einer Erhöhung der Erdtemperatur resultiert. Die globale Temperaturerhöhung der Ozeane über die gesamte Wassersäule, also alle Tiefenbereiche, seit Mitte des letzten Jahrhunderts beträgt zwar nur $0,04 \text{ }^\circ\text{C}$, dies liegt allerdings hauptsächlich daran, dass vorwiegend die oberen Meeresschichten direkt erwärmt werden (vgl. (Schubert et al., 2006, S. 7)).

Betrachtet man also nur die globale Meeresoberflächentemperatur in den letzten 20 Jahren, so war die Temperaturabweichung vom Mittelwert des letzten Jahrhunderts stets über $+0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (2020 sogar $0,76 \text{ }^\circ\text{C}$). Die durch diese Temperaturerhöhung verursachte thermische Ausdehnung von Wasser ist der Hauptgrund für den Anstieg der Meeresspiegel (NOAA National Centers for Environmental Information, 2021). Das Abschmelzen von Gletschern und der Eisschilde in den Polarregionen und die damit verbundenen Masseverluste aufgrund erhöhter Temperaturen sorgen für ein Abfließen des geschmolzenen Eises in die Weltmeere sowie für das Abspalten von Eisbergen. Auch wenn das Volumen der Eiskappen in Grönland und der Antarktis einem Meeresspiegelanstieg von 7 bzw. 57 m entsprechen würde (Solomon et al., 2007, S. 44), ist zu bemerken, dass man den Masseverlust der Gletscher nicht direkt in einen Meeresspiegelanstieg übersetzen darf. Gletschereis, welches sich unter der Meeresoberfläche befindet, besitzt bei Abschmelzen, außer einer kleinen Verringerung, keinen Einfluss auf den Anstieg des Meeresspiegels. Ebenso wird das Schmelzwasser von Inlandgletschern zunächst in den regionalen Flüssen und Seen gespeichert, bevor es letztendlich seinen Weg in die Ozeane fortsetzt (vgl. (Cazenave et al., 2018)).

Versauerung der Ozeane

Neben der Erwärmung der Ozeane und dem damit verbundenen Anstieg des Meeresspiegels kommt es außerdem zu einer fortschreitenden Versauerung der Meere. Das vom Menschen in hohem Maße freigesetzte CO_2 in der Atmosphäre wird von den Ozeanen ab-

sorbiert. Das absorbierte Kohlenstoffdioxid reagiert mit Wasser zu Kohlensäure, was den leicht basischen Charakter von Wasser reduziert. Die anthropogenen Treibhausgasemissionen haben dazu geführt, dass der pH-Wert in den letzten 200 Jahren um ca. 0,1 gefallen ist. Bleibt der Trend der steigenden CO₂-Emissionen erhalten, so könnte der pH-Wert bis 2100 um 0,5 Einheiten sinken (vgl. (Raven et al., 2005)).

Welche Folgen hat eine Versauerung der Meere? Schon kleine Veränderungen des Säuregehalts in den Weltmeeren können zu gravierenden Veränderungen in den Ökosystemen der Ozeane führen. So wird vermutet, dass vor allem Korallen und Riffe in den tropischen Gebieten beschädigt und auf Dauer zerstört werden. Daneben können viele Meeresorganismen aufgrund des verringerten pH-Wertes keine stabilen Skelette und Schalen aufbauen. Dadurch verursachte Änderungen haben bisher unerforschte Folgen für die komplexen Nahrungsketten in den Ozeanen, die im Aussterben mancher Tierarten resultieren können. Damit verbundene Auswirkungen auf Fischbestände und den Verlust der Biodiversität in den Ozeanen führen zu gravierenden ökonomischen Verlusten in der Fischerei, vor allem in Küstenregionen (vgl. (Raven et al., 2005)).

Auftauen des Permafrostbodens

Die steigenden globalen Temperaturen haben vor allem in arktischen Regionen gravierende Auswirkungen. Neben dem oben erwähnten Schmelzen von Eismassen und Gletschern taut auch der Permafrostboden auf. Permafrost beschreibt Boden oder Sediment, dessen Temperatur mindestens zwei Jahre in Folge bei unter 0 °C liegt und somit dauerhaft gefroren ist. Er umfasst ca. 23 Mio. km² und macht somit global gesehen knapp ein Viertel der Landmasse aus (Umweltbundesamt, 2006). Tauen diese Landmassen auf, fangen Mikroorganismen an, den darin gespeicherten Kohlenstoff zu zersetzen, was in einer langwierigen Freisetzung großer Mengen an CO₂ und Methan über Jahre hinweg resultiert. Die Wirkung dieser beiden Treibhausgase verstärkt den Treibhauseffekt wiederum. Daher stellt das Tauen des Permafrosts einen positiven Rückkopplungseffekt des Treibhauseffekts dar. Da viele Prozesse und Abhängigkeiten beim Auftauen des Permafrosts noch nicht erforscht sind, können die Auswirkungen nur abgeschätzt werden. Experten gehen davon aus, dass sich die Arktis bis 2040 um 1,5 °C bis 2,5 °C gegenüber dem Durchschnitt der Jahre 1985 bis 2004 erwärmt. Bis zum Jahr 2100 wäre im extremsten Fall sogar eine Erwärmung von 7,5 °C möglich. Durch die fortwährende Bodendegradation werden bis Ende des Jahrhunderts schätzungsweise 232 bis 380 Milliarden Tonnen an Kohlenstoff freigesetzt, das meiste davon als Kohlenstoffdioxid, ca. 2,7% als Methan. Da Methan allerdings eine wesentlich stärkere Wirkung als CO₂ im Bezug auf den Treibhauseffekt besitzt, wird vermutet, dass es für ca. 50% der durch Permafrost-Tau verursachten Erwärmung verantwortlich ist (vgl.

(Schuur & Abbott, 2011)).

Extreme Wetterereignisse

In den letzten Jahren und Jahrzehnten kam es weltweit immer häufiger zu extremen Wetterereignissen wie Dürren, Hitzewellen oder Fluten. Ob diese Phänomene tatsächlich auf den vom Menschen verursachten Klimawandel zurückzuführen sind, ist allerdings oft fraglich. Da Extremwetterereignisse nur sehr selten vorkommen, ist es schwierig aus diesen wenigen Daten statistische Schlüsse zu ziehen. Um die Veränderung des Klimas und des Wetters zu analysieren, wird untersucht, ob die Anzahl an kürzlich aufgetretenen Anomalien größer ist, als sie zu erwarten wäre, wenn das Klima unverändert bliebe. So kann oftmals lediglich ein Trend festgestellt werden, einzelne Ereignisse können dennoch Ursachen besitzen, die unabhängig vom Klimawandel sind oder völlig zufällig auftreten. Nichtsdestotrotz sind sich Wissenschaftler einig, dass der anthropogene Treibhauseffekt und der damit verbundene Klimawandel zu vermehrten Wetterextremen führt (vgl. (Couchou & Rahmstorf, 2012)).

Hitzewellen und Dürren

Zu den sichersten Vorhersagen zählt, dass sich die Anzahl und die Schwere von Hitzewellen und Dürren zukünftig erhöhen wird. Als Hitzewelle bezeichnet man Perioden von Tagen bis Wochen, in denen die durchschnittliche Temperatur unnatürlich hoch ist. Oftmals direkt verknüpft mit Hitzewellen sind Dürren. Die erhöhten Temperaturen sorgen für eine verstärkte Evaporation, die besonders bei Pflanzen einen starken Feuchtigkeitsverlust verursacht. Die Folge ist eine Austrocknung der Böden, was wiederum dazu führt, dass mehr Hitze vom Boden absorbiert wird. Das Resultat sind heiße und trockene Sommer (vgl. (Walsh & Wuebbles, 2014)).

Zu den stärksten Hitzewellen in jüngster Vergangenheit zählen der Jahrhundertssommer 2003 und die Hitze und Dürre in Mitteleuropa 2018 sowie die durch extreme Hitze verursachten australischen Buschfeuer 2019. Prognosen gehen davon aus, dass Regionen, in denen bereits starke Hitzewellen aufgetreten sind (z.B. Paris 2003) in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts noch häufiger von stärkeren und länger anhaltenden Hitzeperioden betroffen sein werden. Auch wurde festgestellt, dass die kürzlich beobachteten Hitzewellen direkt mit atmosphärischen Zirkulationen zusammenhängen, die durch die steigenden Emissionen von Treibhausgasen verstärkt werden (vgl. (Meehl & Tebaldi, 2004)).

Starke Regenfälle und Hochwasser

Nicht nur die Anzahl an Dürren und Hitzewellen, sondern auch die Häufigkeit extremen Niederschlags ist in den letzten Jahrzehnten stark gestiegen. Da warme Luft eine höhere Wasserspeicherkapazität besitzt, kann die Atmosphäre bei steigender Temperatur mehr Feuchtigkeit speichern. Modelle zeigen, dass die durch den Menschen verursachte Temperaturerhöhung der Erde aufgrund der Emission von Treibhausgasen zur Verstärkung von ca. zwei Dritteln aller schweren Niederschläge in der nördlichen Hemisphäre beigetragen haben (vgl. (Min et al., 2011)). Eine Degradierung der Böden durch übermäßige landwirtschaftliche Nutzung sowie das Asphaltieren natürlicher Flächen sorgen für eine Minderung der Absorptionsfähigkeit dieser Niederschläge und verursachen so Überschwemmungen (vgl. (Wöhlcke, 2002)). Zu den stärksten Hochwassern und Niederschlagsereignissen in den letzten Jahrzehnten in Deutschland zählen das Hochwasser in West- und Mitteleuropa im Jahr 2021 und das Elbhochwasser 2003, bei dem die Elbe den höchsten Wasserstand seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1275 erreichte.

Politische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Folgen

Die Folgen für den Menschen, die aus der globalen Erwärmung resultieren, sind so vielschichtig und breit, dass sie den Rahmen der Arbeit sprengen würden. Neben vielen noch unbekanntem Folgen enden einige bereits wahrnehmbare Auswirkungen auf den Menschen oft in Teufelskreisläufen, die wiederum direkte negative Folgen mit sich bringen. Im Folgenden wird nur eine sehr kurze Übersicht über einzelne Konsequenzen gegeben, die besonders stark ins Gewicht fallen werden. Der Klimawandel bedroht die Gesundheit der Menschen auf vielschichtige Art. Auch wenn die Sterberate durch Extremwetterereignisse in entwickelten Ländern wie den USA in den letzten Jahren aufgrund besserer Anpassung und technologischem Fortschritt gesunken ist (vgl. (Goklany, 2009)), stellen Unwetter wie Fluten, Wirbelstürme oder Dürren lebensbedrohliche Ereignisse dar. Durch Veränderungen der Ökosysteme kann es zur Ausbreitung von Krankheitserregern kommen, da Überträger wie Mosquitos oder andere Insekten ihre Lebensweise verändern. Abgesehen davon erhöht sich die Gefahr sich mit Viren und Bakterien in kontaminiertem Wasser zu infizieren. Dürren und unregelmäßiger Niederschlag stellen große Herausforderungen für die Landwirtschaft dar. Vertrocknete Böden sind weniger fruchtbar, sodass Ernten ertragsärmer ausfallen. Erhöhte CO₂-Konzentrationen sorgen für einen sinkenden Nährwert vieler Rohstoffe. Auch wenn der Klimawandel für vereinzelte Bevölkerungsgruppen vor allem in sehr kalten Regionen auch positive Aspekte wie eine höhere landwirtschaftliche Produktion hat, wird vermutet, dass die negativen Faktoren die positiven weltweit überwiegen. Vor allem arme Bevölkerungsgruppen und Entwicklungsländer mit schlechten

Gesundheitssystemen werden am meisten von den oben genannten Problemen betroffen sein (vgl. (Smith et al., 2014)).

Aufgrund von Ressourcenknappheit, Landzerstörung durch Überbewirtschaftung und Wassermangel wird es immer mehr Menschen in den betroffenen Regionen geben, die ihre Heimat verlassen müssen. Obwohl der Klimawandel nicht hauptverantwortlich ist, haben Studien dennoch gezeigt, dass er Auswirkungen auf Kriege zwischen einzelnen Bevölkerungsgruppen hat. Auch wenn die genauen Zusammenhänge noch unklar sind, erhöht ein fortschreitender Klimawandel höchstwahrscheinlich das Risiko auf Konflikte (vgl. (Mach et al., 2019)).

4 Didaktische Hintergründe zum Experimentieren im Physikunterricht

4.1 Der Klimawandel im Physikunterricht an bayrischen Gymnasien

Aufgrund der aktuellen Relevanz des Klimawandels und der fortschreitenden globalen Erwärmung, hat es das Thema Klima auch in den neuen LehrplanPLUS im Fach Physik an bayrischen Gymnasien geschafft. Während im älteren Lehrplan nur einzelne Themengebiete aufgefasst werden, die für eine Analyse des Erdklimas wichtig sind (z.B. die Wärmelehre bzw. der Profildbereich Energietechnik am Naturwissenschaftlichen Gymnasium (NTG) in der 8. Jahrgangsstufe sowie die Betrachtung der Sonne in der 11. Jahrgangsstufe), findet sich im LehrplanPLUS ein kompakter Unterbereich *Thermischer Energietransport und Einflüsse auf unser Klima* von zwölf Unterrichtsstunden im Lernbereich *Wärmelehre*, der insgesamt 22 Stunden umfassen soll (Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung, 2020a). Die Wärmelehre wandert also von der ehemals 8. in die 9. Jahrgangsstufe und erhält mit vier zusätzlichen Unterrichtsstunden eine größere Bedeutung.

Im ersten Teil des Lernbereichs *Wärmelehre Das Teilchenmodell*, der zehn Stunden umfasst, sollen die Schülerinnen und Schüler zunächst über das Teilchenmodell relevante Größen wie die Temperatur und verschiedene Energieformen ableiten und identifizieren. Im weiteren Verlauf werden verschiedene Aggregatzustände und deren Änderungen thematisiert, um letztendlich Gase mithilfe der Größen Druck, Temperatur und Volumen zu beschreiben und zu analysieren. Im zweiten Teil *Thermischer Energietransport und Einflüsse auf unser Klima*, der zwölf Stunden umfasst, sollen die Schülerinnen und Schüler die Abhängigkeit der Temperaturerhöhung einer Flüssigkeit oder eines festen Körpers von verschiedenen Größen durch eigenständig geplante Experimente entdecken. Außerdem wird der Begriff der *Wärme* als Prozessgröße charakterisiert und von der Größe *Arbeit* abgegrenzt, um schließlich Ursachen und Prozesse thermischen Energietransports zu beschreiben.

Während diese Inhalte im Großen und Ganzen schon im älteren Lehrplan behandelt wer-

den, finden sich nun neue Elemente wieder, die speziell auf die Klima-Thematik der Erde ausgerichtet sind: Mit den erschlossenen Ursachen des thermischen Energietransports sollen die Schüler Vorgänge erklären, die zur Erwärmung der Erdatmosphäre führen. Hinzu kommt ein verpflichtendes Schülerexperiment, das einen Modellversuch zum Treibhauseffekt darstellen und diesen auf einfache Weise demonstrieren soll. Des Weiteren werden die Energieflüsse der Atmosphäre thematisiert und der Einfluss von Treibhausgasen auf die Gleichgewichtstemperatur der Erde diskutiert. Ausgehend davon, werden anthropogene Einflüsse auf das Klima erörtert und Maßnahmen erschlossen, wie Klimaschutzziele auch auf persönlicher Ebene eingehalten werden können.

In naturwissenschaftlichen Gymnasien in Bayern erfolgt eine Vertiefung der Fächer Chemie und Physik in sogenannten Profillbereichen. In der 9. Jahrgangsstufe umfasst der Profillbereich 28 Stunden und beinhaltet den Bereich *Klima* (ca. 10 Stunden) und den Bereich *Vertiefung prozessbezogener Kompetenzen anhand ausgewählter weiterer Inhalte* (ca. 18 Stunden), sodass hier eine ausführliche Betrachtung und Diskussion von klimarelevanten Prozessen stattfindet. Während der zweite Bereich keinen expliziten Bezug zur Klima-Thematik besitzt, werden vor allem im ersten Bereich die oben erwähnten Inhalte vertieft. Zu den grundlegenden Kompetenzerwartungen an die Schülerinnen und Schüler gehören vor allem die Identifikation weiterer physikalischer Aspekte und der Beitrag zum Themengebiet und das Recherchieren und Erörtern von verschiedenen Erklärungsansätzen zur globalen Erwärmung im Sinne einer objektiven Betrachtung der Klimadebatte. Spezielle Inhalte umfassen die thermische Ausdehnung sowie die dämpfende Wirkung der Ozeane auf die Geschwindigkeit der Erderwärmung als auch positive und negative Rückkopplungssysteme wie z.B. die Eis-Albedo-Rückkopplungen. Zudem werden weitere Konsequenzen und Gefahren der globalen Erwärmung analysiert und die Rolle und Verantwortung der Naturwissenschaft im Zuge dieser Thematik diskutiert (Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung, 2020a).

4.2 Das Kompetenzstrukturmodell im Fach Physik

Im Vergleich zum lehrerzentrierten und -orientierten Schulunterricht im 20. und Anfang des 21. Jahrhunderts wird in den neuen Lehrplänen ein Hauptaugenmerk vor allem auf die Kompetenzorientierung und -ausbildung der Schülerinnen und Schüler gelegt. Nach (Weinert, 2001) bezeichnen Kompetenzen „die bei Individuen verfügbaren oder durch sie erlernbaren kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten, um bestimmte Probleme zu lösen, sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten, um die Problemstellungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll nutzen“ zu können.

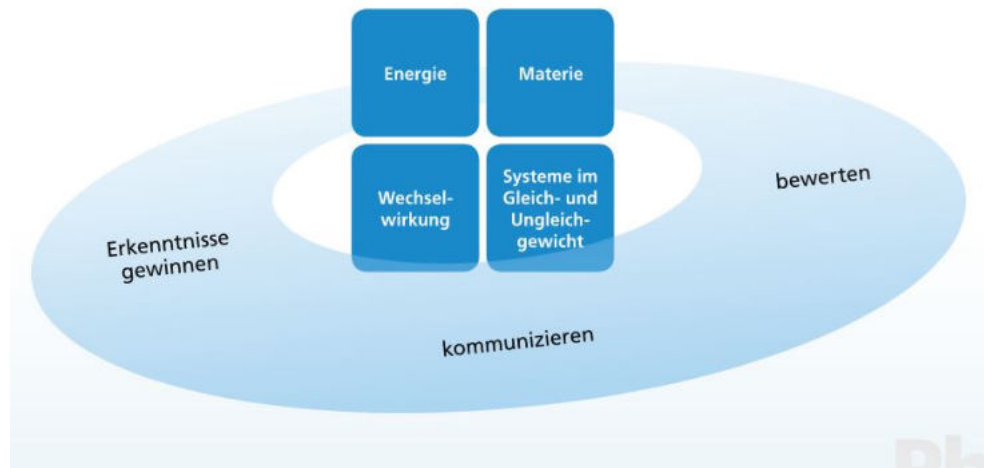


Abbildung 4.1 | Das Kompetenzstrukturmodell für das Fach Physik. Die vier Gegenstandsbereiche in der Mitte stehen dabei in Wechselwirkung mit den prozessorientierten Kompetenzen im äußeren Ring. Quelle: (Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung, 2020b).

Aufschluss über die im Physikunterricht relevanten Kompetenzen gibt das sogenannte Kompetenzstrukturmodell, welches in Abbildung 4.1 dargestellt ist. Dieses umfasst drei große prozessorientierte Kompetenzen *Erkenntnisse gewinnen*, *bewerten* und *kommunizieren* im äußeren Ring, die aktiv mit den vier Gegenstandsbereichen der Schulphysik nämlich *Energie*, *Materie*, *Wechselwirkung* und *Systeme im Gleich- und Ungleichgewicht* im Innern in Verbindung stehen. Die prozessorientierten Kompetenzen werden in der aktiven Auseinandersetzung der Schülerinnen und Schüler mit den Inhalten der Physik erworben und sind Grundbausteine für naturwissenschaftliche Arbeitsweisen und das Lösen physikalischer Probleme (vgl. (Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung, 2020b)).

Im Bezug auf diese Arbeit, in der es gezielt um Schülerexperimente geht, steht die Kompetenz *Erkenntnisse gewinnen* im Vordergrund. Experimentieren schafft die Möglichkeit, Hypothesen aufzustellen und diese durch geeignete Versuchsaufbauten zu überprüfen. Durch die Reflexion und Auswertung lernen die Schülerinnen und Schüler den Umgang mit Daten und mathematischen Modellen kennen. Auch das *Kommunizieren* ist ein wichtiger Bestandteil der Physik, denn nur so können Daten und Information aus verschiedensten Quellen richtig analysiert, genutzt und weiterverarbeitet werden. Im Bezug auf den Klimawandel speziell wird von den Schülern gefordert, die aktuelle Situation sowie Problematiken aber eventuell auch Lösungsvorschläge zu reflektieren. All diese Aspekte sind in der Kompetenz *bewerten* zu finden. Eine ausführlichere Beschreibung der einzelnen Kompetenzen und Inhaltsbereiche findet sich im Fachprofil Physik für den LehrplanPlus an Gymnasien in Bayern (Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung, 2020b).

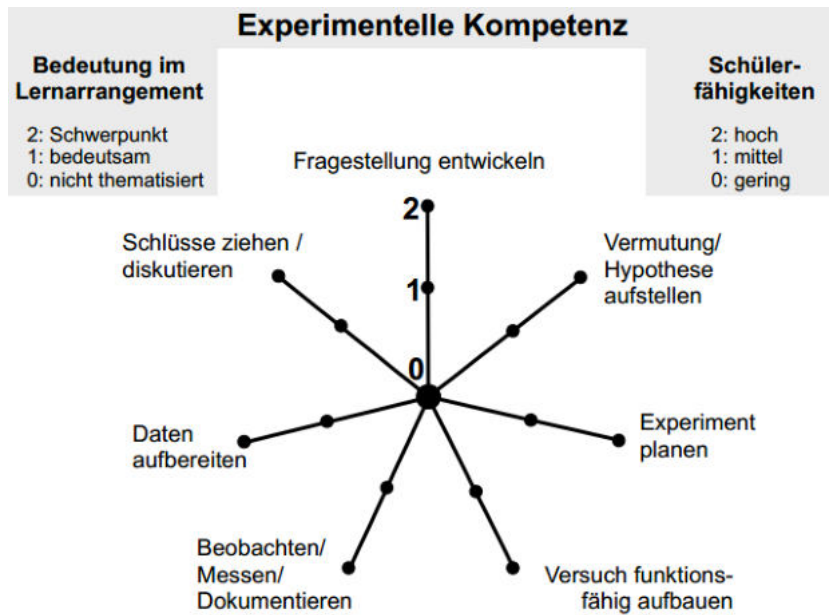


Abbildung 4.2 | Facettenmodell experimenteller Kompetenz. Zu sehen sind die sieben Teilkompetenzen, die in drei Stufen gewichtet werden können. Die Bedeutung der Stufe ist abhängig davon, ob man das Modell als Planungshilfe (oben links) oder Diagnosefunktion (oben rechts) verwendet. Quelle: (Nawrath et al., 2011).

4.3 Das Facettenmodell experimenteller Kompetenz

Im Folgenden wird ein Modell zur experimentellen Kompetenz vorgestellt, welches die didaktische Grundlage der im Verlauf dieser Arbeit erarbeiteten Schülerexperimente bildet. Es ist in Abbildung 4.2 zu sehen und besteht aus den sieben experimentellen Kompetenzen *Fragestellung entwickeln*, *Vermutung/Hypothese aufstellen*, *Experiment planen*, *Versuch funktionsfähig aufbauen*, *Beobachten/Messen/Dokumentieren*, *Daten aufbereiten* und *Schlüsse ziehen/diskutieren*. Für eine ausführliche Erläuterung der einzelnen sieben Aspekte sowie weitere Details wird an dieser Stelle auf (Nawrath et al., 2011) verwiesen. Das Modell kann für die Lehrkraft sowohl als Planungshilfe beim Erstellen von Experimenten als auch als Diagnose- und Rückmeldungsmöglichkeit nach dem Experimentieren dienen. Bei der Planung und Durchführung von Schülerexperimenten kann die Lehrkraft individuell gemäß der sieben dargestellten Facetten und den drei Stufen Schwerpunkte setzen. Wird eine Kompetenz mit der Stufe 0 bewertet, wird diese im Experiment nicht thematisiert. Bei Stufe 1 spielt sie eine bedeutsame Rolle und bei Stufe 2 bildet sie sogar einen Schwerpunkt im Experimentieren. Lehrkräfte sollen beim Erstellen von Schülerexperimenten nicht alle Kompetenzen gleichermaßen stark fordern, sondern vielmehr einzelne Teilkompetenzen betonen. Es wird allerdings empfohlen in längeren Unterrichtseinheiten auf eine gleichmäßige Berücksichtigung der Facetten zu achten.

Die Diagnosefunktion des Facettenmodells hat zwei gesonderte Aspekte. Zum einen können die Schülerinnen und Schüler durch das Spinnennetz nach dem Experimentieren bewertet werden, inwiefern sie den experimentellen Kompetenzen gerecht wurden. Mit den drei Stufen kann so bewertet werden, ob eine Schülerin oder ein Schüler die geforderte Kompetenz in vollem Ausmaß (2), nur teilweise (1) oder wenig bis gar nicht (0) umgesetzt hat. Um der Lehrkraft die Bewertung zu erleichtern, wurden die Anforderungen an die drei Niveaustufen für die einzelnen Teilkompetenzen ausführlich beschrieben. Diese werden hier nicht im Einzelnen erläutert, für eine ausführliche Erläuterung siehe ebenfalls (Nawrath et al., 2011).

Auch experimentunabhängig kann das Facettenmodell zur Diagnose der Teilkompetenzen von Schülerinnen und Schülern herangezogen werden. So kann von der Lehrkraft beurteilt werden, in welchem Ausmaß ein Schüler oder eine Schülerin gewisse Aspekte entwickelt hat. Eine Diagnose wie diese ermöglicht also eine individuelle Einschätzung und, bei Bedarf, Förderung für Schülerinnen und Schüler durch die Lehrkraft. Laut Befragungen unter Lehrkräften, die aktiv mit diesem Modell arbeiten, ist das Modell besonders hilfreich für die Planung von Schülerexperimenten und veranlasst dazu, differenzierter und bewusster über experimentelle Kompetenzen im Unterricht nachzudenken. Als Diagnosemeldung fand das Modell in den letzten Jahren allerdings kaum Einsatz.

5 Experimentierzirkel zum Treibhauseffekt

Da im LehrplanPLUS mit dem neuen Kapitel über thermischen Energietransport und Einflüsse auf unser Klima auch ein Modellexperiment zum Treibhauseffekt integriert ist, was von Schülerinnen und Schülern durchgeführt werden soll, war es Schwerpunkt dieser Arbeit ein bereits bestehendes Experiment von der Universität München aufzubauen, zu untersuchen, auf Tauglichkeit für den Einsatz an Schulen zu überprüfen und Arbeitsmaterial zu erstellen. Darüber hinaus wurden vier weitere Schülerexperimente entwickelt, die zusammen mit dem Modellexperiment in einem Experimentierzirkel an 9. Klassen durchgeführt werden können. Der Zirkel umfasst dabei fünf Versuche und ist für eine Doppelstunde und kleinere Gruppen ausgelegt (maximal vier Personen pro Versuch). Falls genug Ausstattung zur Verfügung steht, können die Versuche mehrfach aufgebaut werden. Auch können die Einzelexperimente aus dem Zirkel gelöst und unabhängig von den anderen in Schulstunden durchgeführt werden. Die Materialien und Aufgabenstellungen, die sich im Anhang der Arbeit befinden, sollen hierbei primär als Orientierungs- und Durchführungshilfe für Lehrkräfte dienen und können individuell angepasst werden. Da einige Versuche spezielle Materialien benötigen (Thermosäule, Wärmebildkameras, Lesliewürfel) werden in den Erläuterungen der Experimente teilweise auch Alternativen genannt, mit denen die Experimente ebenfalls durchgeführt werden können.

Im Folgenden werden die einzelnen Versuche vorgestellt. Dabei wird jeweils auf Aufbau und Durchführung, Ergebnisse und fachliche Hintergründe eingegangen. Im Zuge dessen werden auch Schwierigkeiten und mögliche Alternativen erläutert. Im Anschluss findet jeweils eine Einordnung in das Facettenmodell experimenteller Kompetenz (siehe Abb. 4.2) statt. Außerdem werden wichtige Hinweise für Lehrkräfte für die Durchführung gegeben.

5.1 Versuch: Modellexperiment zum CO₂-verursachten Treibhauseffekt

Das Hauptexperiment des Zirkels bildet das Modellexperiment zum CO₂-verursachten Treibhauseffekt der Universität München. Dieses ist Bestandteil des dort entwickelten Klimakoffers, der eine kompakte Zusammenstellung von Experimenten rund um das Thema Klima darstellt (Scorza & Strähle, 2020). Die wissenschaftlichen Hintergründe zum Experiment wurden in einer offenen Stellungnahme der Universität München diskutiert (Scorza et al., 2020).

Aufbau und Durchführung

Der Versuchsaufbau, zu sehen in Abb. 5.1, besteht aus einem 50 Watt Keramikstrahler, der sich aufgrund von Verbrennungsgefahr in einem Schutzkäfig befindet, und einer Pappdose mit 100 cm Innendurchmesser. Die Dose wird von beiden Seiten mit IR-durchlässiger Frischhaltefolie mit zwei Gummis abgedichtet. Außerdem werden auf die Oberseite drei kleine Löcher gebohrt. Eines dient zum Einführen eines Schlauches, über den später CO₂, welches in einem Kolben erzeugt wird, eingeleitet wird, ein weiteres zum Befestigen eines Digitalthermometers, dessen Spitze in die Dosenmitte ragt. Das dritte Loch dient dem Entlüften während des Einleitprozesses von Kohlenstoffdioxid. Mithilfe von Knete können die Löcher während des Versuches abgedichtet werden. Das Natron, die Citronensäure in Pulverform, Glaskolben mit Stopfen und Schlauch, kleiner Kolben mit Leitungswasser, Messbecher, Trichter, Chemikalienlöffel sowie die Waage dienen dem Erzeugen und Einleiten von CO₂. Zusätzlich befindet sich eine Thermosäule nach Moll, die an ein Spannungsmessgerät im mV-Bereich angeschlossen wird, hinter der Dose. Eine Stoppuhr wird zur regelmäßigen Messwertaufnahme verwendet.

Die Dose wird in einem Abstand von ca. 8 cm auf der Holzvorrichtung mit Gummis befestigt. Das Digitalthermometer wird so in das dafür vorgesehen Loch gesteckt, dass sich die Spitze mittig in der Dose befindet. Die beiden übrigen Löcher werden zunächst mit Knete abgedichtet. Die Thermosäule nach Moll wird in einem Abstand von ca. 10 cm hinter der Dose positioniert und an das Voltmeter angeschlossen. Der Messbereich ist unbedingt im 1 mV-Bereich zu wählen, da die gemessenen Thermospannungen sehr klein sind.

Der Keramikstrahler wird eingeschaltet und es wird fortlaufend die Temperatur in der Dose in einem Abstand von jeweils 30 s gemessen und notiert. Während sich die Dose aufheizt, werden in zwei separaten Messbechern mithilfe des Chemikalienlöffels und der Waage 24 Gramm Natron bzw. 8 Gramm Citronensäure abgewogen. Nach ca. 20 Minuten



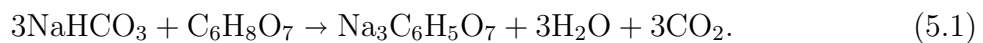
Abbildung 5.1 | Aufbau des Modellexperiments zum Treibhauseffekt. Die Luft in der abgedichteten Pappdose wird von einem Wärmestrahler aufgewärmt und die Temperatur mithilfe eines Thermometers gemessen. Die Thermosäule, die hinter der Dose positioniert wird, misst die eingehende Wärmestrahlung. Die Materialien zur Herstellung von Kohlenstoffdioxid sind auf der rechten Seite zu sehen.

sollte sich eine Gleichgewichtstemperatur in der Dose eingestellt haben. Zu erkennen ist dies, wenn die Temperaturmessung über einen längeren Zeitraum (ca. 2 Minuten) konstant bleibt. Die angezeigte Thermospannung wird notiert. Die Inhalte der beiden Messbecher werden nun zusammen mit etwas Wasser in den großen Kolben gefüllt. Der Kolben wird sofort mit dem Stopfen, in dem der Schlauch steckt, verschlossen. Die Schlauchöffnung in der Dose sowie das Entlüftungsloch werden geöffnet und der Schlauch in die Dose eingeführt. Die Temperatur wird weiterhin regelmäßig gemessen. Nach ca. 60 Sekunden wird der Schlauch entfernt und die beiden Löcher wieder mit Knetmasse abgedichtet. Die neue Thermospannung wird notiert und die Temperatur wird weiterhin fortlaufend gemessen.

Ergebnisse und fachlicher Hintergrund

Zur exakten Messung, die in Abb. 5.2 zu sehen ist, wurde statt eines Digitalthermometers ein Cassy-Messsystem mit Temperatursensor zur automatischen Datenerfassung sowie eine μV -Box von Cassy zur Messung der Thermospannung verwendet. Der sonstige Versuchsablauf ist identisch. Die Messung für Schülerinnen und Schüler kann allerdings ohne Probleme mit einem Digitalthermometer und einem analogen Spannungsmessgerät durchgeführt werden.

Die Messung wurde bei einer Anfangstemperatur von ca. 25 °C gestartet. Nach Einschalten des Keramikstrahlers ergibt sich der zu erwartende Temperaturverlauf, der in einer Gleichgewichtstemperatur von ca. 42 °C mündet. Der langsame Anstieg ist mit dem Aufheizvorgang des Keramikinfrarotstrahlers zu erklären. Die gemessene Thermospannung steigt ebenfalls auf ein Gleichgewichtsniveau an, bis der Strahler seine volle Leistung erreicht hat. Das Natron und die Citronensäure sollten am besten im Verhältnis 3:1 abgewogen und mit Wasser gemischt werden, um eine effiziente Kohlenstoffdioxidproduktion zu gewährleisten. Dies ergibt sich direkt aus der Reaktionsgleichung von Natron (NaHCO_3) mit Citronensäure ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)



Leitet man nun das Kohlenstoffdioxid über den Schlauch in die Dose, so kommt es zunächst zu einem kleinen Abfall der Temperatur um 1 °C, der damit begründet werden kann, dass das eingeleitete CO_2 , was in etwa Raumtemperatur besitzt, kälter als die erwärmte Luft in der Dose ist. Auch die Thermospannung sinkt schlagartig, da das Kohlenstoffdioxid die ankommende Infrarot-Strahlung teilweise absorbiert und anschließend wieder in alle Richtungen emittiert. Die ankommende Strahlungsleistung ist somit im Falle einer CO_2 -gefüllten Dose geringer. Damit das Gas nicht unter Druck in die Dose eingeleitet wird, ist es erforderlich, das Entlüftungsloch zu öffnen. Nach dem Schließen der Schlauchöffnung und des Entlüftungslochs steigt die Temperatur in den folgenden Minuten auf eine neue, um ca. 1,8 K höhere Gleichgewichtstemperatur, während die Thermospannung weiterhin auf dem konstant niedrigeren Niveau bleibt. Die konstant niedrige Thermospannung bezeugt, dass die Dose weiterhin komplett mit CO_2 gefüllt ist.

Grund für den Anstieg der Gleichgewichtstemperatur ist das eingeleitete Kohlendioxid, welches einen Teil der ankommenden Wärmestrahlung absorbiert und somit zu einer Erwärmung des Gases in der Dose führt. Die genauen wissenschaftlichen Hintergründe dazu wurden bereits in Kapitel 2.4 diskutiert. Weitere wissenschaftliche Details wurden von der Universität München in (Scorza et al., 2020) dargestellt: Trotz der wesentlich höheren CO_2 -Konzentration in der Dose (> 100.000 ppm) im Vergleich zur Erdatmosphäre (ca. 408 ppm, siehe Tabelle 2.3) ist nur eine Temperaturdifferenz von ca. 1,5 K beobachtbar, da die Wärme im Modell schnell durch Wärmeleitung über die Dosenwände nach außen abtransportiert wird, wohingegen die Konvektions- und Emissionsprozesse in der Erdatmosphäre sehr langsam ablaufen. Die Temperatur des Strahlers von 600 K konnte verifiziert werden. Das Strahlungsspektrum eines solchen Strahlers (der hier als idealer schwarzer Strahler angenommen wird) kann in Abbildung 2.1 in etwa erahnt werden. Das Maximum der Verteilung lässt sich über das Wiensche Verschiebungsgesetz (siehe Gleichung 2.5) zu 5 μm berechnen. Hier trägt also maßgeblich die 4 μm -Bande zur Absorption

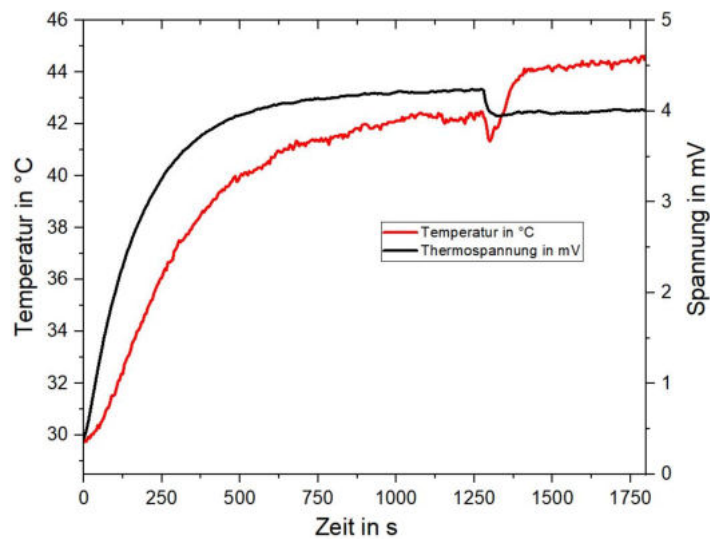


Abbildung 5.2 | Temperatur- und Spannungsverlauf (rot bzw. schwarz) des Modellexperiments. Die Temperatur steigt zunächst bis zu einem Gleichgewichtsniveau an, bis es nach dem Einfüllen des CO₂ einen kurzen Abfall mit einem anschließend schnellen Anstieg auf eine neue Gleichgewichtstemperatur gibt. Die Thermospannung steigt zunächst ebenfalls auf ein konstantes Niveau und sinkt nach Befüllen der Dose auf ein niedrigeres Plateau ab.

bei. Das Spektrum unterscheidet sich somit deutlich von dem der Sonne (in gelb dargestellt), bei der die 15 μm Absorptions-Bande von CO₂ den Hauptanteil zur Absorption von Wärmestrahlung beiträgt, was bereits in Abb. 2.7 diskutiert wurde. In diesem Experiment steht primär die Wirkung von Kohlenstoffdioxid als Treibhausgas im Fokus. Welche Wellen absorbiert werden, spielt also (auch im Hinblick auf den Einsatz in der Schule) keine vordergründige Rolle.

Schwierigkeiten

Obwohl die Ergebnisse des dargestellten Modellversuchs zur Wirkung von Treibhausgasen in dieser Form verlässlich reproduzierbar sind, war die Vorbereitung und Planung mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Zunächst wurde der Versuch mit einer den Maßen entsprechenden Metalldose in gleichem Abstand zum Strahler durchgeführt. Während der anfängliche Temperaturverlauf bis zur Gleichgewichtstemperatur identisch war, konnte nach Einfüllen des Kohlenstoffdioxids nicht der zu erwartende Verlauf (kurzer Abfall mit anschließendem Anstieg auf neue Gleichgewichtstemperatur) gemessen werden. Nach Einleiten des CO₂ kam es stattdessen zu einem kurzen Peak in der Temperatur, der nach kurzer Zeit wieder abflachte, was in Abb. 5.3 zu erkennen ist.

Dabei wurden neben dem selbst hergestellten CO₂ auch reines Kohlenstoffdioxid und sogar Methan aus Gasflaschen verwendet, die ebenfalls ähnliche Messergebnisse lieferten.

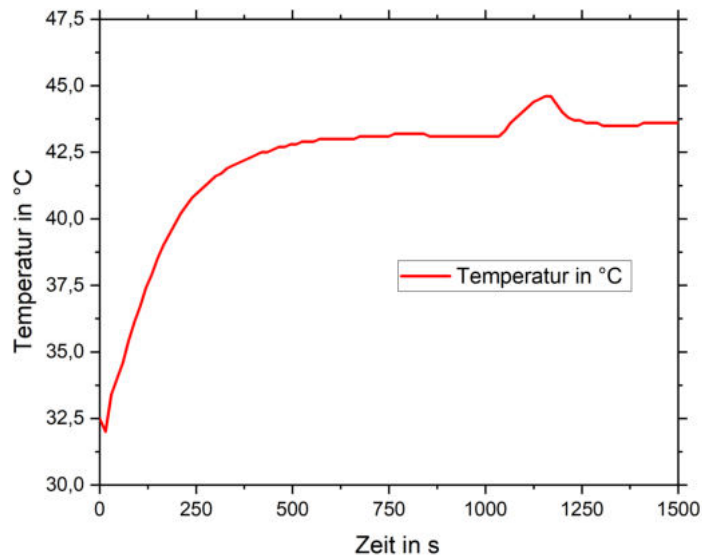


Abbildung 5.3 | Temperaturverlauf in der Metalldose. Nach dem Einleiten des CO_2 ist ein Peak zu beobachten, der allmählich wieder abflacht.

Weiterhin wurde ein CO_2 -Sensor von PASCO in die Dose integriert, um den zeitlichen Verlauf der Kohlenstoffdioxid-Konzentration in der Dose zu untersuchen. Die Analyse ergab, dass innerhalb weniger Sekunden nach Einleiten des CO_2 über den Schlauch die obere Grenze des Messbereichs des Sensors mit 10^5 ppm erreicht war. Während des gesamten restlichen Versuches blieb die Kohlendioxid-Konzentration über dieser Schwelle, was eine mangelnde Dichtheit ausschließt. Um Konvektions- und Wärmeströmungseffekte innerhalb der Dose zu relativieren, wurde im Anschluss die Dose um eine weitere, baugleiche erweitert, sodass neben dem Thermometer und dem CO_2 -Sensor auch noch ein kleiner Ventilator, der eine gleichmäßige Zirkulation des eingefüllten Gases bewirkt, Platz fand. Die Doppeldose ist in Abb. 5.4 zu sehen.

Die Messungen mit Ventilator zeigen, dass der beobachtbare Peak nach Einfüllen des CO_2 verschwindet. Es stellt sich dennoch keine signifikant höhere Gleichgewichtstemperatur ein. Der kurze rapide Anstieg ist also vermutlich auf Wärmeströmungs- bzw. Konvektionseffekte in der Dose zurückzuführen. Eine genaue physikalische Begründung konnte nicht gefunden werden. In Absprache mit Herrn Strähle, Mitentwickler des Experiments und abgeordnete Lehrkraft am Lehrstuhl für Didaktik der Physik an der Ludwig-Maximilians-Universität München, wurde das Material Pappe als geeigneter für die Dose befunden, da weniger Wärmeleitung nach außen stattfindet. Obwohl die theoretisch zu erwartenden Ergebnisse bei Versuchen der Uni München selbst mit der Metalldose auftraten, konnte dies bei meinen Durchführungen nicht bestätigt werden.



Abbildung 5.4 | Zwei Metalldosen, die luftdicht zusammengefügt wurden. In der Doppeldose befindet sich ein CO₂-Sensor sowie ein kleiner Ventilator zur Luftzirkulation. Sie wurde ebenfalls mit Frischhaltefolie beidseitig abgedichtet.

Neben dem Material der Dose spielt auch der Abstand zwischen Dose und Strahler eine entscheidende Rolle. Die Versuchsergebnisse aus Abb. 5.2 konnten nur bei einem Abstand der Pappdose von ca. 8 cm vom Strahler festgestellt werden. Erhöht man den Abstand auf ca. 23 cm, so kommt es zu einem ähnlichen Verlauf, wie die Messung mit der Metalldose zeigt. Abbildung 5.5 verdeutlicht dies. Aufgrund des größeren Abstandes zum Keramikstrahler ist die Gleichgewichtstemperatur im Vergleich zum vorigen Versuch deutlich geringer. Die Thermospannung zeigt den zu erwartenden und bereits diskutierten Verlauf, während der Temperaturverlauf einen bisher nicht zu erklärenden Peak beim Einfüllen des CO₂ aufweist. Als Ursache für den Peak können die mangelnde Dichtheit der Dose, da die Thermospannung nach Befüllen des Gases konstant gering bleibt (beim Entweichen des Kohlendioxids müsste die Thermospannung allmählich steigen) sowie die Temperatur des erzeugten Gases, die bei Raumtemperatur liegt, ausgeschlossen werden. Eine physikalische Erklärung für den Verlauf des Graphen bleibt offen. Offene Fragen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt wurden, sind, inwieweit andere Materialien, weitere Abstände oder die Länge der Dose einen Einfluss auf das Messergebnis haben.

Didaktische Erläuterung und Hinweise für Lehrkräfte

Zunächst erfolgt eine Einordnung des Experiments in das Facettenmodell. Kernkomponente dieses Versuches ist das kontinuierliche Aufnehmen von Messdaten und eine korrekte Versuchsdurchführung. Die Schülerinnen und Schüler lernen, Messwerte sauber und

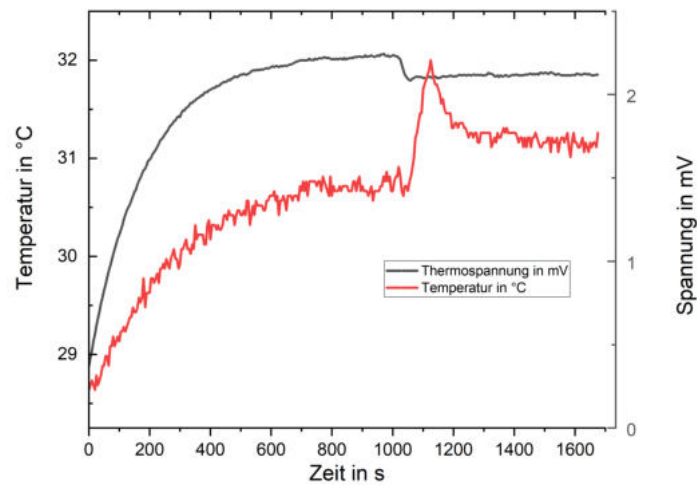


Abbildung 5.5 | Temperatur- und Spannungsverlauf (rot bzw. schwarz) des Modellexperiments im Abstand von 23 cm. Die Temperatur steigt wieder bis zu einem Gleichgewichtsniveau an. Während des Einfüllens kommt es zu einem starken Peak mit anschließendem Abflachen auf eine neue Gleichgewichtstemperatur. Diese liegt nur ca. 0,3 °C über der ursprünglichen.

übersichtlich in Tabellen einzutragen sowie sorgfältiges und genaues Arbeiten beim Erzeugen und Einleiten von CO₂. Die Teilkompetenz *Beobachten/Messen/Dokumentieren* wird daher mit 2 gewichtet. Daneben spielt die Datenaufbereitung eine große Rolle, da die Schülerinnen und Schüler die Messwerte in der letzten Aufgabenstellung graphisch darstellen und während des Versuches aus ihren aufgenommenen Temperaturwerten Werte der Gleichgewichtstemperaturen herauslesen sollen. Die Teilkompetenz *Daten aufbereiten* wird somit mit 1 bewertet. Da der Versuch schon von der Lehrkraft geplant und aufgebaut wurde und die Schülerinnen und Schüler in den Aufgabenstellungen auch keine Hypothesen oder Fragestellungen entwickeln sollen, werden diese vier Teilkompetenzen mit 0 gewichtet. In den letzten Aufgabenstellungen, in denen die Schülerinnen und Schüler den Einfluss von CO₂ auf das System diskutieren und die einzelnen Modellkomponenten auf die reale Umwelt übertragen sollen, wird die Teilkompetenz *Schlüsse ziehen/diskutieren* verlangt und somit im Modell mit der Stufe 2 gewichtet.

Die Lehrkraft selbst kann entscheiden, inwieweit der Versuch variiert werden soll. So kann zum Beispiel unter Vorgaben der Lehrkraft der Aufbau des Versuches, der aus dem Bohren von Löchern, Abdichten der Dose mit Frischhaltefolie und Befestigung auf einer Holzvorrichtung besteht, auch von Schülerinnen und Schülern übernommen werden, was eine Einstufung in die Teilkompetenz *Versuch funktionsfähig aufbauen* zur Folge hätte. Eine eigenständige Planung eines Modellexperiments ist in der 9. Jahrgangsstufe allerdings nicht sinnvoll.

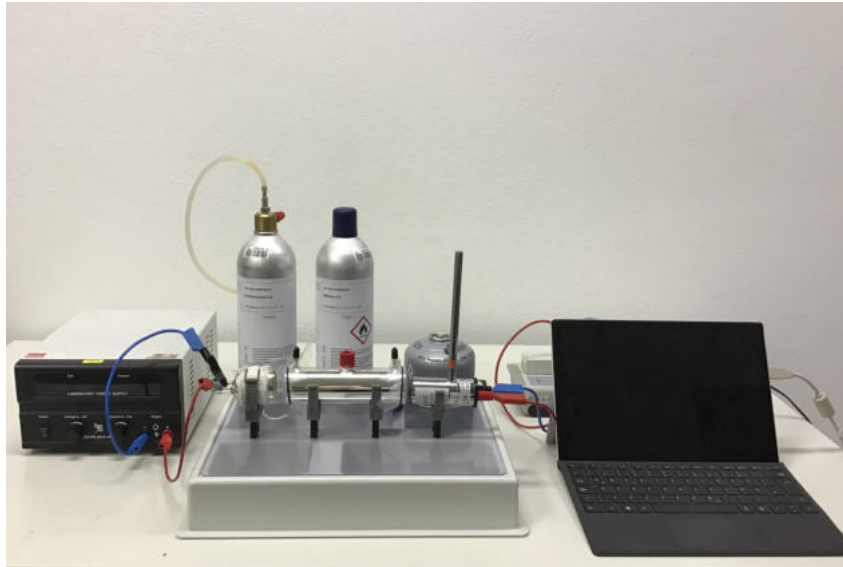


Abbildung 5.6 | Demonstrationsexperiment zum Treibhauseffekt von LD Didactic. Die Heizspule, die mit Wolle zum Verbrennungsschutz ummantelt ist, wird an ein Gleichspannungsnetzgerät über zwei Klemmen angeschlossen. Die Metallröhre wird auf beiden Seiten mit Folie und Gummiringen abgedichtet. Über die vordere Öffnung der Röhre können über einen Schlauch verschiedene Gase (hier: Kohlenstoffdioxid, Methan, Butan-Propan-Gemisch) eingefüllt werden, während die hintere Öffnung der Entlüftung dient. Ans Ende der Röhre wird eine Thermosäule nach Moll montiert. Der Verlauf der Thermospannung wird dann über Casy gemessen.

Da der Versuch aufgrund der langen Einstellzeit der Gleichgewichtstemperatur sehr lange dauert, ist zu überlegen, ob der Keramikstrahler schon vorher angeschaltet wird, um den langen Aufheizvorgang zu überbrücken. Auch bleibt es der Lehrkraft überlassen, ob der Versuch mit einem Digitalthermometer durchgeführt werden soll und die Messwerte somit per Hand notiert werden oder ob computergesteuerte Messwernerfassungssysteme wie Casy oder PASCO zum Einsatz kommen sollen. Um den Versuch für alle Schulen und Klassen gleichermaßen zugänglich zu gestalten sowie das manuelle Dokumentieren und graphische Analysieren zu fördern, wird empfohlen, den Versuch ohne den Einsatz von Computern durchzuführen. Der Versuch kann auch mehrfach hergestellt werden und von verschiedenen Schülergruppen gleichzeitig durchgeführt werden. Es handelt sich bis auf die Thermosäule (die nicht essentiell für den Versuch ist) um Haushaltsmaterialien, sodass ein kostengünstiger und schneller Aufbau möglich ist. Das gemeinsame Aufbauen mehrerer Exemplare kann auch im Klassenverbund erfolgen. Da das Experiment den Kernversuch des Experimentierzirkels darstellt, ist zu überlegen, ob jede Gruppe im Anschluss an die vorangegangenen Experimente am Ende ein eigenes Exemplar zum Experimentieren zur Verfügung gestellt bekommt. Der Versuch bietet sich als Abschlussexperiment an, da in den übrigen Versuchen, die keiner expliziten Reihenfolge bedürfen, wichtige Grundlagen

der Wärmelehre aufgegriffen werden und auf einzelne Modellkomponenten des Dosenexperiments wie die Wärmestrahlung oder den natürlichen Treibhauseffekt eingegangen wird. Voraussetzung hierfür ist allerdings, wie eingangs erwähnt, das Bereitstellen mehrerer Versuchsaufbauten.

Alternative Experimente

In verschiedenen Foren und Plattformen kursieren Experimente, die zum Ziel haben, die Wirkung von CO_2 als Treibhausgas zu zeigen. Viele davon zeigen allerdings oft nur Nebeneffekte, die nicht auf dem tatsächlichen Absorptionseffekt von Kohlendioxid beruhen. Das bekannteste Experiment ist ein Becherglasversuch, bei dem zwei gleich große Becher, in denen sich zwei schwarze Pappböden befinden, gleichmäßig von einem Halogenstrahler mit kontinuierlichem Spektrum beleuchtet werden. Es werden die Temperaturen in beiden Bechern gemessen und auch hier gewartet, bis sich eine Gleichgewichtstemperatur einstellt. Anschließend wird in einen Becher CO_2 gefüllt, während der andere luftgefüllt bleibt. Es kommt zu einem raschen Temperaturanstieg, der allerdings nicht primär auf die Absorption von Wärmestrahlung durch CO_2 zurückzuführen ist, sondern vielmehr auf einen Wärmestau, der im Becher entsteht. Die ursprüngliche Gleichgewichtstemperatur stellt sich ein, da sich permanent warme Luft im Becher im Austausch mit kalter Luft außerhalb des Bechers befindet. Da das eingefüllte CO_2 nun eine höhere Dichte als Luft besitzt, kann es den Becher zunächst nicht verlassen. Das warme Gas ist also im Becher gefangen. Dies hat einen starken Temperaturanstieg zur Folge.

Ein Experiment, das die Wirkung von Treibhausgasen zuverlässig zeigt, wurde von LD Didactic entwickelt und wird in deren Katalog zum Kauf angeboten. Der Versuch zum Treibhauseffekt, dargestellt in Abb. 5.6, misst über eine Thermosäule die ankommende Wärmestrahlung, die von einem IR-Strahler aus durch eine Messküvette gesendet wird. Dabei ist es möglich über die vordere Öffnung verschiedene Gase in die Röhre zu leiten und diese über eine Vakuumpumpe wieder zu entleeren. Die Messwertaufnahme erfolgt über Cassy. Das Ergebnis einer exemplarischen Durchführung mit verschiedenen Gasen ist in Abbildung 5.7 zu sehen. Während das Gemisch aus 80% Butan und 30% Propan die stärkste Absorption der vom Strahler ausgehenden Wärmestrahlung aufweist, sinkt die Thermospannung bei Kohlenstoffdioxid und Methan nur auf etwa 90% des Ausgangswertes von Luft. Der nur geringe Unterschied zwischen Methan und Kohlenstoffdioxid resultiert vermutlich aus dem Strahlungsspektrum der Heizspirale, welche die unterschiedlichen Absorptionsbanden von CO_2 und Methan in gleichem Maße trifft. Eine genaue Analyse dieser Beobachtung wurde im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht durchgeführt. Es ist bei der Durchführung darauf zu achten, dass es nach dem Befüllen der Gase eine kurze

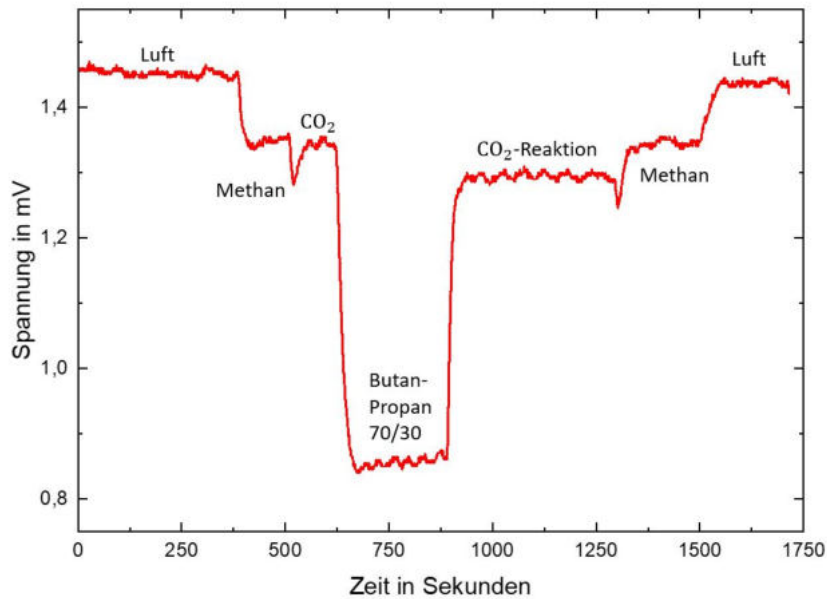


Abbildung 5.7 | Verlauf der Thermospannung unter Einfluss verschiedener Gase. Während das Butan-Propan-Gemisch die Thermospannung auf ca. 50% des Ausgangswertes reduziert, ist die Absorption durch CO_2 und Methan relativ gering.

Zeit dauert, bis sich die Thermospannung auf ein konstantes Niveau einpendelt. Der Versuch kann auch mit anderen Gasen, z.B. Edelgasen, durchgeführt werden. Für eine schöne Darstellung empfiehlt es sich, abwechselnd stark und weniger stark absorbierende Gase zu verwenden.

5.2 Versuch: Grundlagen zur Wärmestrahlung

Im Schülerexperiment zu den Grundlagen zur Wärmestrahlung lernen die Schülerinnen und Schüler Infrarot-Strahlung kennen, indem sie mithilfe einer Wärmebildkamera ihre Umgebung beobachten und verschiedene Materialien auf IR-Durchlässigkeit prüfen.

Aufbau und Durchführung

Die Materialien des Versuches, zu sehen in Abbildung 5.8, umfassen eine FLIR ONE Wärmebildkamera der Firma TELEDYNE FLIR, die an den Lightning-Connector eines iPads angeschlossen wird, eine schwarze Metalldose, ein Wasserkocher, Schutzhandschuhe und verschiedene dünne Materialien (Glas, Acrylglas, Styropor, Papier, durchsichtige bzw. schwarze Plastiktüte, Frischhaltefolie, Luftballon). Soll anstelle eines iPads ein Android-Gerät verwendet werden, kann eine entsprechende Wärmebildkamera mit USB-C Anschluss genutzt werden.



Abbildung 5.8 | Versuchsaufbau zum Grundlagenversuch zur Wärmestrahlung. Zu sehen sind neben der Wärmebildkamera und dem iPad die verschiedenen Materialien, die auf IR-Durchlässigkeit zu überprüfen sind sowie eine schwarze Metalldose, die als Wärmequelle dient.

Die Schülerinnen und Schüler öffnen zunächst die App FLIR ONE auf dem iPad und schalten die Wärmebildkamera ein. Nach ca. 20 Sekunden Ladevorgang ist das von der FLIR-Kamera erzeugte Falschfarbenbild, das die thermische Abstrahlung von Objekten in der Umgebung in verschiedene Farben übersetzt, zu sehen. Während sich die Schülerinnen und Schüler im Raum umschaun und sich mit der Kamera vertraut machen, wird Wasser im Wasserkocher erhitzt und anschließend mithilfe der Sicherheitshandschuhe in die schwarze Dose gefüllt. Zunächst werden kleine Beobachtungsaufgaben durchgeführt. Die Schülerinnen und Schüler sollen erkennen, dass Brillengläser IR-Strahlung blockieren und ein Handabdruck auf dem Tisch noch Sekunden nach Entfernen der Hand über die Infrarot-Kamera zu sehen ist. Die jeweiligen Beobachtungen werden notieren. Der nächste Versuchsteil, in dem die Schülerinnen und Schüler mit der Wärmebildkamera ein Waschbecken betrachten sollen, in das zunächst kaltes und dann warmes Wasser läuft, verdeutlicht die subjektive Farbskala des Falschfarbenbildes, das sich an bestimmte Referenzwerte orientiert. Das Waschbecken wird im ersten Fall als warm und somit orange dargestellt, während es bei warmen Wasserzufluss kalt und somit bläulich erscheint, obwohl sich die tatsächliche Temperatur nur geringfügig ändert. Anschließend steckt ein Schüler oder eine Schülerin ihren Arm in die schwarze Mülltüte, während der Rest der Gruppe das erzeugte Bild auf dem iPad betrachtet. Die Beobachtungen werden jeweils notiert.

Im letzten Versuchsteil werden die bereitgelegten Materialien auf IR-Durchlässigkeit

überprüft, indem sie in gleichem Abstand vor die mit heißem Wasser befüllte schwarze Metalldose gehalten und über die FLIR-Kamera betrachtet werden. Die Ergebnisse der Beobachtungen werden wiederum notiert.

Ergebnisse und fachlicher Hintergrund

Das Falschfarbenbild der Wärmebildkamera zeigt bei der Betrachtung von Personen mit Brille, dass Brillenglas die vom Körper ausgehende Wärmestrahlung blockiert. Beim Handflächenversuch hingegen ist noch mehrere Sekunden nach dem Aufdrücken der Hand auf den Tisch der Handabdruck zu sehen, da eine Wärmeleitung von der warmen Hand auf den kalten Tisch stattgefunden hat. Der Waschbeckenversuch verdeutlicht die Funktions- und Darstellungsweise der FLIR-Kamera. Die Wärmebildkamera übersetzt die Leistung der ankommenden Strahlung im infraroten Bereich in ein Falschfarbenbild, dessen Farben auch in der App variiert werden können. Die ankommende Strahlungsleistung wird dann in eine Temperatur übersetzt, sodass auch eine Temperaturmessung möglich ist. Dabei ist allerdings zu beachten, dass Temperaturmessungen von Objekten mit sehr unterschiedlichen Emissionsgraden sehr stark variieren können, da die Wärmebildkamera standardmäßig mit einem voreingestellten Emissionsgrad von $\epsilon = 0.95$ operiert, der nur dem von matten Objekten gut entspricht. Die Problematik der Temperaturmessung mit Infrarotkameras wird in Abschnitt 5.3 noch einmal aufgegriffen. Im Falle des Waschbeckens kommen so zwei sehr unterschiedliche Bilder zustande, was in Abb. 5.9 zu sehen ist. Obwohl die Temperatur der Umgebung in beiden Fällen die gleiche ist, wird sie aufgrund der veränderten Farbskala unterschiedlich dargestellt. Als Referenzpunkte in der App werden in der verwendeten Farbskala der heißeste Punkt als hellgelb und der kälteste Punkt als lila bzw. schwarz dargestellt.

Das Resultat des Versuchsteils mit der Mülltüte ist in Abb. 5.10 zu sehen. Während der Arm mit dem bloßen Auge nicht zu sehen ist, kann man ihn mithilfe der Wärmebildkamera über seine ausgehende Wärmestrahlung sichtbar machen. Dies zeigt, dass eine schwarze Mülltüte für Infrarotstrahlung, die von einem ca. 35 °C warmen Körper ausgeht, durchlässig ist.

Beim Überprüfen der übrigen Materialien auf die Durchlässigkeit von Wärmestrahlung wird als Wärmequelle eine mit heißem Wasser befüllte, schwarze Metalldose verwendet, die einen schwarzen Strahler simuliert. Da die Strahlungsleistung der Dose zeitlich relativ konstant bleibt, eignet sie sich gut für den Versuch. Die Schülerinnen und Schüler stellen fest, dass Materialien wie Styropor, Glas, Acrylglas und Papier die ankommende Wärmestrahlung blockieren, wohingegen Frischhaltefolie, die Plastiktüte sowie ein aufgeblasener Luftballon einen Großteil der Strahlung durchlassen. Abb. 5.11 zeigt exempla-

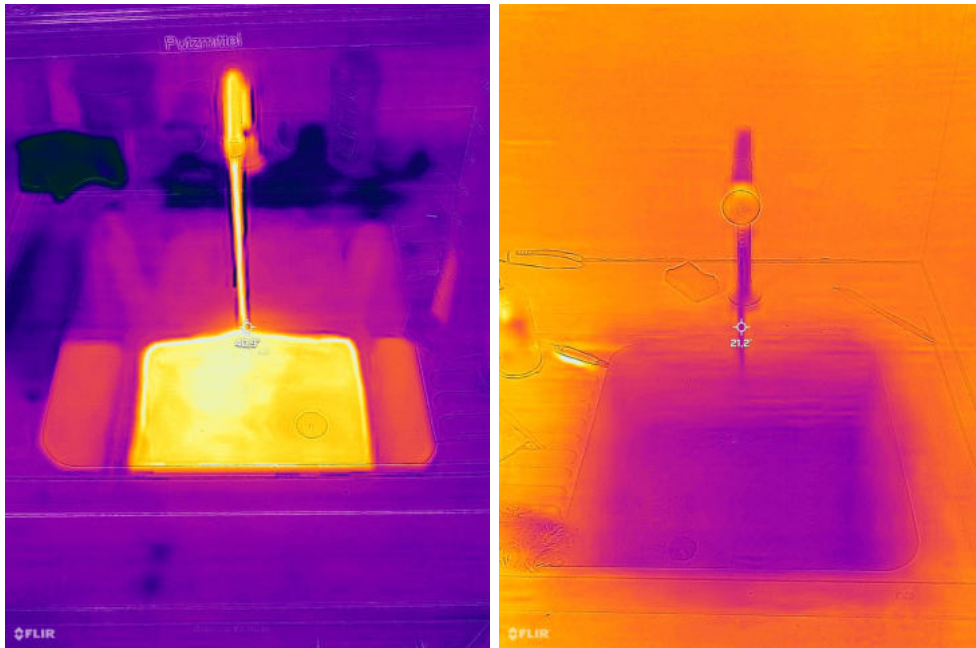


Abbildung 5.9 | Waschbecken, in das heißes (links) und kaltes Wasser (rechts) läuft. Die Umgebung wird im ersten Fall lila und zweiten Fall orange angezeigt, obwohl sich die Temperatur nicht ändert.



Abbildung 5.10 | Aufnahme eines Unterarms in einer schwarzen Mülltüte mit und ohne Wärmebildkamera.

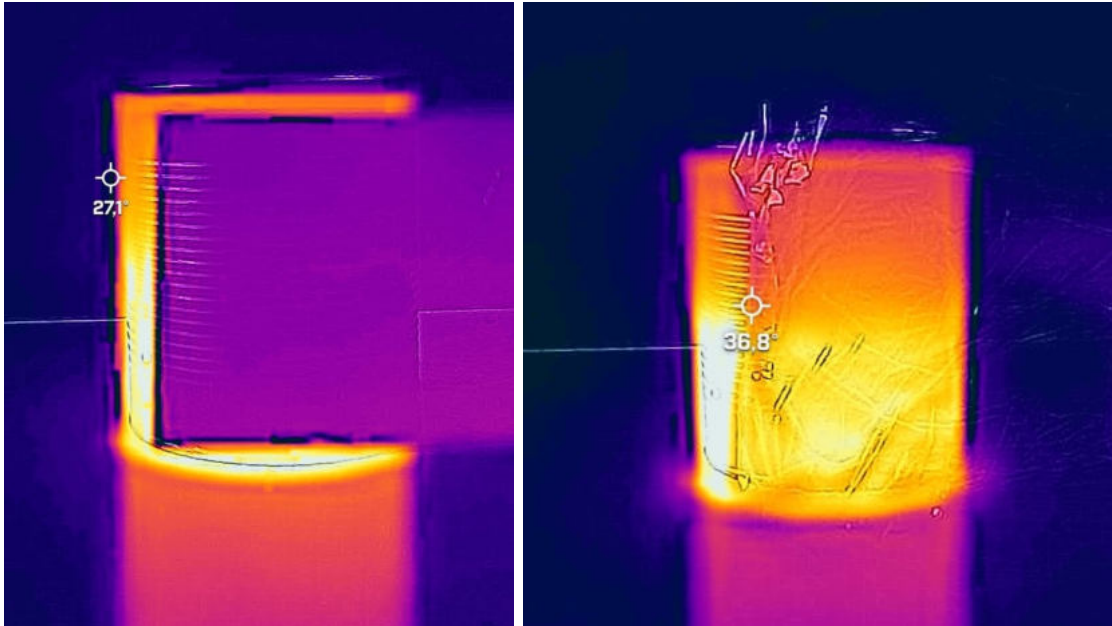


Abbildung 5.11 | Während Plexiglas die Wärmestrahlung von der heißen Dose abschirmt, wird der Großteil der Infrarotstrahlung durch Frischhaltefolie durchgelassen.

risch eine Aufnahme in der einmal Glas und einmal eine Plastiktüte vor die Dose gehalten wurde.

Didaktische Erläuterung und Hinweise für Lehrkräfte

Schwerpunkt dieses Experimentes ist das Beobachten und Dokumentieren von Effekten der Wärmestrahlung, die mit der FLIR-Kamera zu sehen sind. Daher wird die experimentelle Teilkompetenz *Beobachten/Messen/Dokumentieren* mit 2 gewichtet. Da von den Schülerinnen und Schülern Elemente des Versuch selbst vorbereitet und aufgebaut werden müssen, wie z.B. das Befüllen der Dose mit heißem Wasser und das richtige Vergleichen der Materialien bezüglich ihrer Durchlässigkeit, wird die Teilkompetenz *Versuch funktionsfähig aufbauen* noch mit 1 bewertet. Im Versuchsteil, in dem das Waschbecken Einsatz findet, wird in der Aufgabenstellung explizit zur Diskussion angeregt, wie die App die Falschfarben wählt, wohingegen beim Materialienvergleich vor dem Versuch eine begründete Vermutung gefordert wird, welche der Gegenstände von Infrarot-Strahlung durchlässig sind. Daher werden die beiden Teilkompetenzen *Schlüsse ziehen/diskutieren* und *Vermutung/Hypothese aufstellen* mit der Stufe 1 gewichtet. Da weder eine Fragestellung entwickelt, Daten aufbereitet noch das Experiment selbstständig geplant werden sollen, werden die entsprechenden drei Teilkompetenzen mit 0 eingestuft.

Als Lehrkraft ist bei diesem Versuch darauf zu achten, dass im Vorfeld in der FLIR ONE App die richtigen Einstellungen gewählt werden. Der Emissionsgrad muss auf mat-

te Gegenstände eingestellt sein. Außerdem sollte bei der Farbwahl die Option *Eisenbleich* gewählt werden, die eine kontrastreiche Darstellung der Wärmesignaturen gewährleistet. Die Wärmebildkamera verfügt zusätzlich über eine normale Kamera im optischen Bereich. Somit können beide Bilder überlagert werden, was zu einer deutlicheren Darstellung der Konturen der Objekte im Wärmebild führt. Aufgrund des Parallaxenfehlers, der entsteht, da die beiden Kameras untereinander angeordnet sind, muss regelmäßig die Überlagerung des optischen Bildes mit dem Wärmebild in der App neu kalibriert werden. Des Weiteren kann für eine Temperaturmessung ein fester Messpunkt in der Mitte des Bildes eingestellt werden. Es können allerdings auch manuell neue Messpunkte im Bild gewählt werden. Zur besseren Bildaufnahme empfiehlt sich ein Stativ mit Tablet-Halterung. Bei den zu untersuchenden Materialien kann beliebig variiert werden. Es empfiehlt sich zur besseren Vergleichbarkeit auf eine ungefähr gleiche Materialdicke zu achten. Aufgrund der Verbrennungsgefahr ist unbedingt darauf zu achten, dass die Metalldose nur mit Sicherheitshandschuhen bewegt wird.

5.3 Versuch: Leslie-Würfel

Im Experiment zum Leslie-Würfel untersuchen die Schülerinnen und Schüler die thermische Abstrahlung von verschiedenen Oberflächen mit der Wärmebildkamera.

Aufbau und Durchführung

Hauptbestandteil des Versuches ist ein sogenannter *Leslie-Würfel*, der nach dem englischen Physiker John Leslie benannt ist. Dabei handelt es sich um einen hohlen Metallwürfel, dessen vier Seiten jeweils unterschiedliche Oberflächen besitzen - eine weiße, eine schwarze, eine metallisch matte und eine metallisch verspiegelte. Auf der Oberseite hat der Würfel eine Öffnung mit der über einen Trichter heißes Wasser, was zuvor im Wasserkocher erhitzt wurde, eingefüllt werden kann. Mithilfe des Digitalthermometers kann die Wassertemperatur im Inneren fortlaufend überprüft werden. Nachdem die Schülerinnen und Schüler begründete Hypothesen aufgestellt haben, welche der Oberflächen am meisten und welche am wenigstens Wärme abstrahlt, werden die Seitenflächen des Würfels nacheinander über die Wärmebildkamera betrachtet, die von der Wärmebildkamera angezeigte Oberflächentemperatur notiert und anschließend mit einem PeakTech 5110 Digital-Thermometer mit Temperaturfühler überprüft.



Abbildung 5.12 | Materialien zum Leslie-Würfel-Versuch. Zu sehen ist auch eine selbst präparierte Dose, die ebenfalls für das Experiment verwendet werden kann.

Ergebnisse und fachlicher Hintergrund

Betrachtet man die verschiedenen Seitenflächen des Würfels mit der Wärmebildkamera, so stellt man fest, dass die ausgehende Strahlung von der Oberfläche abhängig ist. Während die matte Seite nur wenig Infrarot-Strahlung emittiert, strahlt die verspiegelte Fläche so gut wie keine Wärme ab. Die schwarz und weiß lackierten Seiten emittieren Wärmestrahlung in etwa gleichem Maße. Abb. 5.13 zeigt exemplarisch die verspiegelte und schwarze Seite zum Vergleich. Das Infrarot-Thermometer zeigt bei der schwarzen und weißen Seite in etwa die Temperatur an, die auch das Wasser im Inneren besitzt. Bei den metallischen Seiten hingegen werden niedrige Temperaturen im Bereich der Raumtemperatur gemessen. Nimmt man die Oberflächentemperaturen hingegen über den Temperaturfühler des PeakTech Thermometers auf, so weisen alle Seitenflächen in etwa die gleiche Temperatur auf.

Erklärung für die starken Differenzen in der Strahlungsleistung der einzelnen Seiten gibt das Kirchhoff'sche Strahlungsgesetz. Es besagt, dass ein Körper im thermischen Gleichgewicht bei einer festen Wellenlänge in gleichem Maße Wärme emittiert wie er absorbiert. Im Falle dieses Experiments befindet sich der Körper aufgrund der nahezu konstanten Wassertemperatur im thermischen Gleichgewicht. Da verspiegelte Flächen allerdings einen sehr hohen Reflexionsgrad haben und somit schlecht Strahlung absorbieren, geht von dieser Seitenfläche auch nur wenig bis keine Wärmestrahlung aus. Die matte Seite scheint einen etwas höheren Absorptionsgrad zu besitzen, da von ihr mehr Strahlung emittiert

Tabelle 5.1 | Emissionsgrade verschiedener Materialien bei entsprechender Körpertemperatur. Die Emissionsgrade geben zu erkennen, dass bei einer Temperatur von ca. 80 °C weiße und schwarze Oberflächen in etwa gleich stark Wärmestrahlung emittieren. Der Emissionsgrad der matten Seite entspricht in etwa dem von hochpoliertem Aluminium. Für die verspiegelte Seite kann näherungsweise ein Wert angenommen werden, der zwischen dem eines verchromten Körpers der Temperatur 40 °C bzw. 150 °C liegt. Alle Daten wurden entnommen aus (InfracorTec Systems, 2011).

Material (Materialtemperatur)	Emissionsgrad (%)
Lack, weiß (90 °C)	0,95
Lack, schwarz (80 °C)	0,97
Aluminium, hochpoliert (100 °C)	0,09
Chrom (40 °C)	0,08
Chrom, poliert (150 °C)	0,06

wird als von der reflektierenden. Die weiße und schwarze Seite hingegen besitzen bei einer Temperatur von etwa 100 °C in etwa den gleichen Emissionsgrad, was aus Tabelle 5.1 hervorgeht und werden daher auf der Wärmebildkamera in etwa gleich dargestellt. Dies widerspricht im ersten Augenblick der alltäglichen Beobachtung, dass schwarze Flächen (wie z.B. Autositze) Licht besser absorbieren als weiße. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass es sich im Gegensatz zum Leslie-Würfel um Strahlung im sichtbaren und nicht im infraroten Wellenlängenbereich handelt.

Da das in der Wärmebildkamera integrierte Infrarot-Thermometer nur die eintreffende Strahlung misst und diese in eine Temperatur übersetzt, kann es die Oberflächentemperaturen der matten und verspiegelten Seite nicht korrekt wiedergeben. Die standardmäßige Einstellung in der Software der FLIR-Kamera entspricht einem Emissionsgrad von 0,95, der für die schwarz und weiß lackierte Seite gut geeignet ist. Der Infrarotsensor nimmt in etwa die tatsächliche emittierte Strahlung auf und kann daher die korrekte Oberflächentemperaturen für diese Seitenflächen angeben. Will man mit der Wärmebildkamera auch die Temperatur der beiden anderen Seiten näherungsweise bestimmen, so muss man den Emissionsgrad in den Einstellungen manuell auf 0,30 ändern. Dies empfiehlt sich in diesem Fall allerdings nicht, da nur aus vier vorgewählten Emissionsgraden gewählt werden kann und diese somit nicht optimal auf die entsprechenden Seiten eingestellt werden können. Für eine vergleichbare Messung der Oberflächentemperatur wird ein Digitalthermometer der Firma PeakTech mit geeignetem Temperaturfühler verwendet. Über diesen lässt sich verifizieren, dass alle Oberflächen in etwa die gleiche Temperatur besitzen.



Abbildung 5.13 | Das Wärmebild zeigt die Abstrahlung der schwarzen und verspiegelten Seite des Leslie-Würfels. Die gemessene Oberflächentemperatur von 39,2 °C stimmt nicht mit der tatsächlichen überein, da der eingestellte Emissionsgrad für den Infrarot-Sensor nicht für die polierte Seite geeignet ist.

Didaktische Erläuterung und Hinweise für Lehrkräfte

Im Mittelpunkt des Experimentes stehen die Hypothesen, die die Schülerinnen und Schüler in Bezug auf die Wärmeabstrahlung der jeweiligen Seiten abgeben und im Anschluss überprüfen sollen. Es ist wieder darauf zu achten, dass die Schülerinnen und Schüler ihre Vermutung begründen und nicht raten. Eine begründete Vermutung könnte z.B. sein: *Die schwarze Seite strahlt stärker als die weiße, weil sich schwarze Flächen in der Umwelt auch schneller erwärmen* oder *Die matte Seite strahlt am stärksten, da Metall gut Wärme leitet*. Die entsprechende experimentelle Teilkompetenz wird daher mit der Stufe 2 gewichtet. Da nur einzelne Temperaturmessungen durchgeführt und Wärmebilder betrachtet werden müssen, wird die Teilkompetenz *Beobachten/Messen/Dokumentieren* mit Stufe 1 bewertet. Ebenfalls Stufe 1 erhält die Teilkompetenz *Schlüsse ziehen/diskutieren*. Sowohl bei der Aufstellung der Hypothesen als auch bei der Überprüfung sollen die Schülerinnen und Schüler in der Gruppe argumentieren als auch bei der Expertenfrage, in der die Strahlungsintensitäten der weißen und schwarzen Fläche aufgegriffen werden. Die übrigen drei experimentellen Teilkompetenzen werden nicht abverlangt und somit mit 0 gewichtet.

Als Lehrkraft ist darauf zu achten, dass beim Einfüllen des heißen Wassers in den Leslie-Würfel Sicherheitshandschuhe getragen werden. Des Weiteren darf der Würfel auch nur mit Sicherheitshandschuhen berührt werden, um ihn beispielsweise zu drehen. Anstelle

eines Leslie-Würfels kann auch eine herkömmliche metallische Dose verwendet werden, die zu einem Drittel blank poliert ist, zu einem Drittel schwarz und zum letzten Drittel weiß lackiert ist. Eine entsprechende Dose ist ebenfalls in Abb. 5.12 zu sehen. Für das Aufnehmen der Wärmebilder empfiehlt es sich, das iPad mit Kamera in ein passendes Stativ zu integrieren. Dies ermöglicht eine äquidistante Bildaufnahme und Temperaturmessung. Ist keine Wärmebildkamera vorhanden, kann der Versuch auch mit einer Thermosäule nach Moll durchgeführt werden. Hierbei wird die ausgehende Wärmestrahlung wieder in eine Thermospannung übersetzt, die dann verglichen werden kann. Für eine anschaulichere Darstellung empfiehlt sich allerdings eine Wärmebildkamera. Für die erste Messung der Oberflächentemperaturen kann anstatt der Kamera selbst alternativ auch ein digitales Infrarotthermometer verwendet werden. Für die Kontrollmessung ist es entscheidend, ein passendes Digitalthermometer zu wählen. Ein einfaches Küchenthermometer ist nicht geeignet, da es zu viel Wärme über den Metallstab ableitet und zu träge ist, um hohe Temperaturen präzise zu messen. Für den Versuch als zufriedenstellend erwiesen hat sich im Gegensatz dazu das Digitalthermometers PeakTech 5110, das über einen Temperaturfühler, der auch mit Temperatursensoren von Cassy kompatibel ist, ohne große Verluste durch Wärmeleitung die Oberflächentemperaturen auf allen Seiten auf in etwa den gleichen Wert verifizieren kann. Die Temperaturen der Seitenflächen entsprechen dennoch nicht ganz der des Wassers im Innern, da es trotzdem zu Verlusten bei der Messung kommt. Da bei diesem Versuch entscheidend ist, dass alle Oberflächen gleich warm sind, muss dieser Nebeneffekt nicht unbedingt mit den Schülerinnen und Schülern diskutiert werden.

5.4 Versuch: Natürlicher Treibhauseffekt und Albedo

In diesem Experiment lernen die Schülerinnen und Schüler den natürlichen Treibhauseffekt kennen, der mithilfe einer Halogenlampe und einem Glasgefäß simuliert wird. Daneben werden das Rückstrahlvermögen von zwei unterschiedlich gefärbten Reagenzgläsern, die mit Wasser gefüllt sind, untersucht und Rückschlüsse auf die Erdoberfläche geschlossen.

Aufbau und Durchführung

Der Versuch ist zweigeteilt und besteht aus einem Versuchsteil zum natürlichen Treibhauseffekt und einem Teil über die Albedo. Für ersteren wird ein 100 Watt Halogenstrahler mithilfe eines Stativs in einem Abstand von ca. 70 cm so über einer Styroporplatte mit aufgeklebter schwarzer Pappe montiert, dass die Fläche gleichmäßig beleuchtet wird, wie



Abbildung 5.14 | Versuchsaufbau zum natürlichen Treibhauseffekt. Die schwarze Pappe wurde auf einem Styropor-Untergrund befestigt und wird in genügend großem Abstand gleichmäßig vom Halogenstrahler beleuchtet.

in Abb. 5.14 zu sehen ist. Auf das Stück Pappe werden zwei baugleiche Digitalthermometer platziert, wobei sich eines unter einem durchsichtigen Glas befindet. Es werden die Temperaturen der beiden Thermometer in einem Abstand von 30 Sekunden fortlaufend gemessen. Im zweiten Versuchsteil bestrahlt ein 500 Watt Baustrahler zwei mit Wasser gefüllte Reagenzgläser, von denen eines mit schwarzer, das andere mit weißer Farbe lackiert wurde. Der Strahler befindet sich in ca. 50 cm Abstand. Die Temperatur in den Reagenzgläsern wird alle 60 Sekunden durch ein digitales Thermometer der Firma Leybold abgelesen. Der Aufbau ist in Abb. 5.15 zu sehen.

Ergebnisse und fachlicher Hintergrund

Beim Versuch zum natürlichen Treibhauseffekt steigt die Lufttemperatur im Glas deutlich schneller als außerhalb. Nach 10 Minuten ist eine Temperaturdifferenz von 1,4 °C zu beob-



Abbildung 5.15 | Versuchsaufbau zum Rückstrahlvermögen. Ein schwarzes und ein weiß lackiertes Reagenzglas, das jeweils mit Wasser befüllt ist, werden von einem Baustrahler angestrahlt. Die Temperatur wird dabei digital über zwei Fühler gemessen.

achten, die bei 30 Minuten schon $4,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt. Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich kann ungehindert das Glas passieren und trifft auf die schwarze Oberfläche. Dort wird die Strahlung absorbiert und als Wärmestrahlung wieder emittiert. Da das Glas allerdings diese von der Pappe ausgehende Wärmestrahlung nicht passieren lässt, bleibt sie im Glas gefangen und sorgt im Vergleich zum Fall ohne Glas für eine schnellere Erwärmung. Das Glas im Modell stellt die Atmosphäre in der Realität dar. Dort wird ein Teil der von der Erde ausgehenden Wärmestrahlung durch Treibhausgase absorbiert und wieder in Richtung Erde reemittiert, was zu einer Gleichgewichtstemperatur von $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ führt. Die genauen physikalischen Hintergründe hierfür wurden bereits in Kapitel 3.1 erläutert. Beim Versuch zum Rückstrahlvermögen ist deutlich zu erkennen, dass sich das Wasser im schwarzen Reagenzglas schneller erwärmt als im weißen. Grund hierfür ist, dass dunkle Oberflächen sichtbares Licht besser absorbieren als helle, was zu einer stärkeren Erwärmung des schwarzen Reagenzglases führt, da es das sichtbare Licht in Wärmestrahlung umwandelt. Diese gelangt auch ins Innere des Glases und das Wasser wird wärmer. Von diesem Experiment können direkt Rückschlüsse auf die Umwelt gezogen werden, wenn man das weiße Reagenzglas mit eisbedeckten Meeresflächen und das schwarze mit eisfreien Flächen identifiziert. Ein Schmelzen von Eisflächen und Gletschern und das damit verbundene Freilegen von Oberflächen mit höherer Albedo sorgt also auch für eine stärkere Erwärmung der Erde.

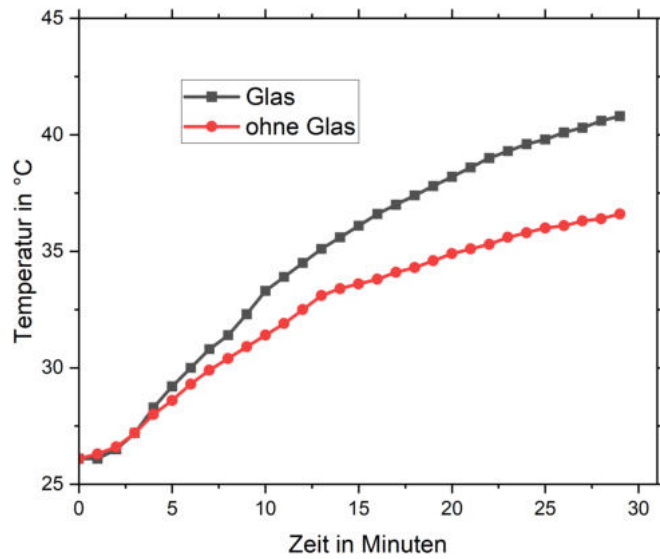


Abbildung 5.16 | Temperaturverlauf mit Glas und ohne. Da die Wärmestrahlung im Glas gefangen ist, steigt die Lufttemperatur deutlich stärker an.

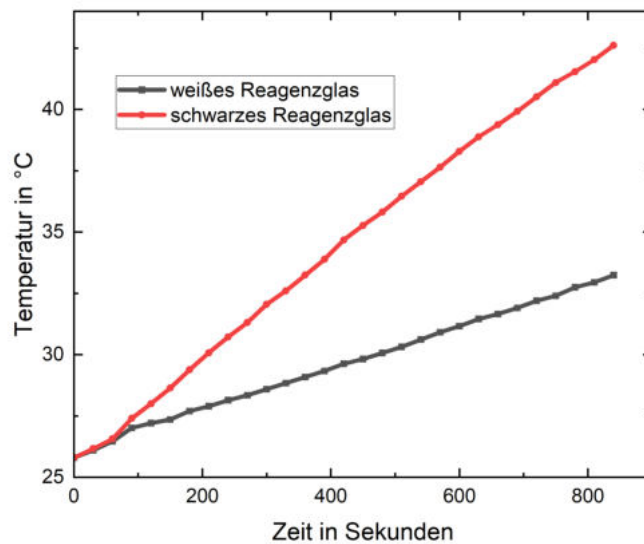


Abbildung 5.17 | Temperaturverlauf in den Reagenzgläsern. Das Wasser im schwarz lackierten Glas erwärmt sich deutlich schneller.

Didaktische Erläuterung und Hinweise für Lehrkräfte

In diesem Versuch steht das Aufnehmen von Temperaturmessreihen im zeitlichen Verlauf im Vordergrund. Die entsprechende experimentelle Teilkompetenz *Beobachten, Messen, Dokumentieren* wird dementsprechend mit Stufe 2 bewertet. Da die Schülerinnen und Schüler die Werte direkt in ein passendes Koordinatensystem eintragen und die Verläufe der Temperaturgraphen vergleichen sollen, wird auch die Kompetenz *Daten aufbereiten* mit Stufe 1 gewichtet. Bei beiden Teilversuchen sollen die Schülerinnen und Schüler Analogien zur Umwelt ziehen und entsprechende Einflussfaktoren diskutieren. Die Teilkompetenz *Schlüsse ziehen/diskutieren* ist somit auch schwerpunktmäßig verlangt und wird mit Stufe 2 bewertet, während die übrigen vier nicht thematisiert und somit nicht eingestuft werden.

Als Lehrkraft ist darauf zu achten, dass sich der Strahler sowohl im ersten als auch im zweiten Versuchsteil so weit von den Thermometern weg befindet, dass eine direkte Erwärmung durch die Wärmestrahlung der Lampe selbst minimiert wird. Beim Albedo-Versuch sollten zwei baugleiche Thermometer (oder wie hier ein Digitalthermometer mit zwei gleichen Messfühlern) verwendet werden, um Messungenauigkeiten einzuschränken. Beim Versuch zum natürlichen Treibhauseffekt sollte unter die schwarze Pappe ein Stück Styropor gelegt werden, um Wärmeverluste an den Untergrund zu verhindern. Anstelle von Glas kann auch Plexiglas verwendet werden. Die beiden Versuche können bei vom Experimentierzirkel unabhängiger Durchführung beliebig lange durchgeführt werden, da im Laufe des Experiments die jeweiligen Temperaturunterschiede immer deutlicher werden. Für eine Durchführung als Versuch im Zirkel sollte allerdings eine Versuchsdauer von 15 bis 20 Minuten nicht überschritten werden.

5.5 Versuch: Das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid

In diesem Versuch wird das Treibhausgas CO_2 und dessen Eigenschaften genauer untersucht.

Aufbau und Durchführung

Für den Versuch werden mehrere Luftballons benötigt, von denen einer mit Luft und ein zweiter mit Kohlenstoffdioxid aufgeblasen wird. Für das Befüllen mit CO_2 eignet sich eine herkömmliche Zylinderflasche, die für Wassersprudler verwendet wird. Nach dem Abschrauben der Verschlusskappe wird der Ballon auf den Zylinder gestülpt. Das Ventil, welches sich oben auf der Flasche befindet, wird anschließend mit einem Schraubenzieher vorsichtig durch den Gummi des Ballons nach unten gedrückt, sodass das unter Druck ein-



Abbildung 5.18 | Links: Aufbau des Experiments zur Bestimmung der IR-Durchlässigkeit von Kohlenstoffdioxid. Rechts: Sauerstoff-Nachweis in zwei Bechergläsern mit selbst produziertem CO_2 .

geschlossene Kohlendioxid den Ballon befüllt. Es ist darauf zu achten, dass der Ballon auf die gleiche Größe wie die des mit Luft aufgeblasenen gefüllt wird. Im Anschluss wird der Ballon von der Flasche genommen und das Ende luftdicht verknotet. Der erste Versuchsteil besteht daraus, die beiden Ballons aus gleicher Höhe fallen zu lassen und das Ergebnis zu diskutieren. Anschließend wird Wasser im Wasserkocher erhitzt und in eine schwarze Dose gefüllt, die wiederum als Wärmequelle dient. Die Ballons werden nun nacheinander in ein Stativ gespannt, welches sich zwischen der Dose und einer Thermosäule befindet. Über ein Voltmeter im mV-Bereich wird dann zunächst die ankommende Wärmestrahlung durch den mit Luft und anschließend den mit CO_2 befüllten Ballon gemessen und verglichen.

Im zweiten Versuchsteil werden zunächst zwei Teelichter mit einem Feuerzeug entzündet. Anschließend werden für die Produktion von Kohlenstoffdioxid zwei Esslöffel Natron und ein Esslöffel Zitronensäure mit Wasser in einem Kolben gemischt. Das schwere CO_2 wird vorsichtig in einen der beiden Becher gekippt. Mit der Zange werden dann die beiden entzündeten Teelichter in die zwei Bechergläser gestellt und die Ergebnisse dokumentiert.

Ergebnisse und fachlicher Hintergrund

Da CO_2 im Vergleich zu Luft eine höhere Dichte besitzt, sinkt der mit Kohlenstoffdioxid gefüllte Ballon schneller als der mit Atemluft. Diese Tatsache erlaubt es, im späteren Versuchsverlauf das CO_2 problemlos vom Kolben in den Messbecher zu kippen. Die Messung der transmittierten Wärmestrahlung durch die beiden Ballons liefert das erwartete Ergebnis: Da CO_2 infrarot-aktiv ist, absorbiert es einen Teil der eintretenden Wärmestrahlung und sorgt somit für eine niedrigere Thermospannung. In dem aufgepusteten Ballon ist

zwar auch eine erhöhte CO₂-Konzentration, da er mit Atemluft aufgeblasen wurde. Diese ist jedoch trotzdem deutlich geringer, was einen Vergleich der beiden Thermospannungen möglich macht. Im letzten Versuchsteil geht das Teelicht, das in den Becher mit CO₂ gestellt wird, sofort aus, während das andere weiter brennt. Die Flamme braucht Sauerstoff um den Verbrennungsvorgang aufrecht zu erhalten. Da das schwere Kohlendioxid die sauerstoffhaltige Luft im Becherglas verdrängt, erlischt die Flamme.

Didaktische Erläuterung und Hinweise für Lehrkräfte

Ein Hauptbestandteil des Experiments ist es, dass die Schülerinnen und Schüler die Versuchsvorbereitungen mit den vorhandenen Materialien richtig ausführen. Dabei müssen im ersten Versuchsteil Luftballons richtig befüllt und in ein Stativ montiert werden. Der gesamte Aufbau, bestehend aus Thermosäule, Luftballon und Dose, wird anschließend korrekt justiert. Im zweiten Versuchsteil müssen zunächst CO₂ hergestellt und die Teelichter angezündet werden. Die experimentelle Teilkompetenz *Versuch funktionsfähig aufbauen* wird daher mit Stufe 2 gewichtet, ebenso wie die Kompetenz *Beobachten, Messen, Dokumentieren*. Da sowohl über die beiden fallenden Ballons als auch über das Erlischen der Flamme im CO₂-befüllten Becherglas kurz diskutiert werden soll, wird die Teilkompetenz *Diskutieren/Schlüsse ziehen* mit Stufe 1 bewertet. Die üblichen Aspekte sind für den Versuch nicht relevant und gehen somit nicht in die Gewichtung ein.

Als Lehrkraft ist darauf zu achten, dass die Schülerinnen und Schüler beim Umgang mit heißem Wasser die nötigen Schutzhandschuhe benutzen. Auch ist das Befüllen des Ballons mit CO₂ nur unter Aufsicht bzw. mit Hilfe möglich, da beim Herunterdrücken des Ventils des CO₂-Zylinders mit dem Schraubenzieher viel Kraft aufgewendet werden muss und somit potenziell Verletzungsgefahr besteht. Auch beim zweiten Versuchsteil ist darauf zu achten, dass die vorhandenen Materialien wie der Chemikalienlöffel und die Feuerzange ordnungsgemäß verwendet werden.

Der erste Versuchsteil empfiehlt sich vor allem dann, wenn im Modellexperiment zum Treibhauseffekt in Kapitel 5.1 der Versuchsteil mit der Thermosäule nicht durchgeführt wurde, da er das gleiche Prinzip veranschaulicht. Ansonsten wurde das Experiment wieder so konzipiert, dass es auch als Einzelversuch losgelöst vom Experimentierzirkel durchgeführt werden kann. Bei einer Einbindung in den Zirkel kann man sich also hier auf den zweiten Versuchsteil beschränken oder beim Modellexperiment die entsprechende Messung der Thermospannung weglassen.

5.6 Zusammenfassung des Lernzirkels

Die hier vorgestellten Versuche wurden so konzipiert, dass sie alle Komponenten des Modellexperiments zum Treibhauseffekt aus Kapitel 5.1 genauer beleuchten. Das Modell besteht dabei aus drei großen Teilkomponenten. Der Keramikstrahler als Strahlungsquelle stellt die Erde mit ihrer langwelligen Emission von Wärmestrahlung dar. Die abgedichtete Dose simuliert die Erdatmosphäre in ihrem natürlichen Zustand und das erzeugte Kohlenstoffdioxid steht stellvertretend für die Treibhausgasemissionen der Menschheit in den letzten 200 Jahren. Konzepte über die Wärmestrahlung werden den Schülerinnen und Schülern in den Versuchen zu den Grundlagen zur Wärmestrahlung, zum Leslie-Würfel und zum Rückstrahlvermögen vermittelt. Die Komponente der Atmosphäre wird im Versuch zum natürlichen Treibhauseffekt behandelt, während das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid im gleichnamigen Versuch untersucht wird. Da alle Grundlagen im Hauptexperiment eine wichtige Rolle spielen, ist es zu empfehlen, dass die Schülerinnen und Schüler dieses erst durchführen, nachdem sie alle anderen Experimente bereits bearbeitet haben. Das Experiment zu den Grundlagen der Wärmestrahlung ist als Einstiegsexperiment am besten geeignet, da in allen anderen Versuchen Wärmestrahlung auftritt und diskutiert wird.

Falls es die Ausstattung der jeweiligen Schule zulässt, ist es am sinnvollsten, dass am Anfang alle Schülergruppen gleichzeitig den Versuch 5.2 durchführen. Am Ende des Zirkels steht dann das Modellexperiment zum CO₂-verursachten Treibhauseffekt. Der Versuch wurde von der Universität München so konzipiert, dass er mit Haushaltsmaterialien nachbaubar ist. Abgesehen von der Thermosäule, die in der hier vorgestellten Ausführung des Experiments verzichtbar ist, bietet es sich auch an, dass alle Schülergruppen ihren eigenen Versuchsaufbau bearbeiten. Die Versuchsreihenfolge für die mittleren Versuche kann beliebig gewählt werden, da keiner direkt auf den jeweils anderen aufbaut. Wie bereits erwähnt, können die Versuche auch aus dem Zirkel gelöst und einzeln in den Unterricht eingebaut werden. Dabei empfiehlt es sich, entsprechende Grundlagen vorab im Unterricht zu besprechen.

6 Fazit

Auch wenn die Erderwärmung aufgrund zunehmender Anteile von Treibhausgasen in der Atmosphäre unumstritten und bereits lange bekannt ist, stellt eine schülergerechte, aussagekräftige Umsetzung dieses Prozesses in einem Modellexperiment eine Herausforderung dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurden dabei unterschiedliche Varianten von Modellversuchen getestet. Häufig scheiterte eine sinnvolle Einbindung in den Schulunterricht entweder an zu aufwändigen Messapparaturen, die ungeeignet für den Einsatz in einem Schülerexperiment sind, oder am zu großen Einfluss von Nebeneffekten, die Messergebnisse verfälschen und somit nicht den eigentlichen Effekt zeigen. Bei einem Versuch zur CO₂-verursachten Erderwärmung ist es besonders wichtig, ein verlässliches Experiment zu zeigen, dass die Wirkung dieses Treibhausgases deutlich macht. Ein Ergebnis, das nicht den Erwartungen entspricht, kann andernfalls zu Fehlvorstellungen bei den Schülerinnen und Schülern führen, die dann eine Aufklärung über den Klimawandel behindern.

Mit dem Modellexperiment der Universität München, welches im dort entwickelten Klimakoffer integriert ist, wurde in dieser Arbeit ein verlässliches Experiment ausführlich mit verschiedenen Variationen und Schwierigkeiten beschrieben. Durch die anderen Versuche werden die nötigen Grundlagen vermittelt, sodass die Schülerinnen und Schüler umfassend über den anthropogenen Klimawandel und wichtige Einflussfaktoren informiert werden. Es wurde darauf geachtet, mögliche Fehlerquellen und Schwierigkeiten für Lehrkräfte transparent darzustellen, um eine reibungslose Durchführung im Unterricht möglich zu machen.

Da der Klimawandel eines der größten Probleme der Menschheitsgeschichte darstellt, ist es wichtig diesen umfassend in den Schulen zu lehren, um Missverständnisse, Fehlinformationen und Verschwörungstheorien einzudämmen. Die dargestellten Experimente sollen daher Lehrkräften helfen, das Thema anschaulich und schülergerecht in den Unterricht einzubetten und so das Bewusstsein auf Nachhaltigkeit im Bezug auf unsere Umwelt stärken.

Literaturverzeichnis

- BARRY, R. G. & CHORLEY, R. J. (2009): *Atmosphere, weather and climate*. Routledge.
- BEGA (2020): *Strahlungsintensität der Sonne*. URL: <https://www.bega.com/de/wissen/ueber-licht-und-beleuchtung/11-physikalische-natur-des-lichts/>, abgerufen am 14.09.2021.
- BRÖNNIMANN, S. (2018): *Klimatologie*. UTB GmbH.
- CAZENAVE, A., MEYSSIGNAC, B., ABLAIN, M., BALMASEDA, M., BAMBER, J., BARLETTA, V., BECKLEY, B., BENVENISTE, J., BERTHIER, E., BLAZQUEZ, A. ET AL. (2018): *Global sea-level budget 1993-present*. In: *Earth System Science Data*, **10**, 3: 1551–1590.
- COOPER, O. R., PARRISH, D., ZIEMKE, J., BALASHOV, N., CUPEIRO, M., GALBALLY, I., GILGE, S., HOROWITZ, L., JENSEN, N., LAMARQUE, J.-F. ET AL. (2014): *Global distribution and trends of tropospheric ozone: An observation-based review*. In: *Elementa: Science of the Anthropocene*, **2**.
- COUMOU, D. & RAHMSTORF, S. (2012): *A decade of weather extremes*. In: *Nature climate change*, **2**, 7: 491–496.
- CRIPPA, M., OREGGIONI, G., GUIZZARDI, D., MUNTEAN, M., SCHAAF, E., LO VULLO, E., SOLAZZO, E., MONFORTI-FERRARIO, F., OLIVIER, J. & VIGNATI, E. (2019): *Fossil CO₂ and GHG emissions of all world countries*. Joint Research Centre.
- GOKLANY, I. M. (2009): *Deaths and death rates from extreme weather events: 1900-2008*. In: *Global Trends*, **13**: 14.
- GRAHAM, S. (1999): *Remote sensing*. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/RemoteSensing>, abgerufen am 15.09.2021.
- HAKEN, H. & WOLF, H. C. (2013): *Molekülphysik und Quantenchemie: Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen*. Springer-Verlag.
- HANSLMEIER, A. (2002): *Einführung in Astronomie und Astrophysik*. Springer.
- HECHT, E. (2018): *Optik*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- INFRAROTTEC SYSTEMS (2011): *Emissionsgrad-Tabelle*. URL: <https://www.flir-infrarotkameras.de/FLIR-Technik-und-Funktionen/Emissionsgrad-Tabelle>, abgerufen am 01.09.2021.

- JACOBSON, M. Z. (2019): *Primary Contributors to Net Observed Anthropogenic Global Warming (AGW) From 1750 to 2018 and, Separately, the Natural Greenhouse Effect (NGE)*. In: 100% Clean, Renewable Energy and Storage for Everything. URL: <https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/ContributorsAGW-NGE.pdf>, abgerufen am 14.09.2021.
- JACOBSON, M. Z. (2020): *100% Clean, Renewable Energy and Storage for Everything*. Cambridge University Press.
- MACH, K. J., KRAAN, C. M., ADGER, W. N., BUHAUG, H., BURKE, M., FEARON, J. D., FIELD, C. B., HENDRIX, C. S., MAYSTADT, J.-F., O'LOUGHLIN, J. ET AL. (2019): *Climate as a risk factor for armed conflict*. In: Nature, **571**, 7764: 193–197.
- MEEHL, G. A. & TEBALDI, C. (2004): *More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century*. In: Science, **305**, 5686: 994–997.
- MERSMANN, K., STEIN, T. & CARLOWICZ, M. (2017): *Ozone Hole is Smallest Since 1988*. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/91212/ozone-hole-is-smallest-since-1988>, abgerufen am 14.09.2021.
- MIN, S.-K., ZHANG, X., ZWIERS, F. W. & HEGERL, G. C. (2011): *Human contribution to more-intense precipitation extremes*. In: Nature, **470**, 7334: 378–381.
- NASA (2012): *Atmospheric electromagnetic opacity*. URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/dc/Atmospheric_electromagnetic_opacity-de.svg, abgerufen am 14.09.2021.
- NAWRATH, D., MAISEYENKA, V. & SCHECKER, H. (2011): *Experimentelle Kompetenz – Ein Modell für die Unterrichtspraxis*. In: Praxis der Naturwissenschaften-Physik in der Schule, **60**, 6: 42–48.
- NOAA NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION (2021): *Climate at a Glance: Global Time Series*. URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/globe/ocean/ann/8/1880-2021>, abgerufen am 09.09.2021.
- RAVEN, J., CALDEIRA, K., ELDERFIELD, H., HOEGH-GULDBERG, O., LISS, P., RIEBESELL, U., SHEPHERD, J., TURLEY, C. & WATSON, A. (2005): *Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide*. The Royal Society.
- ROEDEL, W. (2017): *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*. Springer-Verlag.
- SCHUBERT, R., SCHELLNHUBER, H., BUCHMANN, N., EPINEY, A., GRIESSHAMMER, R., KULESSA, M., MESSNER, D., RAHMSTORF, S. & SCHMID, J. (2006): *Die Zukunft der Meere - zu warm, zu hoch, zu sauer*. In: Sondergutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung für globale Umweltveränderungen.
- SCHULT, I., FEICHTER, J. & COOKE, W. F. (1997): *Effect of black carbon and sulfate aerosols on the global radiation budget*. In: Journal of Geophysical Research: Atmospheres, **102**, D25: 30107–30117.

- SCHUUR, E. & ABBOTT, B. (2011): *High risk of permafrost thaw*. In: Nature, **480**, 7375: 32–33.
- SCORZA, C. & STRÄHLE, M. (2020): *Experiment: Die Wirkung von Treibhausgasen*. URL: https://klimawandel-schule.de/materialien/Handbuch/Handbuch_Klimawandel.pdf, abgerufen am 14.09.2021.
- SCORZA, C., STRÄHLE, M., MAYER, B. & LESCH, H. (2020): *Offene Stellungnahme zum Experiment zur Wärmeabsorption durch CO₂*. URL: https://klimawandel-schule.de/materialien/Klimakoffer/Experiment_AbsorptionCO2_Hintergrund.pdf, abgerufen am 14.09.2021.
- SMITH, K., WOODWARD, A., CAMPBELL-LENDRUM, D., CHADEE, D., HONDA, Y., LIU, Q., OLWOCH, J., REVICH, B., SAUERBORN, R., ARANDA, C. ET AL. (2014): *Human health: impacts, adaptation, and co-benefits*. Cambridge University Press.
- SOLOMON, S., MANNING, M., MARQUIS, M., QIN, D. ET AL. (2007): *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, Bd. 4. Cambridge university press.
- SPORTISSE, B. (2010): *Fundamentals in air pollution: from processes to modelling*. Springer Science & Business Media.
- STAATSIINSTITUT FÜR SCHULQUALITÄT UND BILDUNGSFORSCHUNG (2020a): *Fachlehrplan Klasse 9 Physik Gymnasium*. URL: <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/9/physik>, abgerufen am 22.10.2020.
- STAATSIINSTITUT FÜR SCHULQUALITÄT UND BILDUNGSFORSCHUNG (2020b): *Fachprofil Physik*. URL: <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachprofil/gymnasium/physik>, abgerufen am 22.10.2020.
- UMWELTBUNDESAMT (2006): *Klimagefahr durch tauenden Permafrost?* URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/357/dokumente/klimagefahr_durch_tauenden_permafrost.pdf, abgerufen am 14.09.2021.
- UMWELTBUNDESAMT (2020a): *Fluorierte Treibhausgase und FCKW*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw>, abgerufen am 22.10.2020.
- UMWELTBUNDESAMT (2020b): *Methan-Emissionen*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/methan-emissionen>, abgerufen am 22.10.2020.
- WALSH, J. & WUEBBLES, D. (2014): *Ch. 2: Our Changing Climate*. In: Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment.
- WEINERT, F. E. (2001): *Leistungsmessungen in Schulen*. Beltz Pädagogik.
- WÖHLCKE, M. (2002): *Umweltmigration*. URL: https://web.archive.org/web/20070927211023/http://www.berlin-institut.org/pages/buehne/buehne_migr_woehlcke_umwelt.html, abgerufen am 14.09.2021.

WIKIMEDIA COMMONS (2017): *Plancksches Strahlungsspektrum*. URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f2/BlackbodySpectrum_loglog_de.svg, abgerufen am 14.09.2021.

ZENTRALAMT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK (2007): *Geschätzte mittlere jährliche und globale Energiebilanz der Erde*. URL: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimasystem/umsetzungen/energiebilanz-der-erde>, bearbeitet nach Solomon (2007), abgerufen am 14.09.2021.

A Anhang: Arbeitsmaterialien zum Experimentierzirkel

Modellexperiment zum Treibhauseffekt

Materialien:


- 50 Watt Keramikstrahler
- Pappdose
- Digitalthermometer
- Stoppuhr
- Frischhaltefolie, Gummis, Knete
- Bechergläser
- Kolben, Stopfen, Schlauch
- Citronensäure, Natron, Wasser
- Chemikalienlöffel, Trichter
- Waage
- Thermosäule, Voltmeter



Vorbereitung:

Stecke das Digitalthermometer in die mittlere Öffnung der Pappdose und dichte die beiden anderen Löcher mit Knete ab. Lies dir immer zuerst den vollständigen Arbeitsauftrag durch, bevor du mit den Arbeitsanweisungen anfängst! Der Keramik-Infrarotstrahler darf nicht angefasst werden! Verbrennungsgefahr!

Aufgabe 1:

-  a) Schalte den Keramik-Infrarotstrahler ein und lies die Temperatur am Thermometer fortlaufend alle 30 Sekunden mithilfe der Stoppuhr ab. Fertige dazu eine Tabelle in deinem Heft an! Lies dir in der Zwischenzeit die folgende Infobox aufmerksam durch und bearbeite Aufgabenteil b) und c).

i

Das Experiment stellt ein Modell des Treibhauseffektes dar, wie er in der Realität abläuft: Der Erdboden wird durch Licht im sichtbaren Bereich erwärmt und gibt selbst Wärmestrahlung ab. Diese Wärmestrahlung wird allerdings teilweise von Treibhausgasen wie Kohlenstoffdioxid oder Methan in der Atmosphäre absorbiert und wiederum zum Teil in Richtung Erde emittiert, was zu einer Erwärmung führt.

- b) Wiege mithilfe des Chemikalienlöffels und der Waage in einem der beiden Bechergläser 24 Gramm Natron ab. Im anderen Becher werden 8 Gramm Citronensäure abgewogen. Befülle im Anschluss ein drittes Becherglas mit etwas Leitungswasser. Die Chemikalien werden noch nicht vermischt!

i

Das Vermischen von Natron und Citronensäure mit Wasser erzeugt eine chemische Reaktion, bei dem das Salz Natriumcitrat und das Gas Kohlenstoffdioxid entstehen.

Rückstrahlvermögen

Materialien:

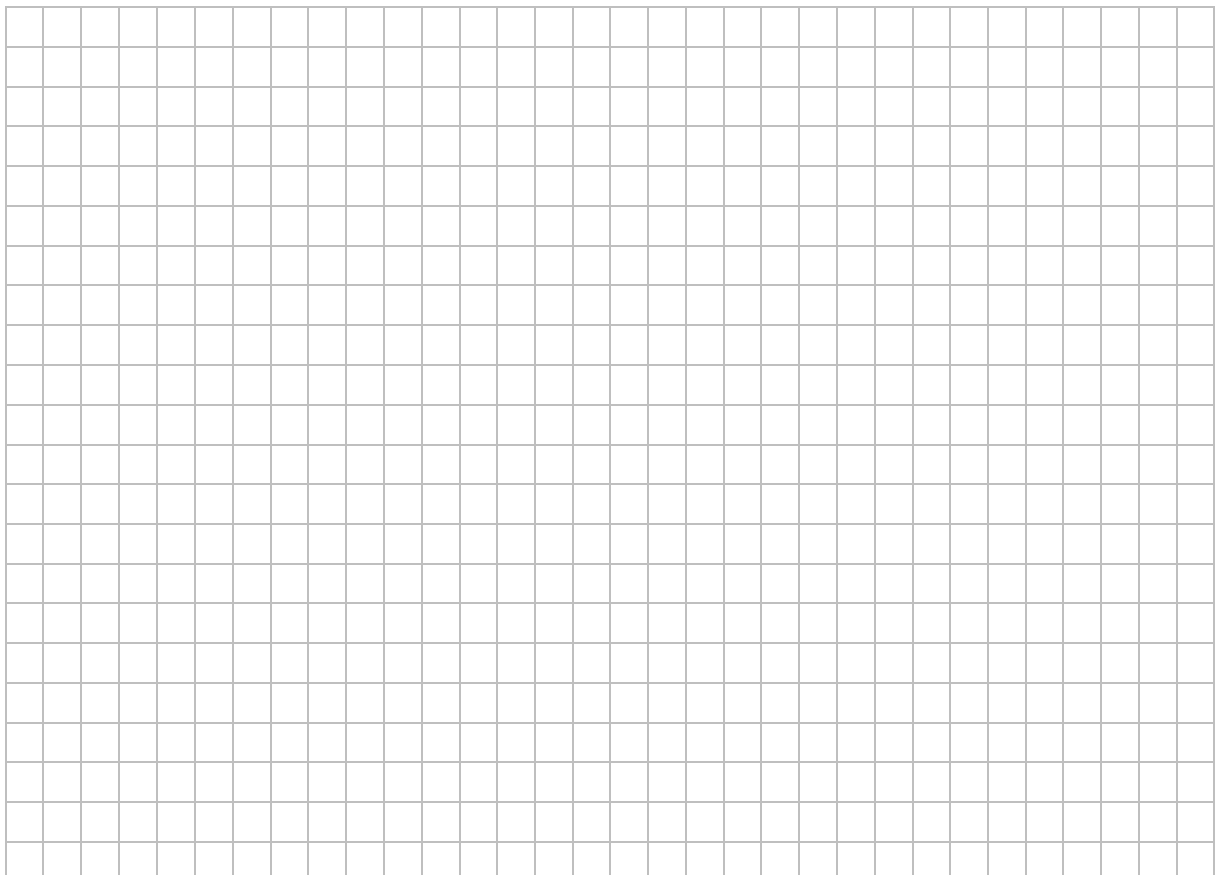
- Reagenzgläser (schwarz bzw. weiß)
- Stative
- 500 Watt Baustrahler
- Digitalthermometer mit zwei Fühlern



Aufgabe 1:



- Fülle die beiden Reagenzgläser mit Wasser und positioniere sie mithilfe der Stative in einem Abstand von ca. 50 cm vor dem Baustrahler. Schalte den Baustrahler ein und achte darauf, dass beide Reagenzgläser gleich stark beleuchtet werden.
- Miss mithilfe des Digitalthermometers alle 60 s für 10 Minuten die Temperaturen in beiden Reagenzgläsern und trage die Werte in eine Tabelle in dein Heft ein.
- Trage die Werte in ein geeignetes Koordinatensystem ein und zeichne Ausgleichskurven der beiden Temperaturverläufe.



Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere an Eides statt durch meine Unterschrift, dass ich die vorstehende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich, annähernd wörtlich oder dem Sinn nach aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Des Weiteren erkläre ich, dass ich mich keiner anderen als der angegebenen Literatur oder sonstiger Hilfsmittel bedient habe. Diese Versicherung gilt auch für Abbildungen, Tabellen und ähnliches. Die vorliegende Arbeit wurde in dieser oder ähnlicher Form an keiner weiteren Prüfungsstelle eingereicht.
Abstand und Linie

Ort, Datum

Unterschrift