

Physikalische Umweltbildung anhand des Treibhauseffekts

Experimente für den Schulunterricht

Diplomarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades
eines Magisters
an der Naturwissenschaften Fakultät
der Karl-Franzens-Universität Graz

Vorgelegt von
Christoph Johannes STATTEGGER

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Pottlacher
Dipl.-Ing. Dr. techn. Roland Lammegger
Am Institut für Experimentalphysik
Technische Universität Graz

Graz, 2020

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen inländischen oder ausländischen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Die vorliegende Fassung entspricht der eingereichten elektronischen Version.

Graz, 31. Juli 2020

Kurzfassung

Der globale Diskurs über die Erderwärmung und die Veränderungen im planetarischen Klimasystem ist allgegenwärtig und kann durchaus kontrovers verlaufen. Dem für die Erwärmung der Erdoberfläche ursächliche Prozess – dem Treibhauseffekt – kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Wie in der Arbeit gezeigt wird, beobachtet die didaktische Forschung teilweise große Wissenslücken und Fehlvorstellungen gegenüber den naturwissenschaftliche Erklärungsmodellen zu diesem Phänomen. Die vorgestellten Experimente stellen einen Handlungsansatz von Seiten des Physikunterrichts dar, diesen Wissenslücken und Fehlvorstellungen über den Treibhauseffekt entgegenzuwirken. Die Durchführung der Experimente zeigt, dass die Wirkmechanismen der Teilphänomene des Treibhauseffekts in Form physikalischer Schulversuche dargestellt werden können. So können zum Beispiel selbst die für das Verständnis des Treibhauseffekts wichtigen Absorptions- und Remissionswirkungen auch ohne quantenmechanische Hintergründe rein phänomenologisch nachvollzogen werden. Dem Experimentierteil vorangestellt ist ein, für den Schulalltag tauglicher, Theorieteil. Darin werden die physikalischen Grundlagen der elektromagnetischen Strahlung und die Wirkung der Erdatmosphäre auf diese Strahlung erläutert sowie anhand einer einfachen Modellrechnung der Strahlungshaushalt der Erde skizziert. Diese Arbeit kann für die Gestaltung physikalischer Unterrichtsstunden zum Thema Treibhauseffekt ein Werkzeug sein.

Abstract

The discourse on global warming and the resulting changes in the climate system of our planet seems to be omnipresent and can be quite controversial. The greenhouse effect, which is the process causing the warming of the earth's surface, plays a crucial role in this context. As will be shown, didactic research has observed major deficiencies and misconceptions as opposed to scientific explanatory models for this phenomenon. The experiments described in this thesis present an approach for physics teachers to counteract deficiencies and misconceptions related to the greenhouse effect. The conduction of these experiments demonstrates that the impacts of various partial aspects of the greenhouse effect can be illustrated by means of scientific tests at school. Thus, the processes of absorption and emission, which are highly important for the understanding of the greenhouse effect, can be retraced in a phenomenological manner, even without quantum-mechanical backgrounds. The experimental part is preceded by a theoretical section suitable for everyday school practice, which elaborates on the physical basics of electromagnetic radiation and the atmosphere's effect on it. Additionally, the global energy budget is illustrated through a simple model calculation. This thesis can therefore provide assistance for the conception and preparation of physics lessons.

Danke

Allen voran möchte ich meinen Eltern danken, die mich in meiner Studienzeit in jeder Hinsicht unterstützt haben. Mit ihren offenen Ohren standen sie mir stets zur Seite.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei DI Dr. Gernot Pottlacher und DI Dr. Roland Lammegger, die mir die Möglichkeit gaben diese Arbeit zu verfassen. Ihre zuvorkommende Betreuung war mir bei der Erstellung dieser Arbeit eine große Hilfe.

Besonders möchte ich Daniela danken, dass sie mir die Zeit einräumte, mich meinem Studium zu widmen und mich in allen Lebenslagen mit unserer Tochter Nora begleitet und unterstützt.

Nicht zuletzt möchte ich jenen Freunden und StudienkollegInnen meinen Dank aussprechen, die mich während meiner Studienzeit fachlich und mental unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Umweltbildung im Physikunterricht	4
2.1.	Wie sich Lernende den Treibhauseffekt vorstellen	5
2.2.	Das Experiment im Physikunterricht.....	8
2.3.	Absicherung durch den Lehrplan	11
3.	Die Physik der Strahlung und des Treibhauseffekts.....	14
3.1.	Strahlung und ihre Gesetzmäßigkeiten.....	14
3.1.1.	Strahlungsgrößen.....	15
3.1.2.	Strahlungsgesetze	17
3.1.3.	Absorption von Strahlung	20
3.2.	Solare und terrestrische Strahlung.....	24
3.2.1.	Die solare Strahlung und ihre ‚Konstante‘	25
3.2.2.	Terrestrische Strahlung	27
3.3.	Die Atmosphäre und ihre Wirkung auf Strahlung.....	29
3.3.1.	Absorption solarer Strahlung durch atmosphärische Gase	31
3.3.1.	Die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre.....	33
3.4.	Der Treibhauseffekt.....	42
3.4.1.	Strahlungsbilanzmodell der Erdatmosphäre mit und ohne Atmosphäre	46
3.4.2.	Der anthropogene Treibhauseffekt.....	50
3.4.3.	Auswirkungen des Treibhauseffekts	52
4.	Physikalische Experimente zum Themenkomplex Treibhauseffekt.....	57
4.1.	Mehrfach eingesetzte Experimentiermaterialien	58
4.2.	Solare Strahlung	61
4.2.1.	Albedo – Reflexionsvermögen der Erdoberfläche	61
4.2.2.	Spezifische Wärmekapazität von Erde und Wasser	63
4.2.3.	Abhängigkeit der Strahlungsintensität von Abstand & Azimut-Winkel	67
4.2.4.	Die Infrarotstrahlung im kontinuierlichen Spektrum	69
4.3.	Absorption kurzwelliger Strahlung und Emission langwelliger Strahlung	72
4.3.1.	Freihandversuche zur Infrarotstrahlung	72
4.3.2.	Wärmetransport durch Konvektion und Strahlung	74
4.3.3.	Der Glashauseffekt	76

4.3.4.	Erwärmung der Atmosphäre durch terrestrische Abstrahlung.....	78
4.4.	Absorptionsvermögen der Atmosphäre.....	80
4.4.1.	Absorption in PE-Flaschen	80
4.4.2.	Absorptionsrohr	83
4.4.3.	Absorption in Ballons	87
4.5.	Remission von Wärmestrahlung	89
4.5.1.	Freihandversuch zur Remission von Wärmestrahlung	89
4.5.2.	Remission von Wärmestrahlung einer Acrylplatte	91
4.5.3.	Remission von Wärmestrahlung durch Treibhausgase.....	94
4.5.4.	Absorption der remittierten Wärmestrahlung	98
4.6.	Mögliche Auswirkungen einer Erwärmung	101
4.6.1.	Thermische Ausdehnung von Wasser.....	101
4.6.2.	Meereis vs. Schelfeis	103
4.6.3.	Entstehung konvektiver Strömungsmuster – Der Golfstrom.....	105
4.7.	Anmerkungen zu den Experimenten	107
5.	Abschlussbetrachtung.....	109
	Literaturverzeichnis	111
	Abbildungsverzeichnis.....	116

1. Einleitung

Kaum ein anderes Thema ist in den Medien derart präsent wie der sogenannte „Klimawandel“. Unter diesem Begriff werden zumeist die Zunahme der globalen Durchschnittstemperatur sowie die daraus erwachsenden Folgen verstanden. Der Klimawandel zählt global zu einem der am meisten diskutierten Themen, ist die Bedeutung des Klimas für uns Menschen doch von enormer gesellschaftlicher, politischer und nicht zuletzt biologischer Relevanz. Nach Klafki handelt es sich bei der Frage nach der Klimaveränderung um ein „epochaltypisches Schlüsselproblem“¹. Es sind gerade solche Probleme, die beim Erreichen der Bildungsziele inhaltlich präsent sein müssen – einer Hauptfunktion von Schule und damit auch des schulischen Physikunterrichts.

Der Klimabericht der IPCC 2013 hält fest: „Die Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig, und viele der seit den 1950er Jahren beobachteten Veränderungen waren vorher über Jahrzehnte bis Jahrtausende nie aufgetreten. Die Atmosphäre und der Ozean haben sich erwärmt, die Schnee- und Eismengen sind zurückgegangen, der Meeresspiegel ist angestiegen und die Konzentrationen der Treibhausgase haben zugenommen“ (IPCC, 2013, S. WGI-2). Laut dem Sonderbericht 2018 (IPCC, 2018) haben anthropogene Aktivitäten etwa 1,0°C an der globalen Erwärmung verglichen mit vorindustriellem Niveau verursacht. Wir sind uns dessen bewusst, dass der Mensch mit seinen Handlungen zu Klimaveränderungen beiträgt (s. Abschnitt 3.4.2). Dieses Bewusstsein drückt sich u.a. im politischen Willen aus, negativen Erscheinungen und Folgen einer Klimaveränderung entgegenzuwirken oder diesen gar vorbeuge zu leisten. Dieser Wille ist in allen Hierarchieebenen vom Weltklimagipfel, zuletzt in Madrid², bis zu lokalen Klimaagenden auf Gemeindeebene zu finden. Auch in den Lehrplänen finden sich derartige Ziele (s. Abschnitt 2.3), beispielsweise liest man im AHS Lehrplan Physik: „Der Physikunterricht hat zum allgemeinen Bildungsauftrag der Schule, insbesondere [...] dem verantwortungsbewussten Umgang mit der Umwelt und der verantwortlichen, rationalen Mitwirkung an gesellschaftlichen Entscheidungen fachspezifisch beizutragen [...]“ (vgl. BMBWF, 2019).

¹ Unter „epochaltypische Schlüsselprobleme“ versteht Klafki aktuelle Probleme, die sich nicht auf einzelne Gesellschaften oder Regionen beschränken, sondern tendenziell alle Regionen der Erde betreffen und deren Lösung über Generationen hinweg in die Zukunft reicht, beispielsweise Krieg und Frieden beziehungsweise ökologische Fragen (vgl. Klafki, 2019, S. 105).

² Die UN-Klimakonferenz 2019 (COP-25) fand vom 2. bis zum 13. Dezember 2019 in der spanischen Hauptstadt Madrid statt (vgl. UNFCCC secretariat, 2019). UNFCCC steht für „United Nations Framework Convention on Climate Change“ und bezeichnet das Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen.

Dank des medialen Interesses an Greta Thunberg breiteten sich Schulstreiks seit September 2018 über den gesamten Globus aus. Unter dem Motto *#FridaysForFuture* gehen Schülerinnen und Schüler weltweit auf die Straße und demonstrieren für ein Umsetzen bzw. Einhalten der klimapolitischen Ziele (vgl. The Guardian³, Der Standard⁴). In empirischen Studien (s. Abschnitt 2.1) zeigt sich jedoch, dass die Schülerinnen und Schüler häufig falsche oder nur teilweise richtige Alltagsvorstellungen gegenüber naturwissenschaftlichen Erklärungen mitbringen. Die Situation wurde 1996 wie folgt beschrieben: „Aber trotz der häufigen und alarmierenden Medienberichte zählt das für den Treibhauseffekt zentrale Phänomen nachweislich nicht zum geläufigen Wissen der erwachsenen Bevölkerung und zwar nicht einmal in der Gruppe der Studierenden“ (Aeschbacher & Huber, 1996, S. 180). Knapp 20 Jahre später berichtet eine empirische Studie der Fachdidaktik von einer „pauschalen Gleichsetzung von Luftschadstoffen und Treibhausgasen, sowie einer kausalen Verknüpfung zwischen dem Treibhauseffekt und dem Ozonloch.“ Die Autoren kommen zum Schluss, dass „der Ist-Zustand des Schülerwissens deutlich unter dem definierten Soll-Zustand liegt“ (vgl. Harsch & Barke, 2014). Die Wissensdefizite sind aber nicht nur auf viele junge Lernende beschränkt, sondern es sind „auch Erwachsene und die Medien die häufig auf die Idee eines Ozonlochs als Ursache der Erwärmung zurückgreifen“ (vgl. Niebert, 2009). Diese Diskrepanz macht deutlich, dass die Prozesse, die zu einer Erwärmung der Erdatmosphäre führen, nicht vollständig verstanden werden. Allerdings ist ein fachliches Grundverständnis wie es die Lehrpläne einfordern, unabdingbar, um an gesellschaftspolitischen Entscheidungen mitzuwirken. Dies gilt ebenso für eine Plausibilitätsprüfung medial transportierter Inhalte, wenn sie sich nicht ausschließlich auf das Sympathieempfinden dem Medium gegenüber reduzieren soll.

Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen dieser Diplomarbeit physikalische Experimente vorgestellt mit denen das Phänomen Treibhauseffekt im Klassenraum erfahrbar gemacht werden kann. Um eine tatsächliche Umsetzung im Schulalltag zu erleichtern, sind die Experimente einerseits auf eine kurze, evidente und gut fassbare Aussage ausgerichtet, die eindeutig aus dem Veranschaulichten ablesbar ist (vgl. Aeschbacher & Huber, 1996, S. 181). Andererseits wird darauf geachtet, dass die Versuche mit überschaubarem Aufwand aufgebaut werden können und der Materialeinsatz damit gering bleibt. Der Treibhauseffekt, der den Strahlungshaushalt der Erdatmosphäre wesentlich beeinflusst, ist ein komplexer, wechselwirkender Prozess (vgl. Bakan & Raschke, 2002). Die Atmosphäre kann nicht in ihrer

³ „Climate strikes held around the world – as it happened, Young people, inspired by Greta Thunberg, rally to press politicians to act on climate change“ (Glenza, Evans, Ellis-Petersen, & Zhou, 2019).

⁴ „Greta Thunbergs junge Garde“ (Scherndl, Scholda, & Yossef, 2019).

Gesamtheit verkleinert im Klassenraum modelliert werden. Ziel ist es vielmehr, durch die Zugänglichkeit der einzelnen Teilphänomene ein Verständnis für das gesamte Phänomen Treibhauseffekt zu erhalten. Die didaktische Herausforderung dabei besteht einerseits darin, dass sich die einzelnen Teile wechselseitig aufeinander beziehen lassen und letztlich für die Schülerinnen und Schüler ein ‚Ganzes‘ erkennbar wird. Andererseits sind die Lerninhalte didaktisch so zu reduzieren, damit sie an Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten andocken können (vgl. Höttecke, Maiseyenko, Rethfeld, & Mrochen, 2009, S. 110).

Die Arbeit ist so gestaltet, dass sie als Informationsmaterial für Lehrende ein Hilfsmittel bei der Gestaltung des Physikunterrichts dienen kann. Der Beschreibung der einzelnen Experimente (Kapitel 4) ist eine Erklärung der dafür nötigen Inhalte (Kapitel 3) vorangestellt. Die physikalischen Zusammenhänge sowie der aktuelle Kenntnisstand über das Phänomen des Treibhauseffekts werden mit einer für den Schullalltag ausreichenden Dichte beschrieben. Hierbei kommen mikroskopischen der Materie Eigenschaften eine bedeutende Rolle zu, die nur mit Hilfe der Quantenmechanik erklärbar sind. Im Hinblick auf den Einsatzzweck dieser Arbeit wurde auf eine detaillierte Wiedergabe der Wechselwirkungen durch quantenmechanische Zusammenhänge verzichtet. Wirkungsvoller Wissenstransfer knüpft an bereits Bekanntem an. Kenntnis über den Wissensstand und die Vorstellungen, die Schülerinnen und Schüler über ein Thema in den Unterricht mitbringen, helfen Lehrenden Lernhürden und Fehlvorstellungen zu identifizieren. Daher sind die Ergebnisse fachdidaktischer Forschung über Schüler- vorstellungen zu den Themen Treibhauseffekt und Klimawandel an den Beginn dieser Arbeit gestellt.

2. Umweltbildung im Physikunterricht

Wie bereits in der Einleitung angedeutet, handelt es sich beim Klimawandel um ein epochaltypisches Schlüsselproblem. Allein schon die enorme Bedeutung der Themenkomplexe Treibhauseffekt und Klimawandel ist Grund für die Behandlung im Unterricht, insbesondere im naturwissenschaftlichen. Neben der gesellschaftlichen Relevanz sprechen noch zwei weitere Argumente für die unterrichtliche Auseinandersetzung mit dem Treibhauseffekt: Einerseits die Chance, Einblicke in aus physikalischer Sicht offene Systeme und deren komplexe Zusammenhänge zu geben. Andererseits ermöglicht das Thema eine Perspektive auf die Physik als Wissenschaft, insbesondere auf die Rolle von Modellen bei der Erkenntnisgewinnung sowie bei der Generierung von Vorhersagen. Nicht zuletzt der gesellschaftlichen Relevanz geschuldet eignet sich dieser Themenbereich für eine Vielzahl an Varianten eines fächerübergreifenden Unterrichts, der sich nicht unbedingt auf naturwissenschaftliche Schulfächer beschränken muss (vgl. Müller, Müller, & Kuhn, 2009, S. 4, 5).

Wie sich nachfolgend zeigen wird, existieren diverse Vorstellungen über die atmosphärischen Prozesse, die mit anerkannten physikalischen Modellen nicht übereinstimmen. Mit den in Kapitel 4 vorgestellten Experimenten können diese falschen Konzepte gegen physikalisch richtige ausgetauscht werden. Für physikalische Versuche im Unterricht gelten dieselben Rahmenbedingungen wie für die Wissensvermittlung durch andere Unterrichtsmethoden oder Darstellungsformen. Damit sich für den Beobachter und die Beobachterin Sinn aus den Eindrücken und Daten, die er und sie wahrnehmen, erschließt, muss eine Verbindung zu bereits Bekanntem hergestellt werden. Erst wenn sich durch Anknüpfung an vorhandene Wissens- und Denkstrukturen eine Bedeutung für die Empfänger ergibt, können die rohen Informationen für Lernprozesse wirksam werden (vgl. Wiesner, Schecker, & Hopf, 2018, S. 29). Das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler (SuS) liefert einerseits entscheidende Anknüpfungspunkte des Lernens und kann andererseits ein Hemmnis für das Lernen physikalisch korrekter Vorstellungen darstellen. Das Reservoir an physikalischen Begriffen und Phänomen-Erklärungen, mit denen die SuS in den Unterricht kommen, speist sich aus vielen Alltagserfahrungen und hat sich im umgangssprachlichen Gebrauch bewährt. Die Vorstellungen der SuS stimmen jedoch häufig nicht mit den physikalisch korrekten Konzepten überein oder stehen gar in Widerspruch dazu (vgl. Wiesner, Schecker, & Hopf, 2018, S. 29). Die teilweise sehr stabilen SuS-Vorstellungen können im Physikunterricht durch einen sogenannten Konzeptwechsel in Richtung physikalisch korrekter Sichtweisen umgedeutet werden. Darunter versteht man, dass die SuS von einem Konzept und ihren Vorstellungen zu

einem neuen Konzept, in diesem Fall jenem der physikalischen Sichtweise, wechseln sollen. Hierbei hat sich gezeigt, dass es nicht gelingt, die SuS-Vorstellungen gänzlich zu ‚transformieren‘. Vielmehr ist das Ziel des Unterrichts, darzulegen, dass die physikalische Sichtweise (in bestimmten Situationen) angemessener und praktikabler erscheint als ihre mitgebrachten Vorstellungen. So kommen die SuS etappenweise in Richtung physikalisch korrekter Vorstellungen (vgl. Duit, 2010, S. 2).

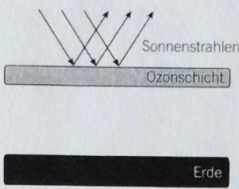
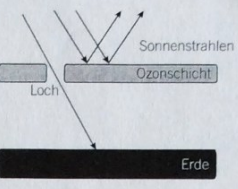
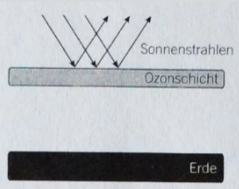
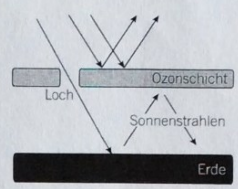
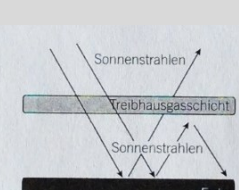
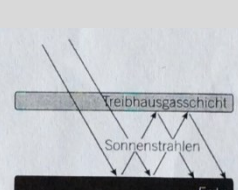
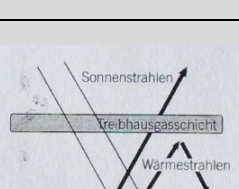
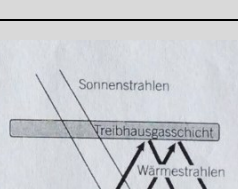
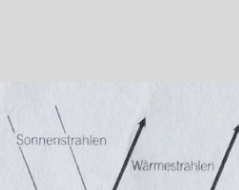
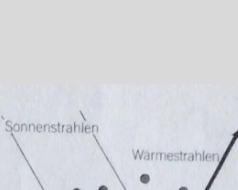
2.1. Wie sich Lernende den Treibhauseffekt vorstellen

Durch die fortwährende Präsenz des Themas können die Modellkonzepte, Vorstellungen und Erklärungsmuster von Seiten der SuS stabiler gegenüber Änderungen sein als bei weitgehend unbekannten physikalischen Phänomenen. Wie stark die SuS-Vorstellungen von jenen der Wissenschaft abweichen, haben verschiedene empirische Studien belegt.

In der Erhebung mit den thematischen Schwerpunkten „Treibhauseffekt“ und „Ozonloch“ von Harsch und Barke (2014), die unter 707 SuS in Deutschland stattgefunden hat, konnten in dem Themenblock Treibhauseffekt folgende Fehlvorstellungen identifiziert werden: 47 % der SuS setzen den Anteil des Kohlenstoffdioxids deutlich zu hoch an, wobei nur 25 % Stickstoff und Sauerstoff als Hauptkomponenten der Luft angeben. Ein ähnlich geringer Anteil der SuS (21 %) weiß von der Beteiligung des Wasserdampfanteils der Luft am Treibhauseffekt. Eine große Mehrheit der Befragten (76 %) setzt pauschal Luftschadstoffe mit Treibhausgasen gleich. Dadurch entsteht folgende Verkettung an Fehlvorstellungen: Treibhausgase seien der Hauptbestandteil der Luft. Da alle Luftschadstoffe Treibhausgase seien, sei der Treibhauseffekt rein anthropogener Natur. In 49 % der erhobenen SuS-Aussagen wird die populäre Fehlvorstellung vertreten, es gebe einen kausalen Zusammenhang zwischen dem Ozonloch und dem Prozess des Treibhauseffekts. Ein Hinweis darauf, dass häufig (21 % der SuS-Erklärungen) auch physikalische Begrifflichkeiten nur unzureichend verstanden werden, ist die Verwechslung von Reflexion und Remission bzw. Absorption. Die Ergebnisse dieser Befragung, welche in der 10. und 12. Jahrgangsstufe durchgeführt wurde, macht große Wissenslücken bzw. Fehlvorstellungen der SuS deutlich (vgl. Harsch & Barke, 2014, S. 409-411). Die SuS-Vorstellungen bzw. deren Beschreibungen zum Treibhauseffekt, welche in naturwissenschaftlichen Leistungskursen erhoben wurden, klassifiziert Niebert (2009) in vier Gruppen. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Komplexität und sind zwei gegensätzlichen Konzepten zuzuordnen. Einerseits wird die Vorstellung vertreten, dass sich die Erwärmung

durch mehr Sonneneinstrahlung ergibt. Andererseits ist die Vorstellung, dass die Erwärmung aus weniger Abstrahlung resultiert, präsent. Die Kategorien der SuS-Vorstellungen sind in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern sowie von Wissenschaftlern zum Mechanismus des Treibhauseffekts (nach Niebert, 2009, S. 21)

Vorstellung	Zitate von Lernenden	Prozess vor der Erwärmung	Prozess bei der Erwärmung	Konzept
Ozonloch	„Das CO ₂ kann nicht vollständig abgebaut werden, frisst sich in die Atmosphäre rein und macht Ozonlöcher. An der Ozonschicht prallt die Strahlung sonst ab, aber mit dem Loch geht mehr Sonneneinstrahlung zur Erde durch.“ (Felix, 18 J.)			Mehr Einstrahlung
Strahlenfalle	„Das CO ₂ greift die Ozonschicht an. Durch das Loch in der Ozonschicht wird die Sonneneinstrahlung stärker und die Temperaturen steigen. Die Wärme wird unter der Ozonschicht verteilt und kann dann nicht wieder raus.“ (Emma, 18 J.)			Mehr Einstrahlung weniger Abstrahlung
Treibhaus mit Sonneneinstrahlung	„Durch den CO ₂ -Ausstoß bildet sich eine Atmosphärensicht. Die Sonnenstrahlen treffen auf die Erde und werden reflektiert. Die Sonnenstrahlen treffen auf die Schicht, können da nicht durchdringen und kommen wieder zur Erde.“ (Daniel, 18 J.)			Weniger Abstrahlung
Treibhaus mit Wärmestrahlung	„Die Lichtstrahlen werden von der Erde absorbiert und in Form von Wärme wieder abgegeben. Durch diese Schicht von Gasen, die immer größer wird, kann die Wärme nicht ins Weltall.“ (Claudia, 18 J.)			Weniger Abstrahlung
Wissenschaftlerzitat				
Dynamische Ungleichgewichte	Die Atmosphäre ist durchlässig für Sonnenstrahlung, jedoch nahezu undurchlässig für die von der Erde emittierte Infrarotstrahlung. Je mehr Treibhausgase in der Atmosphäre sind, desto mehr Strahlung wird absorbiert. Dies führt zu einer Serie von Ungleichgewichten, bis sich ein neues Gleichgewicht auf höherem Temperaturniveau einstellt. (Houghton, J., Physics of the Atmospheres. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.)			Weniger Abstrahlung (im höheren Gleichgewichtszustand)

In der Vorstellung ‚Erwärmung durch Treibhauseffekt‘ können zwei Varianten unterschieden werden. In der Mehrzahl der Fälle beschreiben die SuS die Erwärmung durch ein hin- und her Reflektieren der einmal eingedrungenen Sonnenstrahlen. In einer komplexeren Version beschreiben die SuS die wissenschaftsorientierte Änderung der Strahlungsart von kurzwelligen Sonnenstrahlen in langwelligere terrestrische Abstrahlung. In dem SchülerInnenmodell wird die Absorption und Remission durch den Anteil infrarotaktiver Gase in der Atmosphäre durch eine stabile Gasschicht mit reflexiver Wirkung auf die Strahlung substituiert (vgl. Niebert, 2009, S. 20-23).

Parchmann (1996) zeigte in Ihrer Studie auf, dass Wissensdefizite nicht nur bei Lernenden an Schulen, sondern auch bei Studierenden nachweisbar sind. So konnten nur 20 % der SuS und die Hälfte der Chemiestudierenden den Treibhauseffekt korrekt erklären. Wie bereits in den zuvor genannten Erhebungen verweist Parchmann auf die Unsicherheiten hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie sowie auf die kaum bekannte Umwandlung der Sonnenstrahlen in terrestrische Strahlung. Eine grundsätzliche Verwechslung oder gar Gleichsetzung des Treibhauseffekts mit dem Ozonloch ist in den SuS-Aussagen evident. Eine weitere Gemeinsamkeit mit den anderen Studien ist die auffällige stabile Vorstellung, dass der Treibhauseffekt rein anthropogene Ursachen habe. Die Benennung des natürlichen Treibhauseffekts als Grundvoraussetzung für die Bewohnbarkeit der Erde nannten nur fünf der über 100 Befragten. Eine mögliche Erklärung der fehlenden oder falschen Erklärungsmodelle der SuS sieht die Autorin in den Bemerkungen von Zukunftsängsten vor der Zerstörung der Lebensgrundlage. Zu solchen gehören beispielsweise, dass Kohlenstoffdioxid und Ozon die Atmosphäre angreifen und sich dadurch eine katastrophale Erwärmung einstellt oder dass der Treibhauseffekt die Menschheit zu zerstören drohe (vgl. Parchmann, 1996, S. 33-36). Ein ähnliches Bild zeichnet die Erhebung von Reinfried et al. (2010). Nur ein Viertel bis ein Drittel⁵ der SuS-Vorstellungen hat sich am wissenschaftlichen Konzept orientiert. Eine Ausnahme zeigte jener Abfragebereich, der häufig in den Medien genannte Themen des Zusammenwirkens von klimawirksamen Faktoren und mögliche Folgen eines erwärmenden Klimasystems behandelte. Die Autoren führen dies auf die Aussagen zurück, die mit Allgemeinwissen bewertet werden können, die kein Verständnis der physikalischen Prozesse voraussetzen (vgl. Reinfried, et al., 2010, S. 262, 263). Diese deutschsprachigen Studien sind nur eine Auswahl an einer Vielzahl fachdidaktischer empirischer Erhebungen von SuS-

⁵ Die Erhebungen der SuS-Vorstellungen wurden in drei Gruppen mit $N_{gesamt} = 289$ durchgeführt (vgl. Reinfried, et al., 2010, S. 262)

Vorstellungen zum Themenkomplex Klima unter expliziter Berücksichtigung des Treibhauseffekts, wobei hier einige ergänzend genannt sein sollen:

- Andersson, Björn; Wallin, Anita (2000). Students' understanding of the greenhouse effect, the societal consequences of reducing CO₂ emissions and the problem of ozone layer depletion.
- Chhokar, K., Dua, S., Taylor, N., Boyes, E. & Stanisstreet, M. 2012. Senior Secondary Indian Students' Views about Global Warming, and Their Implications for Education. *Science Education International* 23(2), 133–149.
- Choi, S., Niyogi, D., Shepardson, D. P. & Charusombat, U. 2010. Do Earth and environmental science textbooks promote middle and high school students' conceptual development about climate change? Textbooks' consideration of students' misconceptions. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91(7), 889–898.
- Kilinc, A., Stanisstreet, M. & Boyes, E. 2008. Turkish Students' Ideas about Global Warming. *International Journal of Environmental and Science Education* 3(2), 89–98.
- Koulaidis, V. & Christidou, V. 1999. Models of students' thinking concerning the greenhouse effect and teaching implications. *Science Education* 83(5), 559–576.
- Shepardson, D. P., Choi, S., Niyogi, D. & Charusombat, U. 2011a. Seventh grade students' mental models of the greenhouse effect. *Environmental Education Research* 17(1), 1–17.
- Shepardson, D. P., Niyogi, D., Choi, S. & Charusombat, U. 2011b. Students' conceptions about the greenhouse effect, global warming, and climate change. *Climatic Change*(104), 481–507.

2.2. Das Experiment im Physikunterricht

Experimente sind sicherlich eine besondere Darstellungsform im Unterrichtsalltag. In der wissenschaftlichen Forschung dient das Experiment in enger Abstimmung mit der Theorie zur Überprüfung von Hypothesen sowie einer Neubildung solcher aus den gesammelten Messdaten. Häufig sind die Eckpunkte eines wissenschaftlichen Experiments, d.h. die Planung, der Aufbau und das präzise Sammeln von Daten (bzw. das Analysieren dieser) mit den Ressourcen des Regelunterrichts nicht nachahmbar. Genauso wie diese Aspekte haben auch mehrmalige Adaptierungen der Versuchsanordnung und der Einfluss unvorhergesehener Faktoren in Schulversuchen kaum eine Bedeutung. Vielmehr kommen mit Versuchen⁶ im Unterricht andere Funktionen zum Tragen. Kircher et al. (2007) benennen 14 verschiedene Funktionen, die ein physikalischer Schulversuch ausüben kann (s. Beiträge in Tab. 2). Mediendidaktisch ist das Schulexperiment ein bedeutender Informationsträger. Durch die Visualisierung von physikalischen Phänomenen übernimmt das Experiment eine Mitteilungsfunktion, „die verbal nicht annähernd so eindrucksvoll und anschaulich“ erfolgen kann (vgl. Kircher, Girwidz, & Häußler, 2007, S. 231).

Die Möglichkeit, abstraktes Wissen anhand realer Dinge beziehungsweise Prozesse zu veranschaulichen, macht den ‚Charme‘ von Experimenten aus. Neben der Erkenntnisgewinnung anhand des konkret veranschaulichten Phänomens beinhalten Schulversuche noch

⁶ In der Literatur werden die Begriffe ‚Experiment‘ und ‚Versuch‘ synonym verwendet, so auch in diesem Text.

weitere Funktionen in Hinblick auf zu erwerbende Kompetenzen (s. Abschnitt 2.3, bzw. Lehrpläne, (vgl. BMBWF, 2019)). So werden u.a. handwerkliche Fähigkeiten der SuS angeregt, wenn es darum geht, physikalische Experimente sachgerecht durchzuführen. Damit verbunden ist die Möglichkeit, Einblicke in die naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweise zu geben (vgl. Duit, Tesch, & Mikelskis-Seifert, 2010, S. 2). Die von der Lehrkraft gesetzten Ziele ergeben die Rahmenbedingungen für die Versuchsanordnung im Klassenverband. Welchen Beitrag ein Unterrichtsexperiment an einem Ziel des Physikunterrichts leisten kann ist in Tab. 2 dargelegt.

Tab. 2: Beitrag des Unterrichtsexperiments zu verschiedenen Zielen (aus Wiesner, Schecker, & Hopf, 2018, S. 107)

Ziel des Physikunterrichts	Beitrag des Unterrichtsexperiments
Beitrag des Unterrichtsexperiments	▪ Überzeugende Darstellung eines Phänomens ▪ Veranschaulichung eines Konzepts ▪ Überprüfung physikalischer Gesetze
Begriffswechsel	▪ Erzeugung eines kognitiven Konflikts ▪ plausibles Argument für eine Neuvorstellung
Naturwissenschaftliches Arbeiten	▪ Entwicklung von Fragestellungen und Hypothesen ▪ Versuchsplanung und -durchführung ▪ Auswerten von Daten ▪ kritischer Umgang mit Versuchsergebnissen und deren Verallgemeinerung ▪ Erwerb experimenteller Fähigkeiten
Kommunizieren über Physik	▪ Dokumentation von Versuchen und Daten ▪ Gegenüberstellung und Diskussion unterschiedlicher Ergebnisse und Schlussfolgerungen
Lernen über die Natur der Naturwissenschaften	▪ Anlass zur Diskussion über Wissensentstehung in der Naturwissenschaft
Interesse anregen	▪ Alltagsbezüge aufzeigen ▪ Forschungsexperimente veranschaulichen ▪ Aufmerksamkeit erregen, zum Staunen bringen, unterhalten

Für die Schulpraxis hat sich eine Klassifikation von Experimenten nach ihren methodischen Möglichkeiten als praktikabel erwiesen. Besondere Beachtung gilt hierbei der Einbindung von Experimenten in den verschiedenen Unterrichtsphasen. Je nach gewählter Handlungsstrategie, um ein Themengebiet mit der Klasse zu erarbeiten, können Experimente als Einstiegsversuche, als Erarbeitungsversuche oder Vertiefungsversuche bzw. Verständniskontrolle dienen. Dabei können die an das Experiment gestellten Ziele von einer thematischen Heranführung über eine quantitative Prüfung von Gesetzmäßigkeiten bis hin zum Aufzeigen von Ähnlichkeiten variieren (vgl. Kircher, Girwidz, & Häußler, 2007, S. 235-237). In der Art der Sachbegegnung von Versuchen wird grundsätzlich zwischen dem Real- und dem Modellexperiment unterschieden. In Modellversuchen werden die Sachverhalte nicht direkt abgebildet, sondern indirekt durch Analogien nachgestellt. Hierbei ist es essenziell, den SuS zu verdeutlichen, dass es sich um ein Modell handelt und ihnen die Art der Abstraktion klar zu machen. Es sei

ausdrücklich festgehalten, dass Modellexperimente nicht weniger physikalisch sind als Realexperimente. Viele wissenschaftliche Disziplinen sind auf Modellversuche angewiesen, wie z.B. die Astrophysik, oder greifen (aus Kostengründen) auf sie zurück, beispielsweise die Bautechnik (vgl. Wiesner, Schecker, & Hopf, 2018, S. 108, 109). Hier äußert sich die enge Verbindung der Modellierung theoretischer Vorstellungen mit dem Experimentieren (vgl. Duit, Tesch, & Mikelskis-Seifert, 2010, S. 1).

In der Art der Ausführung wird zwischen lehrerInnen- und schülerInnenzentrierten Schulversuchen unterschieden. Sind Experimente gefährlich (beispielsweise durch das Auftreten von hohen elektrischen Spannungen) oder erfordern sie ein besonderes Geschick in der Art der Ausführung, so werden sie meist, unter Beteiligung einzelner SuS, von Lehrkräften durchgeführt. Dem SchülerInnenexperiment werden vielfältige Wirkungen zugesprochen, die eine lehrerInnenzentrierte Durchführung nicht vermag. Nicht selten wird in diesem Zusammenhang auf das auf Konfuzius zurückgehende Sprichwort verwiesen: „Ich höre und ich vergesse. Ich sehe und ich erinnere mich. Ich tue und ich verstehe.“ In den vorliegenden fachdidaktischen Untersuchungen finden sich jedoch keine empirischen Bestätigungen dafür, dass die mit dem Sprichwort verbundene Erwartungshaltung auf Schülerexperimente zutrifft (vgl. Duit, Tesch, & Mikelskis-Seifert, 2010, S. 3). Generell ist die Lernwirksamkeit von Experimenten hauptsächlich von der Einbettung in den Unterrichtsgang abhängig. Es ist nötig, dass dem Experiment eine sorgfältige Hinführung und Nachbearbeitung im Unterricht zugestanden wird. Nur wenn allen Beobachtern und Beobachterinnen klar ist, was mit dem Versuch demonstriert werden soll, kann ein Zusammenhang zwischen Theorie und Experiment hergestellt werden. Empirische Erhebungen zeigen, dass die Tiefenstruktur des Unterrichts die Lernwirksamkeit erhöhen und Oberflächenmerkmale (beispielsweise Anzahl der durchgeführten Experimente) den Lernerfolg weniger beeinflussen. D.h., wenn der Lernstoff ausreichend strukturiert und die Informationen angemessen portioniert sind und berücksichtigt wird, dass eventuell geforderte Kompetenzen erst erworben werden müssen, stellt das Experiment eine wesentliche Darstellungsform des Physikunterrichts dar. Ist das Ziel bekannt und erscheint die Art des Experiments für den (Vor-)Wissensstand der SuS geeignet, kann das Experiment im Physikunterricht lernwirksam sein und zu einer gesteigerten SuS-Motivation beitragen. Sind diese Rahmenbedingungen gegeben und werden den SuS Lernziele anstelle von Problemlöseziele gegeben, sind Experimente eine effektive Lernmethode im Unterricht (vgl. Wirth, Thillmann, Küsting, Fischer, & Leutner, 2008, S. 372). Auf Grund der Überlegenheit gegenüber anderen Darstellungsformen bestimmte Phänomene zu visualisieren und den in Tab.

2 dargelegten Beiträgen, die ein physikalischer Schulversuch liefern kann, wird von Seiten der Fachdidaktik ein Experimentieren im Unterricht gefordert.

2.3. Absicherung durch den Lehrplan

Die rechtliche Grundlage für die selbstständige Gestaltung des Unterrichtes durch Lehrende stellen die Lehrpläne dar. Darin sind Ziele vorgegeben, über welches Wissen und Können Schülerinnen und Schüler am Ende eines Schuljahrs verfügen sollen. In diesem Abschnitt sollen nur sehr kurze Auszüge aus den Lehrplänen vorgestellt werden, die eine Behandlung des Themenkomplexes Treibhauseffekt im Physikunterricht generell und nicht nur im Lerninhalt „Strahlungshaushalt der Erde“ begrüßen.

Die Lehrpläne der Allgemeinbildenden höheren Schulen (AHS) gliedern sich in mehrere Teile, wobei an dieser Stelle die allgemeinen Bildungsziele (erster Teil) und der fachspezifische Abschnitt Physik (sechster Teil) erwähnt werden sollen. Bereits in den Leitvorstellungen (aus dem ersten Teil) findet sich das Ziel, dass SuS zu „einer sachbezogenen Urteilsbildung vor dem Hintergrund gesellschaftlicher Veränderungen“ u.a. im Bereich der sogenannten Umwelt befähigt werden sollen. „Die Kenntnisse über die Wirkungszusammenhänge der Natur sind als Voraussetzung für einen bewussten Umgang und die Nutzung mit Hilfe der modernen Technik darzustellen.“ Als Voraussetzung für das Analysieren bzw. Lösen von Problemen wird u.a. Modellbildung und Abstraktionsvermögen genannt. Wobei der Zusammenhang zwischen der Realsituation und der Modellbildung immer dargelegt werden soll. Für eine bessere Orientierung in der Umwelt bzw. Mitwelt und für „eine Entwicklung entsprechendem verantwortungsbewussten Handeln“ stellt u.a. die Einsichtsgewinnung technischer Entwicklungen für Gesellschaft und Umwelt ein physikalisches Bildungsziel dar. Eine zusätzliche Wirkrichtung zum natürlichen Treibhauseffekt wird u.a. auf anthropogene Emissionen, die beim Einsatz technischer Entwicklungen entstehen, zurückgeführt (s. Abschnitt 3.4.2) (vgl. BMBWF, 2019, S. 5. Bildungsbereiche).

In der Oberstufe der AHS sieht der Lehrplan vor, dass die SuS zu einem „selbstständigen verantwortungsbewussten Umgang mit der Umwelt befähigt werden“. Die SuS sollen die Bedeutung physikalischer Phänomene im Alltag und der Umwelt erfassen und für ihre Lebensgestaltung nutzen können. Den Bildungsaufgaben ist zu entnehmen, dass der Physikunterricht zu „einem verantwortungsbewussten Umgang mit der Umwelt und der verantwortlichen, rationalen Mitwirkung an gesellschaftlichen Entscheidungen fachspezifisch“

beitragen soll. Die neuen AHS-Oberstufenlehrpläne⁷ stellen den Kompetenzerwerb auf die gleiche Stufe wie die Wissensaneignung. Unter „Kompetenz“ versteht der Gesetzgeber das „Zusammenspiel von Wissen, Fähigkeiten, Fertigkeiten und Haltungen, welche in Handlungssituationen durch die Disposition der Einzelnen zur Geltung kommen“ (vgl. BMBWF, 2019, S. 4. Aufgabenbereiche der Schule). Die didaktischen Grundsätze des Unterrichtsfachs (UF) Physik der 5. bis 8. Klasse sehen vor, dass auf Basis der Lerninhalte Kompetenzen der drei Bereiche „Fachwissen, Experimentieren und Erkenntnisgewinnung“ sowie „Standpunkte begründen und aus naturwissenschaftlicher Sicht bewerten“ durch den Physikunterricht erworben und gefördert werden soll. Das Experiment wird als integraler Bestandteil des UF Physik verstanden und soll in der Unterrichtszeit dementsprechenden Raum gegeben werden. Hierbei sollen die SuS „Fragestellungen anhand naturwissenschaftlicher Experimente Phänomene und Daten aufnehmen und analysieren, sowie anhand von physikalischen Modellen interpretieren“ (vgl. BMBWF, 2019, S. Physik, Didaktische Grundsätze (5. bis 8. Klasse)).

Neben den allgemeinen Bildungsaufgaben und didaktischen Zielen, welche die thematische Auseinandersetzung mit dem Treibhauseffekt im UF Physik zu jederzeit ermöglicht, lässt er sich besonders bei der Behandlung folgender Lerninhalte in den Unterricht integrieren:

In der 3. Klasse des AHS-Lehrplans finden sich der große Thermodynamik-Block „Unser Leben im ‚Wärmebad‘“, in dem sich Begriffe wie die Temperatur, die Wärme bzw. der Wärmetransport finden. Explizit ist hier bereits „die Bedeutung der Wärmeenergie im ökologischen Zusammenhang zu erkennen“ als Bildungsziel genannt, genauso wie „das Gewinnen von Einblicken in globale und lokale Wetter- und Klimaerscheinungen“. In der 5. Klasse ist die Thermodynamik abermals ein großer Teil der physikalischen Bildungsziele, u.a. mit dem Schwerpunkt eines nachhaltigen Umgangs mit der Energie. In der 7. Klasse findet sich „der Strahlungshaushalt der Erde“ als separates Schwerpunktthema im Kompetenzmodul 5 (vgl. BMBWF, 2019, S. Sechster Teil).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Auseinandersetzung mit dem Treibhauseffekt für den Physikunterricht geradezu prädestiniert ist. Vorgeschriebene Bildungsinhalte lassen sich anhand des medial häufig erwähnten Phänomens anschaulich erläutern. Speziell für den Erwerb der Bewertungskompetenz aus naturwissenschaftlicher Sicht

⁷ Die neuen kompetenzorientierten Lehrpläne der AHS-Oberstufe ab der 5. Klasse sind mit 1. September 2018 in Kraft getreten (BGBl. II Nr. 71/2018). Die Lehrpläne der AHS-Unterstufe wurden im Jahr 2000 kundgemacht (BGBl. II Nr. 133/2000) (vgl. BMBWF, 2019).

kann der Treibhauseffekt die gesellschaftliche Meinungsdiversität gut abbilden, welche sich durch wissenschaftliche Publikationen, aber auch durch die öffentliche Darstellung falscher Zusammenhänge nährt. Anhand der vorgestellten Experimente (Kapitel 4) können Eindrücke vermittelt werden, wie z.B. „CO₂ kann wirklich Strahlung absorbieren, ich habe es selbst gesehen“, die über einen rein verbalen Informationstransfer nicht vermittelt werden können. So kann dem Physikunterricht tatsächlich ein Beitrag zur Förderung eines rationalen, fachspezifischen Mitwirkens an gesellschaftspolitischen Diskursen und Entscheidungen von jungen Menschen gelingen.

3. Die Physik der Strahlung und des Treibhauseffekts

Vereinfacht lässt sich sagen, dass alles Leben auf der Erde von der Sonne abhängt. Deren eingestrahlte und folgend im Erdsystem umgesetzte Energie ist der hauptsächliche Antrieb für die Motorik der Atmosphäre (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 1). Auf Grund dieser Stellung der Strahlungsenergie sowie deren Bedeutung für den Prozess des Treibhauseffekts sollen in diesem Kapitel der Strahlungs- und Wärmehaushalt der Erde sowie die dafür notwendige Übersicht skizziert werden.

3.1. Strahlung und ihre Gesetzmäßigkeiten

Jeder Körper oder jedes System, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt (0 K) liegt, emittiert thermisch angeregte Strahlung im selben Ausmaß, wie Strahlung absorbiert werden kann. Diese Strahlung, die auch als Wärmestrahlung bezeichnet wird, stellt, neben der Konvektion und der Wärmeleitung, eine Form des Transports von Energie dar; die verglichen mit den anderen Arten keine Materie als Übertragungsmedium benötigt. Daher kann durch Strahlung auch ein Energieaustausch im Vakuum stattfinden. Wärmestrahlung ist eine elektromagnetische Welle, die sich, unabhängig von ihrer Wellenlänge im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0} = 299\,792\,458\text{ m/s}$ ausbreitet. Die beiden Konstanten unter der Wurzel sind die Permittivität ε_0 , auch als elektrische Feldkonstante bezeichnet, und die magnetische Feldkonstante μ_0 . Dabei stehen die *Wellenlänge* λ und die *Frequenz* ν in folgender Beziehung:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (1)$$

In Abb. 1 ist das elektromagnetische Spektrum von den Röntgenstrahlen bis zu den Radiowellen dargestellt. Das Infrarot-Spektrum grenzt direkt an den sichtbaren, roten Lichtbereich in

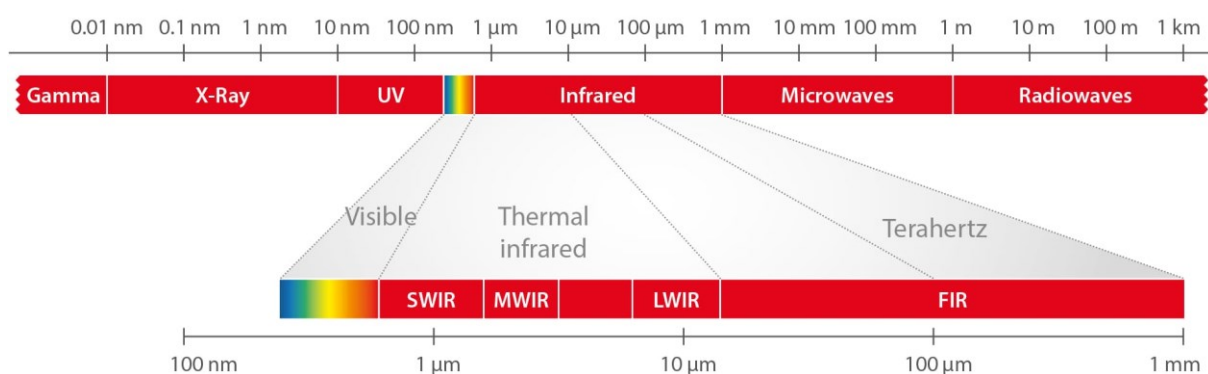


Abb. 1: Elektromagnetisches Spektrum (aus InfraTec GmbH, 2020)

Richtung größer werdender Wellenlängen an und unterteilt sich in den nahen (IR-A von $0,78\ \mu\text{m}$ - $1,4\ \mu\text{m}$), mittleren (IR-B von $1,4\ \mu\text{m}$ - $3\ \mu\text{m}$) und fernen (IR-C von $3\ \mu\text{m}$ - $1\ \text{mm}$) Infrarotbereich.

Aus historischen Gründen wird Wärmestrahlung häufig mit Infrarotstrahlung gleichgesetzt. Diese synonyme Verwendung ist jedoch wenig differenziert, wenn man thermische Strahlung als eine Strahlung definiert, die von einem Körper oder System ausgesandt wird, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt. Damit würden sich als Grenzen für das Spektrum der thermischen Strahlung einerseits Objekte mit der höchsten Temperatur in unserem Universum (kurzwellige Grenze), andererseits Strahlung mit einer Wellenlänge von rund $1\ 000\ \mu\text{m}$ (langwellige Grenze) ergeben. Dieser Spektralbereich, in dem sich auch sichtbares Licht einordnet, geht über jenen der Infrarotstrahlung weit hinaus.

Aus der Thermodynamik wissen wir, dass jeder Körper mit einer höheren Temperatur als seine Umgebung mehr Energie emittiert als er absorbiert, wodurch er sich abkühlt und seine Umgebung erwärmt⁸. Haben der Körper und seine Umgebung die gleiche Temperatur ($T = \text{konst.}$), so befinden sie sich im thermischen Gleichgewicht. Das thermische Gleichgewicht ist nicht zu verwechseln mit dem stationären Zustand eines Systems, welcher einen Gleichgewichtszustand zwischen Energiezufuhr- und -abfuhr bezeichnet, wobei die einzelnen Systemobjekte aber durchaus andere Temperaturen aufweisen (können) wie beispielsweise zwischen Erde und Sonne (vgl. Meschede, 2010, S. 590).

3.1.1. Strahlungsgrößen

Für die weitere Betrachtung ist es zweckmäßig einige Strahlungsgrößen zu erläutern. Der *Strahlungsfluss* (*radiant flux*) mit der Einheit Watt $[S] = \text{J/s} = \text{W}$ beschreibt die emittierte Strahlungsenergie pro Zeit. Er ist physikalisch eine Leistung und wird häufig auch *Strahlungsleistung* genannt. Bezieht man diese auf eine Fläche, so spricht man von der *Strahlungsflussdichte* (*radiant flux density*, $[S_\lambda] = \text{J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2) = \text{W}/\text{m}^2$). Wobei man bei ausgesandter Strahlung von *spezifischer Ausstrahlung* (*radiant exitance*) und bei einfallender von *Bestrahlungsstärke* (*irradiance*) spricht (vgl. Kraus, 2004, S. 97). Die Bestrahlungsstärke wird bei ausschließlicher Betrachtung von Empfängerflächen von Strahlung

⁸ vgl. Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik in der Clausius'schen Formulierung „Wärme fließt natürlicherweise vom warmen zum kalten Körper; sie fließt nicht spontan vom kalten zum warmen Körper“ (Giancoli, 2010, S. 695).

meist als *Intensität* ($[I] = \text{W}/\text{m}^2$) bezeichnet. Für isotrope Strahlungsquellen gilt $S_\lambda = I$ (vgl. Demtröder, 2006, S. 305, 306). Wenn sich Strahlung im Raum ausbreitet, so wird diese Leistung in Bezug auf den Raumwinkel mit der sogenannten *Strahldichte* oder *Radianz* (*radiance*, $[B] = \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$) ausgedrückt. Dabei ist Steradian $[\text{sr}]$, das Standardmaß (SI-Einheit $1 \text{ sr} = 1 \text{ m}^2/\text{m}^2 = 1$) für den Raumwinkel ($\Omega = A/r^2$), der für eine Kugeloberfläche $4 \cdot \pi \text{ sr}$ beträgt. Eine Kugel mit einem Radius von 1 m besitzt eine Oberfläche von $(4 \cdot \pi \approx) 12,566 \text{ m}^2$. Nun stelle man sich eine Kugelkalotte von 1 m^2 auf dieser Kugeloberfläche vor. Verbindet man nun zwei Punkte, die sich auf dem Kalottenumfang 180° gegenüberliegen, mit dem Kugelmittelpunkt, umschließt der entstandene Kegel einen Winkel von $65,54^\circ$. Das ist dann 1 Steradian. Bezieht man die *Strahldichte* auf die Größe *Frequenz* ν oder *Wellenlänge* λ , so spricht man von der *spektralen Strahldichte* ($[B_\lambda] = \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{m})$), auch bekannt als *spektrale Radianz* (vgl. Kraus, 2004, S. 97, 98).

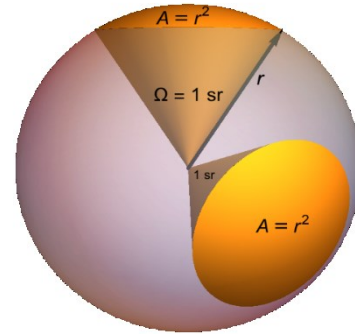


Abb. 2: Graphische Darstellung von 1 Steradian aus zwei Perspektiven (aus wikipedia.org, 2020)

Einen idealisierten Körper, der die gesamte einfallende Strahlung absorbiert $A_\lambda \equiv 1$, bezeichnet man als schwarzen Körper. In der Natur erreicht keine Oberfläche eine vollständige Absorption, jedoch beschreibt die Schwarzkörperstrahlung näherungsweise die Strahlung vieler realer Körper. Experimentell kann man sie mit einem Hohlraum mit absorbierenden Wänden und einer gegenüber der gesamten Innenfläche der Wände kleinen Öffnung realisieren. Die durch diese Öffnung eingefallene Strahlung kann kaum mehr direkt aus dieser wieder austreten, da sie an den Innenwänden oft reflektiert wird, sodass dieser Körper ein *spektrales Absorptionsvermögen* von $A_\lambda \approx 1$ erreicht. Daher wird die Schwarzkörperstrahlung auch häufig als Hohlraumstrahlung bezeichnet. Das *Kirchhoff'sche Strahlungsgesetz* besagt, dass für Strahlung derselben Wellenlänge aus einer thermischen Quelle das Absorptions- und das Emissionsvermögen eines Körpers im thermischen Gleichgewicht immer gleich sind:

$$A_\lambda = E_\lambda \quad (2)$$

Je besser ein Körper absorbiert desto besser strahlt er auch ab. Das Absorptionsvermögen eines Mediums wird ausgedrückt durch:

$$A_\lambda = \frac{\text{absorbierte Strahlungsleistung}}{\text{einfallender Strahlungsleistung}} \quad (3)$$

Das Verhältnis zwischen Absorptions- und Emissionsvermögen ist vom Betrag gleich der *spezifischen Ausstrahlung (radiant exitance)* und gilt für alle Wellenlängen und jede Raumrichtung.

$$\frac{E_\lambda}{A_\lambda} = S_\lambda(T) \quad (4)$$

Der Index λ drückt aus, dass sowohl das Absorptions- als auch das Emissionsvermögen von der Wellenlänge abhängen (vgl. Demtröder, 2005, S. 74, 75). Über die Temperatur eines Körpers ist daher seine Farbe „festgelegt“. Für das Verständnis der folgenden Inhalte sei angemerkt, dass diese Beziehungen auch für Gase gelten (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 5).

3.1.2. Strahlungsgesetze

Die spektrale Strahldichte der Schwarzkörperstrahlung wird durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben:

$$I_\lambda(\lambda, T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T}\right) - 1} \quad (5)$$

Es finden die Wellenlänge λ , die Temperatur T sowie die Planck'schen Wirkungskonstante ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), die Boltzmann-Konstante ($k = 1,380 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$) und die Lichtgeschwindigkeit c Verwendung (vgl. Demtröder, 2005, S. 75-78). Das Gesetz beschreibt jene Energiemenge, die ein schwarzer Körper an unpolarisierter Strahlung pro Zeit-, Flächen-, Raumwinkel- und Wellenlängen-Einheit ausstrahlt (vgl. Kraus, 2004, S. 98).

Mit anderen Worten: Die Verteilungsfunktion der spektralen Strahldichte gibt die theoretisch maximal mögliche Emission an Strahlung von einem Objekt der Temperatur T an. Bei der von einem schwarzen Strahler emittierten Strahlung handelt es sich nicht um einzelne Wellenlängen, sondern um ein unendliches Intervall aus kontinuierlich verteilten Wellenlängen, d.h. einem Spektrum. In Abb. 3 sieht man die Verteilung eines solchen Planck-Spektrums für vier unterschiedliche Temperaturen. Hierbei ist die spektrale Radianz (Ordinate) gegen die Wellenlänge (Abszisse) aufgetragen. Man erkennt, dass die Emissionsleistung mit der Temperatur überproportional steigt. Ebenso weist jedes Spektrum ein Maximum der Strahlungsleistung auf, welches sich bei größer werdenden Temperaturen zu kleineren Wellenlängen hin verschiebt.

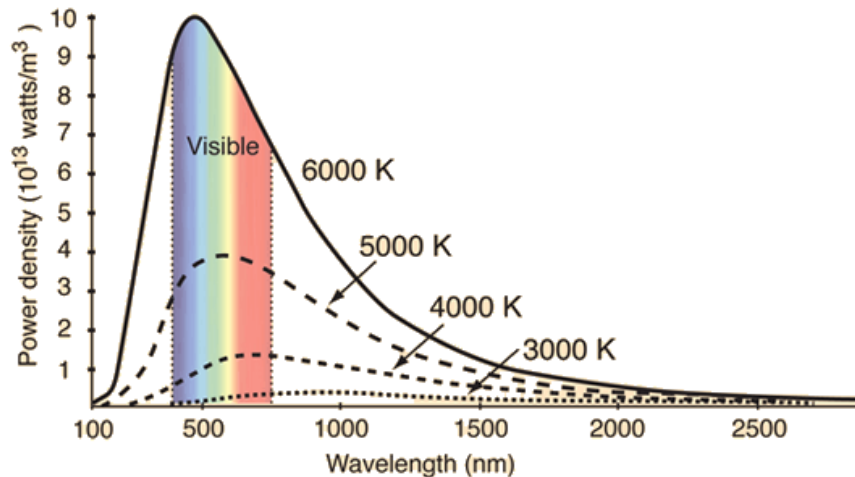


Abb. 3: Spektrale Dichteverteilung von Schwarzkörperstrahlung bei vier verschiedenen Temperaturen (aus Department of Physics and Astronomy, Georgia State University, 2020)

Zur Identifizierung der Lage des Emissionsmaximums differenziert man, mit den Bedingungen $T = \text{const.}$ und $\frac{\delta B_T(\lambda)}{\delta \lambda} = 0$, das Planck'sche Strahlungsgesetz und erhält das *Wien'sche Verschiebungsgesetz*, welches historisch bereits vor dem Zusammenhang von Planck (s. Glg. (5)) bekannt war:

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,8}{T} (\mu\text{m} \cdot \text{K}) \quad (6)$$

Die Wellenlänge des Strahlungsmaximums wird umgekehrt proportional mit steigender Temperatur T kleiner (vgl. Demtröder, 2005, S. 78,79). Dieser Zusammenhang wird beispielsweise in der Astrophysik ausgenutzt, um Temperaturen von Objekten, deren Strahlungsmaximum bekannt ist, außerhalb der Erdatmosphäre zu bestimmen.

Häufig ist man an der gesamten Strahlungsflussdichte interessiert, die ein Schwarzkörper pro Zeit- und Flächeneinheit ausstrahlt. Bei gegebener Temperatur T errechnet sich die gesamte Strahlungsflussdichte durch das *Stefan – Boltzmann – Gesetz*:

$$S(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (7)$$

Die spezifische Ausstrahlung S hängt also einzig von der vierten Potenz der Temperatur ab. Daher spricht man in diesen Zusammenhang auch vom „T-hoch-vier-Gesetz“, wobei σ die Stefan-Boltzmann-Konstante⁹ bezeichnet ($\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$). Man erhält das

⁹ Die Stefan-Boltzmann-Konstante σ ist definiert als $\sigma = (2 \cdot k^4 \cdot \pi^5) / (15 \cdot h^3 \cdot c^2) = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$.

Stefan-Boltzmann-Gesetz durch Integration des Planck'schen Strahlungsgesetzes über alle Wellenlängen und einer weiteren Integration über den Halbraum. Die Fläche unter der Planck-Kurve in Abb. 3 gibt die spezifische Ausstrahlung S aus Formel (7) an. Diese Integration wird erleichtert, wenn es sich um einen sogenannten Lambert-Strahler handelt. Als Lambert-Strahler bezeichnet man alle Strahler, die von ihrer Oberfläche ausgehende Strahlungsintensität in alle Raumrichtungen gleich verteilt (isotrop) aussenden.

Dies ist generell nicht für alle Strahler erfüllt, da die bauliche Umsetzung aufwendig ist. Ebenso ist bei vielen technischen Oberflächen eine Richtungsabhängigkeit von Strahlung gegeben, beobachtbar beispielsweise am metallischen Glanz elektrisch leitender Materialien. Die Erde und die Sonne sind beispielsweise Lambert-Strahler (vgl. Demtröder, 2005, S. 79, 80). Das zuvor beschriebene Intervall von Strahlung thermischer Quellen umfasst alle in der Natur vorkommenden Strahler (s. Seite 15). So strahlt der im sichtbaren Bereich weiße Schnee ebenso schwarz (bei -4°C mit einer Leistung von 297 W/m^2) wie ein frischer Asphaltbelag, auch wenn wir diese thermische Strahlung nicht gleich als ‚Wärmestrahlung‘ empfinden (vgl. Kraus, 2004, S. 105).

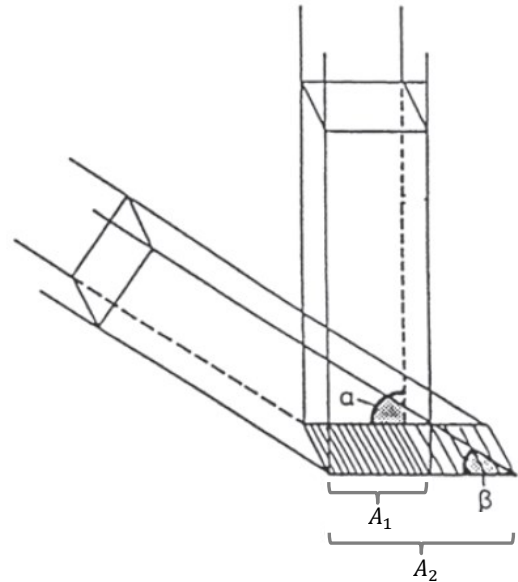


Abb. 4: Lambert'sches Strahlungsgesetz © Häckel, 1999 (aus Klose, 2016, S. 211)

Wird eine Fläche nicht orthogonal, sondern unter einem Winkel bestrahlt, verteilt sich die Strahlungsleistung auf eine größere Fläche (s. Abb. 4). Dadurch wird die Strahlungsintensität I (W/m^2) verringert, denn es gilt das *Lambert'sche Gesetz*.

$$I = I_0 \cdot \sin \beta \quad \text{bzw.} \quad I = I_0 \cdot \cos h \quad (8)$$

Dabei ist die Anfangsintensität I_0 (s. Solarkonstante 3.2.1) um den einschließenden Winkel β zwischen der senkrecht zur Strahlung stehenden Fläche A_1 und jener Fläche A_2 , die tatsächlich bestrahlt wird, verringert. Für meteorologische Betrachtungen spielt meist die Sonnenhöhe (Zenitdistanz) $h = 90^{\circ} - \beta$ eine Rolle (vgl. Klose, 2016, S. 211).

3.1.3. Absorption von Strahlung

Trifft ein Strahlenbündel elektromagnetischer Wellen auf eine Oberfläche eines Körpers, so teilt sich die einfallende Energie auf drei verschiedene Prozesse auf. Ein Teil der einfallenden Strahlung wird reflektiert und mit dem sogenannten *Reflexionsvermögen* ρ beschrieben. Der nicht zurückgeworfene Teil wird einerseits absorbiert (*Absorptionsvermögen* α) und andererseits durchgelassen, wobei man diesen Anteil als das *Transmissionsvermögen* τ beschreibt. Das Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsvermögen sind stoffliche Eigenschaften, welche im Allgemeinen von der Wellenlänge abhängen. Die gesamte einfallende Strahlung wird auf diese drei Prozesse verteilt, wobei für deren Bilanz gilt:

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (9)$$

Das Absorptionsvermögen und das Transmissionsvermögen ist darüber hinaus auch von der Oberflächenbeschaffenheit (Material, Farbe, Rauheit etc.) und der Oberflächentemperatur abhängig, jedoch unabhängig von der einfallenden Strahldichte.

Für einen Schwarzkörper, der alle Strahlung absorbiert (s. Abschnitt 3.1.1) und wellenunabhängig strahlt, gilt: $\rho(\lambda) = \tau(\lambda) = 0$ und $\alpha(\lambda) = A = 1$. Bei Gasen, die in der Regel Strahlung nicht reflektieren, gilt die Bilanz: $\alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$.

Für reale Objekte ist das *spektrale Absorptionsvermögen* A immer kleiner als 1. Die Abstrahlung eines alltäglichen Gegenstands in Bezug auf einen Schwarz-Körper wird durch das *relative Emissionsvermögen* ε (mit $0 \leq \varepsilon \leq 1$) beschrieben. Seine spezifische Ausstrahlung ist daher geringer als die eines Schwarzkörpers bei gleicher Temperatur (vgl. Meschede, 2010, S. 597). I_λ sei die monochromatische Intensität der Strahlung des Körpers bei gegebener Temperatur T , die kleiner als die entsprechende Intensität eines Schwarzkörpers sei:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{\text{abgestrahlte Strahlungsleistung}}{\text{spezifische Strahldichte eines schwarzen Strahlers}} \equiv \frac{I_\lambda}{B_\lambda(T)} \quad (10)$$

Reale Strahler, die sich verhalten wie ein schwarzer Strahler, werden als „Graue Strahler“ bezeichnet. Die Näherung an das Schwarzkörper-spektrum wird mit dem Emissionsgrad $\varepsilon(\lambda)$ vorgenommen:

$$\begin{aligned} \alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) = 1 &\rightarrow \text{schwarzer Körper} \\ \alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) = \text{const} < 1 &\rightarrow \text{grauer Körper} \end{aligned} \quad (11)$$

Dass das Konzept des Graustrahlers nur eine Approximation eines echten Körpers ist, soll Abb. 5 verdeutlichen, in der die spezifische Strahldichte eines schwarzen, eines grauen und eines realen Körpers schematisch gegenübergestellt sind. Das komplexe Strahlungsverhalten aller Körper ist durch die Quanten-Dynamik der Materie bestimmt.

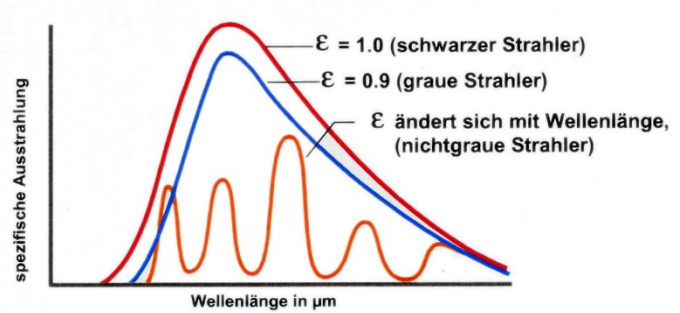


Abb. 5: Schematische Gegenüberstellung der Spektren spezifischer Ausstrahlung eines schwarzen, grauen und nicht-grauen Strahlers (aus Keller HCW GmbH, 2020)

Die in der Materie existierenden Energiezustände können durch quantenmechanische Auswahlregeln beschränkt in andere Energiezustände übergehen. Die Energie für den Übergang in ein höheres Energieniveau wird der einfallenden elektromagnetischen Strahlung entnommen, wodurch diese beim Durchlaufen eines Mediums geschwächt wird. Einzelne Wellenlängen werden ausgelöscht, sodass sich die Gesamtintensität verringert. Der Verlust der Intensität wandelt sich in andere Energieformen, besonders in Wärme, um. Diese Abschwächung wird durch das *Bouguer – Lambert – Beer – Gesetz* beschrieben.

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad (12)$$

Hierbei ist I_0 die gesamte Intensität der Strahlung vor Eintritt in das Medium und α der *Absorptionskoeffizient* des Mediums, der stoffabhängig ist. Je kleiner der Wert von α ([1/m]), desto durchlässiger bzw. transparenter ist das Medium gegenüber elektromagnetischer Strahlung. I ist die Intensität nach Austritt und x der im Medium zurückgelegte Weg bzw. die sogenannte Eindringtiefe. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c von elektromagnetischen Wellen im Vakuum reduziert sich in Abhängigkeit von dem durchlaufenden Medium, in dem die Ausbreitung stattfindet ($c = c_0/n(\lambda)$, mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 und dem Brechungsindex n des Mediums). Die wellenabhängige Veränderung der Ausbreitungsrichtung elektromagnetischer Strahlung bezeichnet man als Dispersion. Ein bekanntes Beispiel ist die Aufspaltung des weißen Lichts durch ein Prisma. Bei gelösten Stoffen in einem praktisch durchsichtigen Medium wie Wasser oder Luft ist der Absorptionsbeitrag proportional zur Konzentration C ([g/l] oder [mol/cm³]). Das Absorptionsspektrum ist mitunter das wichtigste Mittel zur Charakterisierung von Stoffen (vgl. Demtröder, 2009, S. 227, 228) (vgl. Klose, 2016, S. 211) (vgl. Meschede, 2010, S. 573-575).

Dieses Absorptions- und Emissionsverhalten beruht auf Übergängen zwischen Elektronen-, Schwingungs- und/oder Rotationsenergiezuständen von Atomen und Molekülen. Die Gesetze der Quantenmechanik legen enge Grenzen für die an den Übergängen beteiligten Energiezustände fest. Bei der Absorption wird ein Photon mit der Differenzenergie zwischen Anfangs- und Endzustand eingefangen bzw. bei der Emission abgestrahlt. Eine Absorption findet statt, wenn die einfallende Strahlung gemäß $\Delta E = h \cdot \nu$ genau der Differenz zweier Energieniveaus des absorbierenden Moleküls entspricht. Dadurch erscheint eine Spektrallinie bei der Wellenlänge, die der Übergangsenergie entspricht. Speziell bei Gasen mit nur relativ wenigen strahlungsaktiven Übergängen entstehen Bandenspektren, die stark wellenlängenabhängig sind (vgl. Bakan & Raschke, 2002).

Mehratomige Moleküle können auf verschiedene Weise schwingen. Betrachtet man ein aus N Atomen bestehendes Molekül, in dem jedes Atom drei Freiheitsgrade der Bewegung hat, so ergeben sich in Summe $3N$ Freiheitsgrade. Die Translation des Schwerpunkts benötigt drei Freiheitsgrade. Bei nichtlinearen angeordneten Molekülen¹⁰ benötigt man drei Freiheitsgrade für die Rotation um die drei Hauptträgheitsachsen durch den Schwerpunkt. Für die verschiedenen Schwingungsformen bleiben daher bei nichtlinearen Molekülen $3N - 6$ Freiheitsgrade übrig. Bei linearen Molekülen entspricht die Rotation des Moleküls um seine Achse keiner wirklichen Rotation des Kerngerüsts, sondern nur einer Rotation der Elektronenhülle. Daher gibt es für lineare Moleküle $3N - 5$ Freiheitsgrade für die Schwingung (Vibration) (vgl. Demtröder, 2005, S. 328).

In der Natur kommen diese Anregungsformen nicht nur getrennt vor. So sind Vibration und Rotation nicht völlig unabhängig voneinander, es ergibt sich ein sogenanntes Rotations-schwingungsspektrum. Die Gesamtenergie $E = E_{rot} + E_{vib} + E_{pot}$ muss natürlich erhalten bleiben. Daher findet in einem schwingenden Molekül, das auch rotiert (schwingender Rotator), „ein ständiger Energieaustausch zwischen Rotation, Schwingung und potentieller Energie statt“ (Demtröder, 2005, S. 307). Bei genügend kleinen Schwingungsauslenkungen der Atomkerne eines Moleküls treten lineare Rückstellkräfte auf, die zu harmonischen Schwingungen der Kerne führen. Diese Schwingungen werden als Normalschwingungen bezeichnet, wenn bei jedem Schwingungsvorgang alle Kerne zeitgleich durch die Ruhelage gehen, sodass Gesamtimpuls und Gesamtdrehimpuls des Kerngerüsts Null sind. D.h. es liegt Translation (Schwerpunktverschiebung) und keine Rotation vor. In Abb. 6 sind die Normalschwingungen

¹⁰ Die Beschreibung der Moleküle als linear beziehungsweise als nichtlinear bezieht sich auf die geometrische Struktur des Moleküls (s. Abb. 6).

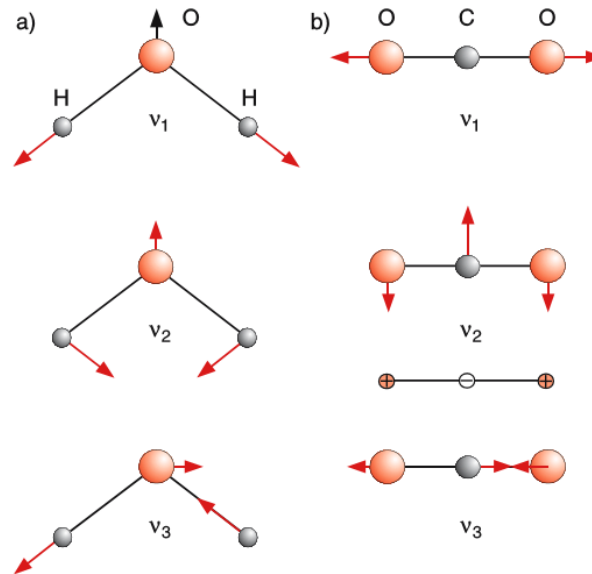


Abb. 6: Normalschwingungen (symmetrische Streckschwingung ν_1 , Knick-/Biegeschwingung ν_2 , antisymmetrische Streckschwingung ν_3), (a) eines nichtlinearen (H_2O) und (b) eines linearen (CO_2) dreiatomigen Moleküls (aus Demtröder, 2005, S. 328)

eines nichtlinearen dreiatomigen Moleküls (3 Schwingungsfreiheitsgrade) und eines linearen dreiatomigen Moleküls (4 Schwingungsfreiheitsgrade) dargestellt. Die beiden Knickschwingungen des linearen Moleküls ((b) ν_2 in Abb. 6, wobei die untere Darstellung die Schwingung in die Bildebene, die obere Darstellung senkrecht dazu skizziert) haben die gleiche Schwingungsfrequenz, weshalb sie energetisch entartet und daher doppelt zu zählen sind (vgl. Demtröder, 2005, S. 328). Für die Absorption benötigt das Atom oder Molekül ein sogenanntes Dipolmoment, das durch einen nichtlinearen Aufbau permanent vorhanden ist oder es durch Schwingungen erhalten kann (Polarisierbarkeit). Nur Moleküle mit einem permanenten Dipolmoment können elektromagnetische Strahlung auf reinen Rotationsübergängen absorbieren (vgl. Demtröder, 2005, S. 303). Im Allgemeinen sind Moleküle elektrisch neutral, können jedoch ein elektrisches Dipolmoment besitzen. Wenn die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladung nicht zusammenfallen, spricht man von einem elektrischen Dipol, der im Falle zweier Punktladungen ($+q$ und $-q$) im Abstand d definiert ist als $p = q \cdot d$ [$\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{m}$] (vgl. Haken & Wolf, 2006, S. 25-27). Die Rotationsübergänge sind vor allem im gasförmigen Zustand beobachtbar, da sie im flüssigen Zustand stark behindert sind. Bei kristallinen Festkörpern können die Moleküle nicht rotieren. Die quantenmechanischen Auswahlregeln kann man sich wie folgt veranschaulichen: Für einen ortsfesten Beobachter erscheint das Dipolmoment eines polaren Moleküls bei Rotation veränderlich. Daher ist die Rotation von Molekülen mit einem permanenten Dipolmoment gegenüber der optischen Absorption aktiv. D.h. ihre Rotation führt bei übereinstimmender Übergangsfrequenz zur Absorption elektromagnetischer Strahlung (vgl. Haken & Wolf, 2006, S. 160).

3.2. Solare und terrestrische Strahlung

In der Atmosphäre sind folgende Strahler wirksam:

- die Sonne,
- irdische Körper und Oberflächen,
- atmosphärische Gase sowie
- die in der Atmosphäre vorhandenen Wolken und Aerosolteilchen.

Die Sonne strahlt mit einer Strahlungstemperatur von ca. 5 800 K. Gemäß dem Planck'schen Strahlungsgesetz (s. Gleichung (5)) liegen 99 % der emittierten Strahlung innerhalb eines Wellenlängenbereichs von 0,2 μm und 5 μm . Die Temperatur der irdischen Körper, Gase und Teilchen liegt bei grob geschätzten 300 K. Nach Planck liegen 99 % der emittierten Strahlung zwischen 4 μm und 100 μm . Daraus ergibt sich der meteorologisch interessante Wellenlängenbereich von 0,2 μm bis 100 μm , in dem sich die hauptsächlich wirkenden Vorgänge in der Atmosphäre ereignen (vgl. Kraus, 2004, S. 107). Wobei jedoch erwähnt sei, dass beispielsweise für Fernerkundungsmethoden neben dem gesamten IR-Bereich auch der Mikrowellenbereich zur Erfassung atmosphärischer Parameter von Bedeutung ist. Für die Untersuchung der sogenannten Hochatmosphäre wiederum werden Messungen im kürzeren Wellenlängenbereich durchgeführt. Neben der sichtbaren und infraroten Strahlung spielt die UV-Strahlung für stratosphärische Prozesse und dadurch für die Bewohnbarkeit der Erde eine entscheidende Rolle (vgl. Kraus, 2004, S. 97). Die von der Sonne ausgehende Strahlung gelangt aber nur zu einem Bruchteil auf die Erdoberfläche, sodass sich das Planck'sche Spektrum stark reduziert. Die atmosphärischen Vorgänge reduzieren ebenso die Planck'schen Spektren der irdischen Strahlung. So ergibt sich eine sehr geringe Überlappung im Wellenlängenbereich zwischen 4 μm und 5 μm mit geringen Energien. Daher ist es für meteorologische Betrachtungen zweckmäßig, die beiden Spektralbereiche, die *solare* (0,4 μm - 5 μm) und die *terrestrische* (3 μm - 100 μm) *Strahlung*, getrennt zu definieren (vgl. Kraus, 2004, S. 107, 108). Diese klare Unterscheidung ist für die Interpretation von Strahlungsmessdaten in der Atmosphäre entscheidend. So ist es möglich, Strahlung in Bodennähe oder oberhalb der Atmosphäre ihrer Quelle, d.h. Sonne oder Erdatmosphäre, zuzuordnen.

3.2.1. Die solare Strahlung und ihre ‚Konstante‘

Die Energie, welche die Sonne emittiert, speist sich aus Kernfusionen von H zu He im zentrumsnahen Sonneninneren, welche als Photonen (Gamma-Strahlungsquanten) emittiert wird. Diese gelangen über die Strahlungs- (Absorption und Remission) und Konvektionszone (konvektiver Energietransport) an die Sonnenoberfläche, die Photosphäre. Von der Photosphäre aus wird beinahe die gesamte Sonnenstrahlung emittiert, da aufgrund der geringen Dichte der sich anschließenden Chromosphäre diese kaum einen Beitrag leistet. Vom Entstehungsort der Photonen bis zu ihrer Abstrahlung an der Photosphäre dauert es viele 10^5 Jahre. Die Oberflächentemperatur der Sonne beträgt $T_{eff} = 5\,777\text{ K}^{11}$ (vgl. Hanslmeier, 2014, S. 228-240). Gemäß dem Wien'schen Verschiebungsgesetz liegt das Maximum ihres Spektrums bei einer Wellenlänge von ca. $0,5\text{ }\mu\text{m}$ (grünes Licht). Die Empfindlichkeit der Photosynthese sowie die unserer Augenrezeptoren sind optimal auf das Sonnenlicht angepasst. Da die Sonnenatmosphäre Anteile der solaren Strahlung absorbiert (Fraunhofer-Linien), weicht ihr Spektrum von dem eines Schwarzkörpers ab (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 26).

Das Licht der Sonne benötigt für die mittlere Entfernung zwischen Sonne und Erde von ca. $149,6 \cdot 10^6\text{ km}$ ungefähr 8 Minuten 20 Sekunden (vgl. Malberg, 2002, S. 39). Die Entfernung

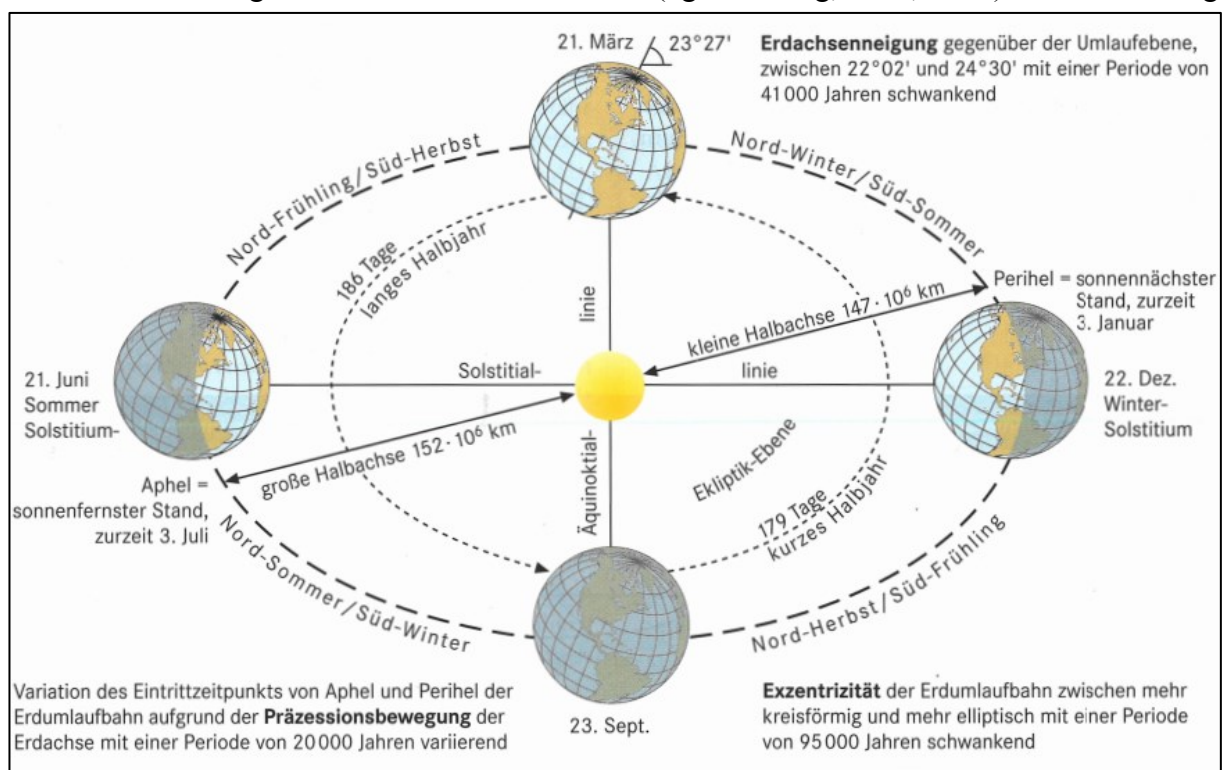


Abb. 7: Umlauf der Erde um die Sonne mit einer Ekliptik von $23,5^\circ$; Entstehung der Jahreszeiten (aus Gebhardt, Glaser, Radtke, & Reuber, 2011, S. 199)

¹¹ Als effektive Strahlungstemperatur (T_{eff}) bezeichnet man jene Temperatur eines beliebigen Körpers, die ein Schwarzkörper, der dieselbe Strahlungsenergie emittiert, besitzt (vgl. Kraus, 2004, S. 108).

der Erde zur Sonne ändert sich auf Grund der schwach exzentrischen Ellipsenbahn auf der die Erde um die Sonne kreist. Die Erde ist dabei um $23,5^\circ$ zu ihrer Bahnebene geneigt, die sogenannte Ekliptik. Auf Grund dieser Neigung variiert die Einstrahlenergie der Sonne räumlich und zeitlich stark. Eine Folge davon sind Sommer und Winter. In Abb. 7 ist der Umlauf der Erde aus heliozentrischer Perspektive veranschaulicht. Für einen Beobachter auf der Erde ergibt sich zwischen den beiden Wendekreisen eine scheinbare Sonnenbahn, die je nach geographischer Breite und Jahreszeit variiert (vgl. Gebhardt, Glaser, Radtke, & Reuber, 2011, S. 198, 199). An den beiden Äquinoktien (Tag-und-Nacht-Gleiche) ist keine der beiden Hemisphären ausgezeichnet, da die Sonnenstrahlen normal auf der durch die Bahnebenennormalen und der Erdachse aufgespannten Ebene stehen (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 3).

Die Strahlungsenergie der Sonne (Irradianz¹²), die von einer senkrecht zur Strahlrichtung orientierten Fläche oberhalb der Atmosphäre (extraterrestrisch) bei einem mittleren Abstand zwischen Sonne und Erde ($149,6 \cdot 10^6$ km) empfangen wird, bezeichnet man als *Solarkonstante* S_0 (vgl. Kraus, 2004, S. 108). Gemittelt über ein Jahr beträgt sie derzeit:

$$S_0 = (1\,368 \pm 7) \text{ W/m}^2 \quad (13)$$

Die Entfernung zwischen Erde und Sonne variiert zwischen Aphel ($1\,350 \text{ W/m}^2$) und Perihel ($1\,440 \text{ W/m}^2$) (siehe Abb. 7). Demzufolge variiert auch die Bestrahlungsstärke mit einer Änderung von knapp 7 % (vgl. Klose, 2016, S. 212). Die in der Literatur angegebenen Werte schwanken ohne eindeutige Tendenz zwischen $1\,360 \text{ W/m}^2$ und $1\,370 \text{ W/m}^2$ (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 19).

Gemessen wird der Wert der Solarkonstanten von Flugzeugen, Ballons oder Satelliten, durch welche die zuverlässigsten Messungen erfolgen. Erst diese Messungen¹³ veranlassten die Wissenschaft dazu, die ‚Solarkonstante‘ nicht mehr als konstant anzunehmen. Sie variiert in einer auffälligen Parallelität zum 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus. Sonnenflecken sind kühlere Areale der Sonnenoberfläche, die eine Abstrahlung verringern. Begleitet werden Sonnenflecken von sogenannten Sonnenfackeln (Faculae) und Protuberanzen, welche die Verringerung der abgestrahlten Energie durch die Sonnenflecken überkompensieren. Die Solarkonstante schwankt in Abhängigkeit der Sonnenaktivität, wobei mittels Radiometer eine

¹² Strahlungsflussdichte der von der Sonne kommenden über alle Wellenlängen integrierten Strahlung, s. 3.1.1 Strahlungsgrößen.

¹³ Radiometerdaten an Bord der 1978 gestarteten Nimbus 7 beziehungsweise der 1980 gestarteten Mission ‚Solar Maximum‘ (vgl. Voiland, 2010).

durchschnittliche Veränderung der Sonneneinstrahlung um 0,1 % beobachtet wird¹⁴. Mit steigender Sonnenaktivität nimmt auch die Bestrahlungsstärke zu (vgl. Voiland, 2010). Bereits im 17. Jahrhundert wurden Sonnenflecken entdeckt und seither regelmäßig beobachtet. Dank dieser Aufzeichnungen wissen wir, dass es auch längerfristige Zyklen der Sonnenaktivität gibt (vgl. Schönwiese, 2013, S. 110-112).

Die Erde wird nur auf einer Halbkugel von der Sonne angestrahlt und erhält somit nur den Ausschnitt der Solarkonstanten mit einer Kreisfläche von $\pi \cdot R_{Erde}^2$. Innerhalb eines Tages wird jedoch die gesamte Erde bestrahlt, deren gesamte Oberfläche $4 \cdot \pi \cdot R_{Erde}^2$ beträgt. Im globalen Mittel beträgt die extraterrestrische Strahlungsflussdichte daher nur mehr (vgl. Klose, 2016, S. 212, 213):

$$S_0 = \frac{\pi \cdot R_{Erde}^2}{4 \cdot \pi \cdot R_{Erde}^2} = \frac{S_0}{4} \approx 342 \text{ W/m}^2 \quad (14)$$

3.2.2. Terrestrische Strahlung

Die Erde erhält Energie aus dem Weltall nur über die Strahlungsflüsse. Soll sich die Erde dabei nicht erwärmen, so muss sie wiederum selbst Energie ins Weltall abgeben, und zwar im selben Maße wie sie sie erhält. Ebenso wie die Sonne ist die feste und flüssige Erdoberfläche in guter Näherung ein schwarzer Strahler. Die durchschnittliche Temperatur der Erdoberfläche liegt bei 15°C bzw. 288 K. Nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz (s. Gleichung (6)) ergibt sich ein Emissionsmaximum (bei 10 μm) im infraroten Wellenlängenbereich. Die Strahlungsleistung der Erde kann damit angegeben werden mit:

$$S_{Erde} = 4 \cdot \pi \cdot R_{Erde}^2 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{Erde}^4 \quad (15)$$

Dabei handelt es sich um die gesamte Abstrahlung (Kugeloberfläche $4 \cdot \pi \cdot R_{Erde}^2$) ausgehend von der globalen Strahlungsgleichgewichtstemperatur T_{Erde} . Da sich der Planet aber nur näherungsweise wie ein idealer Schwarzstrahler verhält, weicht der Emissionskoeffizient ε von 1 ab ($\varepsilon = 0,95$). Die Atmosphäre absorbiert und emittiert nur bestimmte Wellenlängenbereiche und verhält sich daher nicht wie ein Schwarzkörper. Sie ist durchschnittlich etwas kühler als die Erdoberfläche. Die Vorstellung der terrestrischen Strahlung fällt schwer, da die Luft im selben Wellenlängenbereich absorbiert und emittiert. D.h. das Luft gleichzeitig undurchsichtig

¹⁴ Der größte kurzfristige Rückgang von 0,34 % wurde 2003 durch den NASA Satelliten SORCE gemessen (vgl. Voiland, 2010).

und selbst strahlend ist, je nach Wellenlänge. Parallel dazu sind die Absorptions- und Reflexionseigenschaften von Stoffen im infraroten anders als im sichtbaren Bereich. Beispielsweise ist frisch gefallener Schnee im Infrarotbereich ($\alpha = 0,995$) schwärzer als jeder Ruß im sichtbaren Bereich. Oberflächen wie Sand, Gras oder auch Wolken absorbieren die terrestrische Strahlung mit 90% oder mehr (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 42, 43). Je nach Klimazone, die durch verschiedene Intensitäten der Sonnenstrahlung bedingt ist (s. Abb. 7), variiert auch die Ausstrahlung von Ort zu Ort der Erdoberfläche (s. Gleichung (6)).

Albedo

Trifft Strahlungsenergie auf eine Grenzfläche, so wird ein Teil dieser auftreffenden Strahlung wieder zurückgeworfen. Für einen hohen Anteil an Reflexionsenergie muss die Oberflächenrauigkeit kleiner sein als die Wellenlänge der in Betracht gezogenen elektromagnetischen Strahlung. Der Anteil an zurückgeworfener Strahlungsenergie wird in Prozent ausgedrückt und Albedo genannt. Mit *Albedo* bezeichnet man im Allgemeinen das relative Reflexions- und Rückstrahlvermögen eines Körpers in Relation zur einfallenden Strahlung. Auf die Erde bezogen muss man zwischen dem Gesamtrückstreuvermögen (planetare Albedo) und der Bodenalbedo, die stark von der Beschaffenheit der Erdoberfläche abhängt, unterscheiden. So können einfallende Strahlen gänzlich, teilweise oder gar nicht reflektiert werden. Die Albedo kann für größere Areale gemittelt angegeben werden, beispielsweise für schneebedeckte Tundren mit 80 %, für verschneite Waldflächen mit rund 40 %, für vegetationsbedeckte mittlere

Tab. 3: Reflexionsvermögen verschiedener Erdoberflächen und Wolken bei solarer Einstrahlung ($0,3 \mu\text{m} - 4 \mu\text{m}$ Wellenlänge) in Prozent (aus Klose, 2016, S. 223)

	Albedo
Wasser (Sonnenhöhe 40-50°)	7 – 10
Wasser (Sonnenhöhe 20°)	20 – 25
Frischer Schnee	75 – 95
Alter Schnee	40 – 70
Reines Gletschereis	30 – 45
Seeis	30 – 40
Sandfelder (trocken)	35 – 45
Tonböden (trocken)	20 – 35
Haufenwolken	70 – 90
Schichtwolken	40 – 60
Grasfläche	10 – 20
Getreidefelder	15 – 25
Schwarzerde	5 - 15

Breiten mit 16 % und für die Ozeane der Tropen und mittleren Breiten mit rund 8 % (vgl. Klose, 2016, S. 223). In Tab. 3 sind Werte für die Albedo verschiedener Oberflächen der Erde angegeben.

Die Gesamtalbedo für die Erdoberfläche mit einem Ozeananteil von 71 %, der wechselnden Oberflächenbeschaffenheit der 29 % Landmasse sowie unter Berücksichtigung der Bewölkung beträgt 0,3. Sprich 30 % der an der Atmosphärenengrenze einfallenden Strahlung wird in den Weltraum zurückreflektiert (vgl. Malberg, 2002, S. 44). Dadurch reduziert sich die global gemittelte solare Strahlungsflussdichte (s. Gleichung (14)), die die Erde absorbiert, auf 239 W/m^2 (vgl. Kraus, 2004, S. 110). Der reflektierte Anteil der solaren Einstrahlung wirkt sich nicht auf den Energiehaushalt der Erdatmosphäre aus für den nur die Nettoeinstrahlung relevant ist. Durch die Albedo der Erde wird diese vom Weltraum aus erst sichtbar. Auch der Mond wird erst durch die irdische Reflexion auf seiner Nachtseite beleuchtet (vgl. Hantel, 2001, S. 352).

3.3. Die Atmosphäre und ihre Wirkung auf Strahlung

Das Gleichgewicht zwischen Gravitationswirkung der Erde und den Eigenbewegungen der Moleküle und Atome in der Lufthülle sorgt dafür, dass die Erdatmosphäre sich nicht verflüchtigt (vgl. Klose, 2016, S. 15). Sie modifiziert die solare Einstrahlung, sodass nur ein geringer Anteil des Sonnenlichts transmittiert wird und direkt auf die Erdoberfläche einfällt. Ein Teil der Strahlung wird an Gasmolekülen und Aerosolen gestreut, wobei davon ein relativer

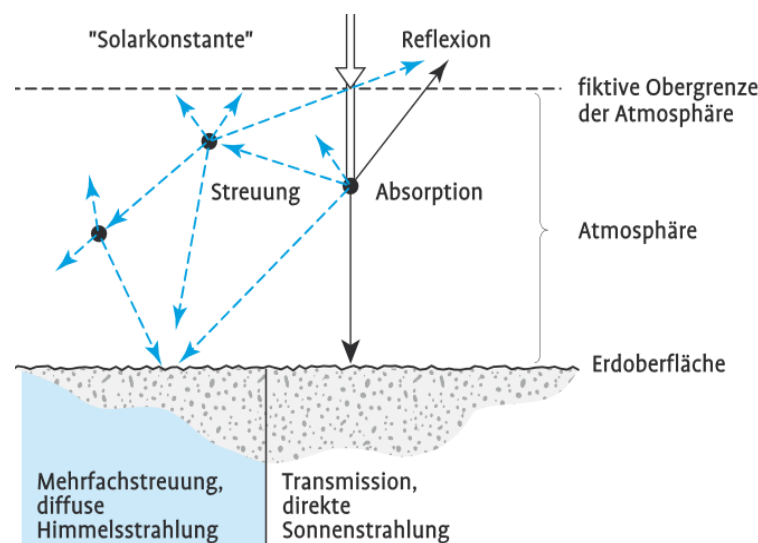


Abb. 8: Schematische Darstellung der atmosphärischen Extinktion der Sonneneinstrahlung (aus Schönwiese, 2013, S. 116)

Anteil durch Mehrfachstreuung die Erdoberfläche erreicht. Neben der Streuung tritt eine weitere Schwächung der Strahlungsintensität des Sonnenlichts in der Atmosphäre auf: die Absorption. Bei der Absorption ‚verschluckt‘ ein Körper Strahlung bestimmter Wellenlänge, während andere Wellenlängen reflektiert oder transmittiert werden. Diese selektive Absorption findet bei verschiedenen Luftmolekülen statt, welche nachfolgend noch erläutert werden. Die Abschwächung der Strahlung durch Streu- und Absorptionsprozesse wird zusammengefasst als Extinktion bezeichnet und ist schematisch in Abb. 8 veranschaulicht (vgl. Klose, 2016, S. 219, 220). Die horizontale Sichtweite der Atmosphäre wird meist im Wellenlängenbereich von 550 nm angegeben, da hier die Maxima sowohl der Sonnenstrahlung als auch des Sehvermögens liegen. Die Abschwächung der Strahlung durch Streu- und Absorptionsprozesse wird zusammengefasst als *Extinktionskoeffizient* $\sigma(\lambda)$ und über die Messstrecke als homogen angenommen. Dabei wird Gleichung (12) zu:

$$I = I_0 \cdot e^{-\sigma(\lambda) \cdot x} \quad (16)$$

Bei lokalen Sichtweitenmessungen wird der integrale Wert herangezogen, der vom Mittelwert stark abweichen kann (beispielsweise örtlich begrenzte Nebelwand). Neben den Gasmolekülen tragen auch Wassertröpfchen, Schnee- und Eiskristalle und andere feste Partikel (Aerosole), deren Durchmesser von 100 µm bis 1 mm reichen, zu einer Sichttrübung der Atmosphäre bei. Man bezeichnet sowohl einen Extinktionskoeffizienten für Luftmoleküle als auch einen für Aerosole (vgl. Klose, 2016, S. 211, 212).

Die Reflexion der Solarstrahlung findet hauptsächlich an Aerosolen und Wolken, aber auch an der Erdoberfläche direkt statt (s. Abschnitt 3.2.2). Sie sorgt dafür, dass sich die Energiezufuhr der Sonne an der Erdoberfläche reduziert (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 25).

Die Streuung des Sonnenlichts hat ebenso wie die Reflexion keinen direkten Anteil am Treibhauseffekt. Auf Grund ihrer Bedeutung für die menschliche Wahrnehmung der Atmosphäre soll sie kurz erwähnt werden. Durch die Wechselwirkung der Sonnenstrahlung mit den Luftmolekülen, Wassertröpfchen, Eiskristallen und Aerosolen in der Atmosphäre wird das Sonnenlicht u.a. gestreut. D.h. dass sich die Ausbreitungsrichtung der Photonen in Abhängigkeit von der Größe der Partikel (Streuzentren) ändert. Die Streuung des Sonnenlichts ist Voraussetzung für die Helligkeit unserer Umgebung. Trifft unpolarisiertes Licht der Sonne auf ein Molekül der Erdatmosphäre, werden die Ladungsschwerpunkte unter dem Einfluss der elektromagnetischen Strahlung verschoben und zu erzwungenen Schwingungen angeregt (polarisiert). Durch die schwingenden Ladungen emittiert das Molekül wiederum schnell

Strahlung, dessen Intensität am stärksten in Ausbreitungsrichtung ist (vgl. Giancoli, 2010, S. 1211, 1212). Bei der Streuung des Sonnenlichts in der Atmosphäre muss zwischen zwei Fällen unterschieden werden:

- Einerseits der *Rayleigh – Streuung*, der Streuung an Zentren, die klein gegenüber der Wellenlänge des Lichts sind (beispielsweise Luftmoleküle, aber auch kleine Aerosolpartikeln mit einer Lineardimension von $\leq 0,1 \mu\text{m}$).
- Andererseits der *Mie – Streuung*, der Streuung an Zentren, die nicht mehr klein gegenüber der Wellenlänge sind (beispielsweise Aerosolteilchen, Dunstpartikel, Wolken- und Nebeltröpfchen) (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 27, 28).

Bei der Rayleigh-Streuung ist die Streuung wellenlängenabhängig ($1/\lambda^4$). Blaues Licht wird stärker gestreut als rotes, wodurch uns der Himmel blau erscheint. Kurz vor Sonnenuntergang ist der zurückgelegte Weg der Strahlung innerhalb der Atmosphäre maximal. In dem an Wolken und Dunst reflektiertem Licht wurde der blaue Anteil herausgestreut, wodurch der Himmel für uns rötlich erscheint. Bei Streuung an größeren Zentren (Mie-Streuung) gilt die $1/\lambda^4$ -Abhängigkeit nicht mehr. Die beispielsweise in den Wolken enthaltenen Wassertröpfchen und Eiskristalle streuen alle Wellenlängen ca. gleich stark, weshalb uns Wolken weiß (oder grau, wenn sie Schatten reflektieren) erscheinen (vgl. Klose, 2016, S. 213-219) (vgl. Giancoli, 2010, S. 1212).

3.3.1. Absorption solarer Strahlung durch atmosphärische Gase

Bereits in Abschnitt 3.1.2 wurde die Absorption von Strahlung diskutiert. Erst die Absorption von Infrarotstrahlung ermöglicht den Treibhauseffekt. Jedoch wird nicht nur diese Art von Strahlung, sondern bereits Teile der Solarstrahlung werden von atmosphärischen Bestandteilen absorbiert. In Abb. 9 sind drei Spektren gegenübergestellt. Konkret handelt es sich dabei um das solare Spektrum an der Oberfläche der Atmosphäre, das Spektrum eines Schwarzkörpers bei einer Temperatur von 5 800 K (vgl. die Sonne strahlt mit 5 777 K, s. Abschnitt 3.2.1), sowie das nach dem Durchtritt der Atmosphäre an der Erdoberfläche ankommende Spektrum der Sonnenstrahlung. Vergleicht man die beiden Spektren, die an der Erdoberfläche ankommende solare Strahlung mit jener außerhalb der Atmosphäre, so wird deutlich, dass gewisse Bereiche durch Extinktionsprozesse innerhalb der Atmosphäre geschwächt werden. Man erkennt den Einfluss der Streuung, der die Intensität über das gesamte Spektrum reduziert, wobei dieser mit zunehmender Wellenlänge geringer wird. Ozon hat in dem Bereich von $0,22 \mu\text{m}$ und $0,35 \mu\text{m}$

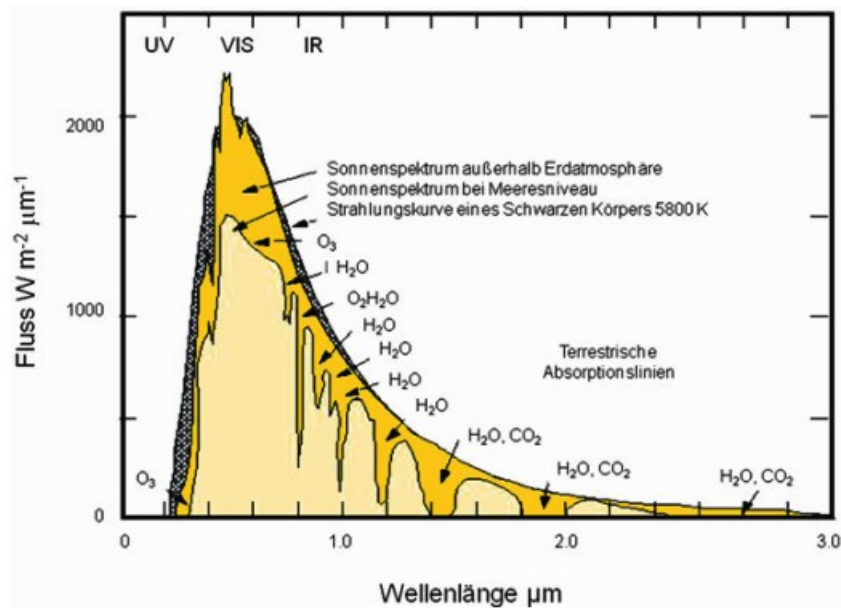


Abb. 9: Das Sonnenspektrum an der Atmosphärenoberfläche und auf Meeresspiegelhöhe, sowie ein Schwarzkörperspektrum bei $T = 5800\text{ K}$ (aus Hanslmeier, 2014, S. 232)

eine starke Absorptionsbande, sodass das solare UV-Licht unterhalb von $0,35\text{ }\mu\text{m}$ weitgehend und unterhalb von $0,30\text{ }\mu\text{m}$ beinahe vollständig ausgelöscht wird. Eine schwache Absorptionsbande von Ozon zeigt sich noch im sichtbaren (grünen) Bereich. Dank der in der Stratosphäre befindlichen Ozonschicht wird das hochenergetische UV-Licht, welches organische Bindungen zerstören kann und damit lebensfeindliche Eigenschaften in sich birgt, von der Erdoberfläche ferngehalten. Der Wasserdampf zeigt Absorptionsbanden der solaren Einstrahlung bei $0,72, 0,81, 0,93, 1,13, 1,37\text{ }\mu\text{m}$ und $1,85\text{ }\mu\text{m}$. Des Weiteren zeigen H_2O und andere atmosphärische Bestandteile Absorptionsbanden im fernen Infrarot, die für die solare Strahlung nicht sehr ins Gewicht fallen (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 26, 27). Die relativ geringe Strahlungsabsorption im Wellenlängenbereich von $0,4\text{ }\mu\text{m} - 0,78\text{ }\mu\text{m}$ sorgt für ein beinahe ungehindertes Erreichen der Solarstrahlung auf die Erdoberfläche. Dieses durchlässige Intervall bezeichnet man als atmosphärisches Fenster des sichtbaren Lichts.

Mit der Solarkonstante als Bezugswert an der Atmosphärenobergrenze kann der weitere Verlauf der Sonnenstrahlung wie folgt skizziert werden:

- Ein Teil der Strahlung wird in der Atmosphäre absorbiert (rund 23 %), wodurch sich diese erwärmt.
- Das Sonnenlicht wird teilweise an den Luftmolekülen sowie an Dunst und Wolken gestreut, wobei ein Teil des Streulichts zurück in den Kosmos gelenkt wird, der andere Teil in Richtung Erdoberfläche.

- Die Erdoberfläche selbst streut einen geringen Anteil der solaren Einstrahlung ebenso zurück. Die Summe aus diesem und dem Anteil der Streuung aus oben erwähnten Vorgängen, der nicht die Erde erreicht, wird als planetare Albedo bezeichnet (rund 30 %; s. Abschnitt 3.2.2).

Das heißt rund 47 % der global gemittelten solaren Einstrahlung wird an der Erdoberfläche absorbiert. Die Summe aus der restlichen direkten Sonnenstrahlung und der diffus in der Atmosphäre gestreuten bezeichnet man als *Globalstrahlung*¹⁵. Der genaue Wert hängt von der Lufttrübung und der Zenitdistanz der Sonne ab. Bei geschlossener Schichtbewölkung beträgt die Globalstrahlung noch rund 1/4 von jener bei wolkenlosem Himmel. Die angegebenen Werte sind mit teilweise starken Unsicherheiten behaftet. Dank Satellitenmessungen sind extraterrestrische Größen (Einstrahlung und Rückstreuung) genauer bekannt. Bei inneratmosphärischen Prozessen gibt es teilweise widersprüchliche Angaben, da noch nicht alle Vorgänge genau verstanden werden. So ist beispielsweise die Rolle der Wolken in Hinblick auf ihre Absorptionswirkung noch unklar (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 21-23). Einerseits erhöhen Wolken die planetare Albedo, womit sich der für die Erde zur Verfügung stehende Strahlungsfluss reduziert. Andererseits absorbieren sie die terrestrische Ausstrahlung, womit sich die langwellige Ausstrahlung in den Weltraum reduziert (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 58).

3.3.1. Die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre

Bevor auf den Wärmehaushalt der Erde eingegangen wird (s. Abschnitt 3.4), soll zuvor noch ein Überblick der dafür wichtigen atmosphärischen Bestandteile gegeben werden, die diesen beeinflussen. Grundsätzlich unterscheidet man in der Zusammensetzung der Erdatmosphäre zwischen permanenten Hauptbestandteilen (N_2 , O_2 , Ar), den permanenten Spurengasen (H_2 , N_2O sowie den anderen Edelgasen) und den variablen, räumlich und zeitlich stark schwankenden Anteilen (vor allem H_2O , CO_2 , CH_4 , O_3 , SO_2 , CO und weiteren anthropogenen Spurengasen). Da die Menge der Edelgase und der variablen sowie permanenten Spurengase so gering ist, werden diese Anteile meist nicht in Prozent, sondern in millionstel (parts per million (ppm) = 10^{-6}) oder in milliardstel (parts per billion (ppb) = 10^{-9}) Anteile eines Luftpakets angegeben (vgl. Klose, 2016, S. 16, 17). Auf Grund der hohen Variabilität des Wasserdampfanteils wird die chemische Zusammensetzung meist von trockener Luft, d.h. von

¹⁵ Oder Insolation (incoming solar radiation).

wasserdampffreier Luft, angegeben (s. Tab. 4). Die Summe der stofflichen Zusammensetzung der realen Luft muss noch gegenüber den Angaben aus Tab. 4 erweitert werden. So befinden sich in der irdischen Lufthülle noch andere gasförmige, aber auch flüssige und feste Bestandteile (z.B. Aerosole) aus natürlichen (beispielsweise Vulkanen) sowie teilweise anthropogenen Quellen. Von besonderer Bedeutung ist der in Tab. 4 unerwähnte Wasserdampf, der das wichtigste Gas für den Treibhauseffekt darstellt. Dabei kann der Volumenanteil von Wasser bis zu 4 % betragen. Die Spurengase haben trotz ihres geringen Volumenanteils ($3 \cdot 10^{-5}$) eine enorme Bedeutung für atmosphärische Prozesse (s. Abschnitt 3.4), womit sie zentrale Beobachtungsobjekte der Luftchemie darstellen (vgl. Kraus, 2004, S. 23, 24).

Tab. 4: Zusammensetzung der troposphärischen wasserdampffreien Luft. Die mit * gekennzeichneten Gase sind durch anthropogene Einflüsse gegenüber der vorindustriellen Zeit deutlich erhöht. (vgl. Kraus, 2004, S. 24) (vgl. Malberg, 2002, S. 6) (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 15)

Gas	Chem. Symbol	Volumenanteil
Stickstoff	N ₂	0,7808
Sauerstoff	O ₂	0,2095
Argon	Ar	0,0093
Kohlenstoffdioxid	CO ₂ *	0,0004
Neon	Ne	$1,8 \cdot 10^{-5}$
Helium	He	$5,2 \cdot 10^{-6}$
Methan	CH ₄ *	$1,8 \cdot 10^{-6}$
Krypton	Kr	$1,1 \cdot 10^{-6}$
Wasserstoff	H ₂ *	$5,6 \cdot 10^{-7}$
Stickoxydul (Lachgas)	N ₂ O*	$3,2 \cdot 10^{-7}$
Kohlenmonoxid	CO*	$9,0 \cdot 10^{-8}$
Xenon	Xe	$8,7 \cdot 10^{-8}$
Ozon	O ₃ *	$4,0 \cdot 10^{-8}$

Die Spurengaskonzentration kann räumlich und zeitlich in Abhängigkeit vorhandener Senken und Quellen variieren. Insgesamt werden durch turbulente horizontale und vertikale Austauschprozesse die Bestandteile in der Luft gut durchmischt. Dieser Teil der Atmosphäre, der bis in etwa 100 km Höhe über der Erdoberfläche reicht, wird daher Homosphäre genannt. Innerhalb dieses Bereichs, in dem sich beinahe die gesamte irdische Luft befindet, überwiegt der turbulente Austausch gegenüber der molekularen Diffusion. Erst in der nach der Homopause beginnenden Heterosphäre tritt eine Entmischung der einzelnen Gase ein. Die mittlere freie Weglänge der Moleküle ist größer als die turbulente Verschiebungslänge, sodass die thermische Bewegung hier stärker ist (vgl. Klose, 2016, S. 18).

Wie bereits in Abschnitt 3.2.2 gezeigt, emittiert auch die Erde Strahlung gemäß Gleichung (15). Wie für die von der Sonne kommende Strahlung gilt auch für die terrestrische Strahlung, dass Teile dieser in der Atmosphäre absorbiert werden. Daher kann die von der Erde abgestrahlte

Energie nicht zur Gänze ins Weltall entweichen. Im Zusammenhang mit dem Treibhauseffekt sind vor allem jene atmosphärischen Anteile von Interesse, welche die terrestrische Strahlung absorbieren. Zweiatomige homonukleare Moleküle können nur symmetrische Schwingungen ausführen, bei welchen die Ladungsschwerpunkte konstant bleiben. Die beiden Hauptbestandteile der irdischen Atmosphäre N_2 und O_2 können die von der Erde abgestrahlte Energie nicht absorbieren, da sie kein Dipolmoment besitzen. Daher sind sie nicht nur für die solare, sondern auch für die terrestrische Strahlung transparent, womit sie den Energiehaushalt der Erde nicht beeinflussen. Auf Grund ihres Volumenanteils sorgen sie jedoch dafür, dass infrarotaktive Moleküle Spurengase sind. Moleküle wie CO_2 , H_2O , NH_3 oder O_3 besitzen, wegen ihrer Doppelbindung, ein permanentes Dipolmoment, sodass sich auch erlaubte Schwingungs-Rotations-Übergänge ergeben. Daher absorbieren sie im Bereich der terrestrischen Abstrahlung und beeinflussen damit die Wärmebilanz der Erdatmosphäre trotz ihres geringen Dichteanteils entscheidend (vgl. Demtröder, 2005, S. 311). Die Absorption kurzer Wellenlängen ($< 0,5 \mu\text{m}$) findet in der Erdatmosphäre in der Regel durch atomare Übergänge statt. Im Wellenlängenbereich oberhalb des sichtbaren Lichts dominieren Absorptionsvorgänge durch Energieübergänge zwischen Rotations- und Schwingungszuständen. Es existieren viele erlaubte Übergänge der Rotationsenergieniveaus zu einem Schwingungsübergang. Durch die Nähe der verschiedenen Absorptionslinien entstehen sogenannte Absorptionsbanden (vgl. Bakan & Raschke, 2002). Auf Grund ihrer absorbierenden und streuenden Wirkung haben Aerosolpartikel ebenso eine enorme Wirkung auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre und auf das irdische Klima (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 16).

In Abb. 10 ist die Strahlungsabsorption der bereits erwähnten infrarotaktiven Gase der Wellenlänge gegenübergestellt. Hierbei sind die blauen Bereiche jene bei denen Strahlung absorbiert wird, wobei der Absorptionsgrad in Prozent angegeben ist. In den weißen Bereichen wird die elektromagnetische Strahlung transmittiert. Bei der Absorption der kurzwelligen Strahlung sind sowohl O_2 als auch O_3 beteiligt. Die Bande bei $9,6 \mu\text{m}$ wird durch O_3 verursacht, da O_2 im langwelligen Bereich nicht absorbiert. Die Hauptabsorber für die terrestrische Strahlung sind Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid. Atmosphärisches H_2O absorbiert stark im Wellenlängenbereich zwischen $5 \mu\text{m}$ und $8 \mu\text{m}$ (Rotationsschwingungsbande) und ab rund $16 \mu\text{m}$ (Rotationsbande). CO_2 weist starke Absorptionsbanden bei $2,6 \mu\text{m}$; $4,3 \mu\text{m}$ und zwischen $13 \mu\text{m}$ und $17 \mu\text{m}$ auf (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 46, 47).

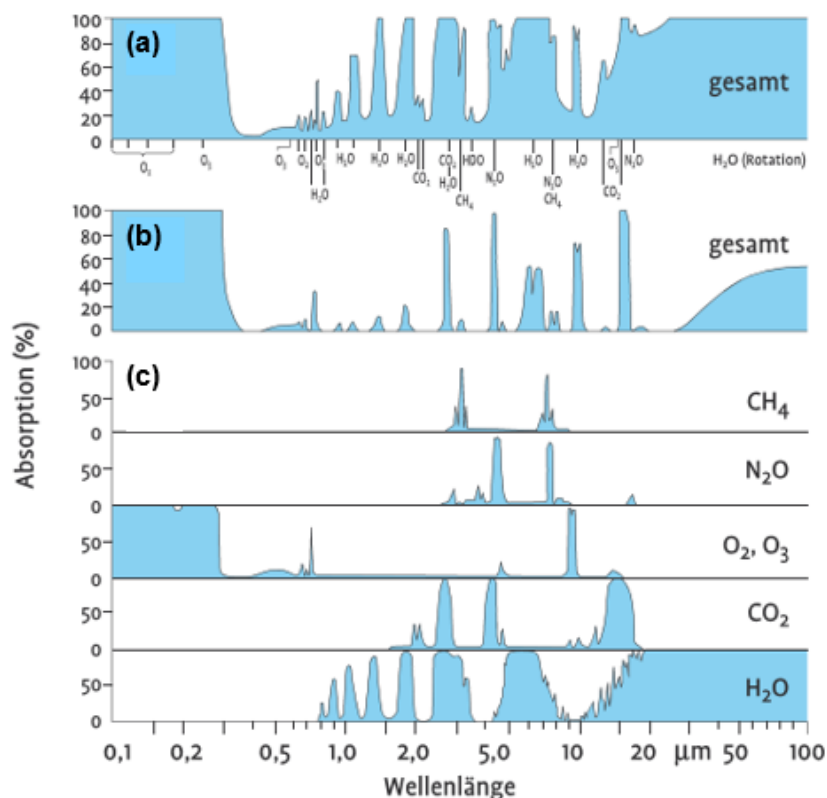


Abb. 10: Absorptionsspektren (blaue Bereiche absorbieren, weiße Bereiche sind durchlässig) der gesamten Atmosphäre in Bodennähe (a), an der Tropopause (b) sowie die Absorptionsbanden der wichtigsten infrarotaktiven atmosphärischen Gase (c) (aus Schönwiese, 2013, S. 121)

Im kleinen Wellenlängenbereich zwischen 3,4 μm und 4,1 μm kann die terrestrische Abstrahlung nahezu ungehindert die Atmosphäre passieren (vgl. Malberg, 2002, S. 50). In dem effektiven Fenster einer wolkenfreien Atmosphäre, welches zwischen 7,5 μm und 13 μm frei bleibt, wirken die genannte Ozonabsorption und die Absorption von Methan und Distickstoffoxid, welche Banden zwischen 7 μm und 8 μm aufweisen. Bei tiefliegenden Wolken reduziert sich die Abstrahlung und kann auf fast Null zurückgehen (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 46, 47).

Atmosphärischer Wasserdampf

Wasser ist in allen Aggregatzuständen in der Atmosphäre vorhanden (1 bis 4 Volumenprozent). Eiskristalle und Wassertröpfchen sind für das menschliche Auge sichtbar, beispielsweise als Wolken, hingegen ist der Wasserdampfgehalt unsichtbar. Der überwiegende Teil des Wassers in der Atmosphäre ist gasförmig, selbst in Wolken ist der Wasserdampfgehalt um ein Vielfaches größer als der Flüssigwassergehalt. Die Verdunstung über den tropischen Ozeanen stellen die Hauptquelle des atmosphärischen Wasserdampfs dar. Die Menge des

Wasserdampfgehalts in einem Luftpaket ist temperaturabhängig und nimmt auf Grund der vertikalen Temperaturabnahme in der Troposphäre mit der Höhe rasch ab. Daher konzentriert sich rund die Hälfte des Wasserdampfs in Bodennähe bzw. befinden sich 90-95 % unterhalb einer Höhe von 5 km. Von seinen Quellen ausgehend wird der Wasserdampf durch advective Prozesse auf- und polwärts transportiert. Durch Niederschlagsbildung wird das Flüssigwasser aus der Troposphäre abgegeben. Die Verweildauer eines Wassermoleküls dort beträgt circa vier bis zehn Tage. In der Stratosphäre kann ein Wassermolekül zwischen 100 und 500 Tagen existieren, da hier keine Niederschlagsprozesse auftreten (vgl. Klose, 2016, S. 19, 20). Das H_2O dominiert den natürlichen Treibhauseffekt. Im Vergleich zu teilweise langen Lebensdauern gewisser Spurengasen in der Atmosphäre ist Wasserdampf gesteuert von Kondensation und Verdunstung äußerst inhomogen verteilt (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 16).

Atmosphärisches Ozon

Neben Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Methan zählt das dreiatomige Ozon (O_3) zu den wichtigsten Spurengasen in der Atmosphäre. Auf Grund seiner stark oxidierend wirkenden Struktur zerstört es fast alle organischen Verbindungen. Unter Einwirkung ultravioletter Strahlung auf Sauerstoff entsteht Ozon auf natürliche Weise. Den größten Ozonanteil (rund 90 %) gibt es in der Stratosphäre (10 ppm), wohingegen die Ozonkonzentration in der Troposphäre nur 15 ppb bis 50 ppb beträgt, in stark verschmutzter Luft (Smogsituation) auch bis zu 500 ppb. In die Troposphäre gelangt Ozon durch Transportvorgänge aus der Stratosphäre oder durch photochemische Oxidation von Kohlenwasserstoffen (beispielsweise Kohlenstoffdioxid, Methan) unter Beteiligung von Stickoxiden und Wasserdampf. Die Reaktionssubstanz Stickoxid wird unter anderem bei Verbrennungen anthropogener Quellen freigesetzt (Chapman-Zyklus der Ozon-Erzeugung).

Neben einer inhomogenen Verteilung der Ozonmengen zwischen dem Äquator und den Polen besteht ebenso ein Konzentrationsunterschied zwischen der Nord- und der Südhalbkugel. Global betrachtet dünnt die Ozonkonzentration aus, obwohl sich der troposphärische Ozongehalt auf der Nordhalbkugel um rund 1 % pro Jahr erhöht. Das stratosphärische Ozon absorbiert die UV-Strahlung über weite Spektralbereiche (UVC 200 nm – 290 nm vollständig, UVB 290 nm – 320 nm teilweise). Durch die stratosphärische Abnahme des Ozons gelangt mehr UVC-Strahlung auf die Erdoberfläche. Da O_3 auf Grund seiner Beschaffenheit (s. Abb. 6) eine Verstärkung des Treibhauseffekts bewirkt, erhöht sich infolgedessen auch die

Temperatur der Troposphäre. Gerade die langwellige Strahlung der Erde wird durch Ozon mit seinen Absorptionsbanden bei Wellenlängen von $\lambda = 4,8; 5,8; 6,7 \mu\text{m}$ und $9,6 \mu\text{m}$ absorbiert (vgl. Klose, 2016, S. 20-23).

„Als Ozonloch bezeichnet man ein Gebiet mit extrem hohen Ozonverlusten, sodass es im Verlauf weniger Wochen zu einer raschen Ausdünnung der Ozonschicht kommt“ (Klose, 2016, S. 30). Beobachtet wird das Ozonloch seit 1979. In den 1980er Jahren wuchs es um jährlich 2 Mio. km^2 , in den 1990er Jahren um 0,5 Mio. km^2 . Bereits 1985 war es mit 25 Mio. km^2 doppelt so groß wie der arktische Kontinent und erreichte seine größte Ausdehnung mit 29 Mio. km^2 im Jahr 2006. Durch die Reaktion mit Chlor reduziert sich das Ozon in der Atmosphäre. Ausgangspunkt der chemischen Reaktionen, an deren Ende reaktives Chlor steht, sind halogene Gase anthropogener Abstammung, insbesondere Chlor, Fluor, Brom und Jod (vgl. Klose, 2016, S. 30-34). In den 1970er Jahren stellte man fest, dass Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (sogenannte FCKW oder Freone) ozonzerstörend wirken. Solche FCKW fanden u.a. als Treibgas in Spraydosen, als Beigabe in Baustoffen oder als Kühlmittel in Gefrier- oder Klimaanlage Anwendung. Ohne Wechselwirkung steigen diese bis zur Stratosphäre auf, wo sie unter UV-Strahlung Ozonmoleküle zerstören. Die allermeisten in Verwendung stehenden FCKW wurden gegen FKW (Fluorkohlenwasserstoffe) ohne dieser ozonschädigenden Wirkung ersetzt (s. Abschnitt 3.4.2).

Kohlenstoffdioxid

Verglichen mit Wasserdampf und Ozon weist das CO_2 eine einheitliche Volumenkonzentration in der Atmosphäre auf, die jahreszeitliche Schwankungen (biologisch bedingt) von rund 10 ppm unterliegt. Des Weiteren wird ein jährlicher Anstieg zwischen 1,3 ppm bis 1,5 ppm beobachtet (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 16). Kohlenstoffdioxid weist kein permanentes Dipolmoment auf, wodurch es auch keine Rotationsübergänge besitzt. Allerdings kann bei gewissen Schwingungen ein Dipolmoment induziert werden. Das Schwingungsverhalten von CO_2 setzt sich aus den abgebildeten Eigenschwingungen zusammen, die für eine Absorption in den Wellenlängenbereichen von $2,6 \mu\text{m}$ (Biegeschwingung), $4,3 \mu\text{m}$ und rund $15 \mu\text{m}$ (asymmetrische Streckschwingung) sorgen (s. Abb. 6). Da zur Infrarotabsorption eine periodische Änderung des Dipolmoments nötig ist, kann man am linearen Aufbau des CO_2 -Moleküls erkennen, dass nicht alle Schwingungen infrarotaktiv sind (vgl. Haken & Wolf, 2006, S. 197).

Neben den natürlichen Quellen sind vor allem die Emissionen anthropogener Verbrennungen von Kohlenwasserstoffverbindungen (Kohle, Erdgas, -öl) Ursache für eine erhöhte CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Gleichzeitig werden Senken, die CO₂ aus der Atmosphäre herausziehen, reduziert, beispielsweise durch Rodung des tropischen und borealen Waldes. Neben der Verbrennung und Landnutzung ist die Zementproduktion¹⁶ ein maßgeblicher Kohlenstoffdioxid-Emitter. Der CO₂-Anteil ist vom Jahre 1800 mit (280 ± 10) ppm auf derzeit über 400 ppm gewachsen. Das bedeutet einen Anstieg von circa 43 % in den letzten 200 Jahren, womit eine Änderungsrate erreicht ist, die es nur zu massiven Klimaänderungen in der Vergangenheit gab. Mehr als die Hälfte der ab der industriellen Periode emittierten CO₂-Emissionen sind in der Land-Biosphäre und den Ozeanen gebunden, die wesentliche Senken darstellen (vgl. Klose, 2016, S. 44, 45).

Gemessen wird der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre mittels Infrarotspektrometern. Die ersten Messwerte wurden 1957 in Kalifornien und am Südpol aufgezeichnet. Heute wird die Kohlenstoffdioxidkonzentration an über 100 Orten weltweit gemessen. Die Messreihen zeigen, dass die Konzentration eine ausgeprägte Tages- und Jahresschwankung aufweist. Durch die fehlenden Photosyntheseprozesse in der Nacht ist die Luft CO₂-angereicherter als am Tag. Der Jahresgang ist daher durch die Wachstumsrhythmen in den außertropischen Bereichen und damit der jahreszeitlichen Schwankung der jeweiligen Erdhalbkugel geprägt. Der Beginn der Heizperiode, in der vermehrt Kohlenstoffdioxid ausgestoßen wird, ist ebenfalls für Schwankungen innerhalb eines Jahres verantwortlich. Über den Ozeanen ist die Schwankungsbreite geringer als über den Landflächen. Maxima in den Konzentrationswerten treten während Smog-Situationen¹⁷ auf (vgl. Klose, 2016, S. 44-46).

Methan

Verglichen mit Kohlenstoffdioxid ist Methan 20- bis 40-mal treibhauswirksamer und weist eine Konzentration von ungefähr 1,8 ppm auf. Dies bedeutet nach Angaben der IPCC einen Anstieg von 150 % zu seinem vorindustriellen Niveau (vgl. IPCC, 2014, S. 44). Die jährliche Wachstumsrate der Methankonzentration in der Atmosphäre liegt derzeit bei 5 ppb bis 8 ppb und damit bei rund der Hälfte des jährlichen Anstiegs in den 1990er Jahren. Methan entsteht durch Fäulnisprozesse organischer Stoffe unter Luftabschluss in Feuchtgebieten. Die Vergärung von Mikroorganismen in Sümpfen, Mooren, Tundren und Permafrostböden sowie in den

¹⁶ „Die energieintensiven Baumaterialien Zement und Stahl sind für einen wesentlichen Anteil des Gesamt CO₂-Ausstoßes der Welt verantwortlich, alleine die Zementproduktion verursacht ca. 7 Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen, der gesamte Bausektor ist bis zu 40 Prozent der Emissionen verantwortlich“ (Konnerth, 2020).

¹⁷ Beispielsweise. „Londoner Nebel“ 1952; Sommersmog-Ereignisse in Los Angeles seit den 1940er Jahren.

tropischen Regenwäldern sind die natürlichen Quellen des farb- und geruchlosen Gases, das ebenso bei Vulkanausbrüchen ausgestoßen wird. Anthropogene Methan-Quellen sind u.a.: der Nassreisanbau, die intensive Großviehlandwirtschaft, die Biomassevergärung und Mülldeponien (vgl. Klose, 2016, S. 46, 47).

Distickstoffoxid

Distickstoffoxid zählt zu den permanenten Spurengasen der Atmosphäre mit einer Verweildauer von rund 120 Jahren. Es ist ein farbloses, leicht süßlich schmeckendes Gas mit dem Vulgo-Namen ‚Lachgas‘, welches eingeatmet zu einem rauschartigen Zustand führt und krampfartige Lachanfälle hervorruft. Die Lachgas-Konzentration in der Atmosphäre liegt bei ca. 320 ppb bei einer jährlichen Wachstumsrate von 0,8 ppb. Die hauptsächlichsten anthropogenen Distickstoffoxid-Quellen sind der Abbau von Düngemittel in verdichteten Böden, der Verkehr sowie die chemische Industrie (vgl. Klose, 2016, S. 47, 48).

Aerosole

Dabei handelt es sich um luftgetragene feste und/oder flüssige Partikel, die Lineardimensionen zwischen 10 nm und 10 µm haben. Eine typische Anzahl an Partikeln in Bodennähe liegt bei rund $10^4/\text{m}^3$ mit Abweichungen um je eine Zehnerpotenz nach oben in stark belasteter Luft in urbaner Umgebung bzw. nach unten in Reinluft. Die Aerosolkonzentration nimmt mit der Höhe rasch ab und beträgt oberhalb von 5 km nur mehr wenige 100 Teilchen pro cm^3 (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 18).

Kleine Partikel (im Nanometerbereich) entstehen durch Kondensation, wobei ein Phasenübergang von gasförmig zu fest oder flüssig stattfindet (übersättigte Dämpfe), die sogenannte Nukleation (Keimbildung). Größere Aerosole entstehen durch Aufwirbelung (Dispergierung) flüssigen oder festen Materials, beispielsweise durch Aufwirbelung von Mineralstaub durch Wind oder die Einbringung von Seesalzpartikeln durch das Zerplatzen von Blasen an der Meeresoberfläche. Ein relativ großer Anteil an Dispersionsaerosolen besteht aus organischem Material wie Pflanzen- und Tierfragmente, Bakterien oder Pilzsporen (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 463-473).

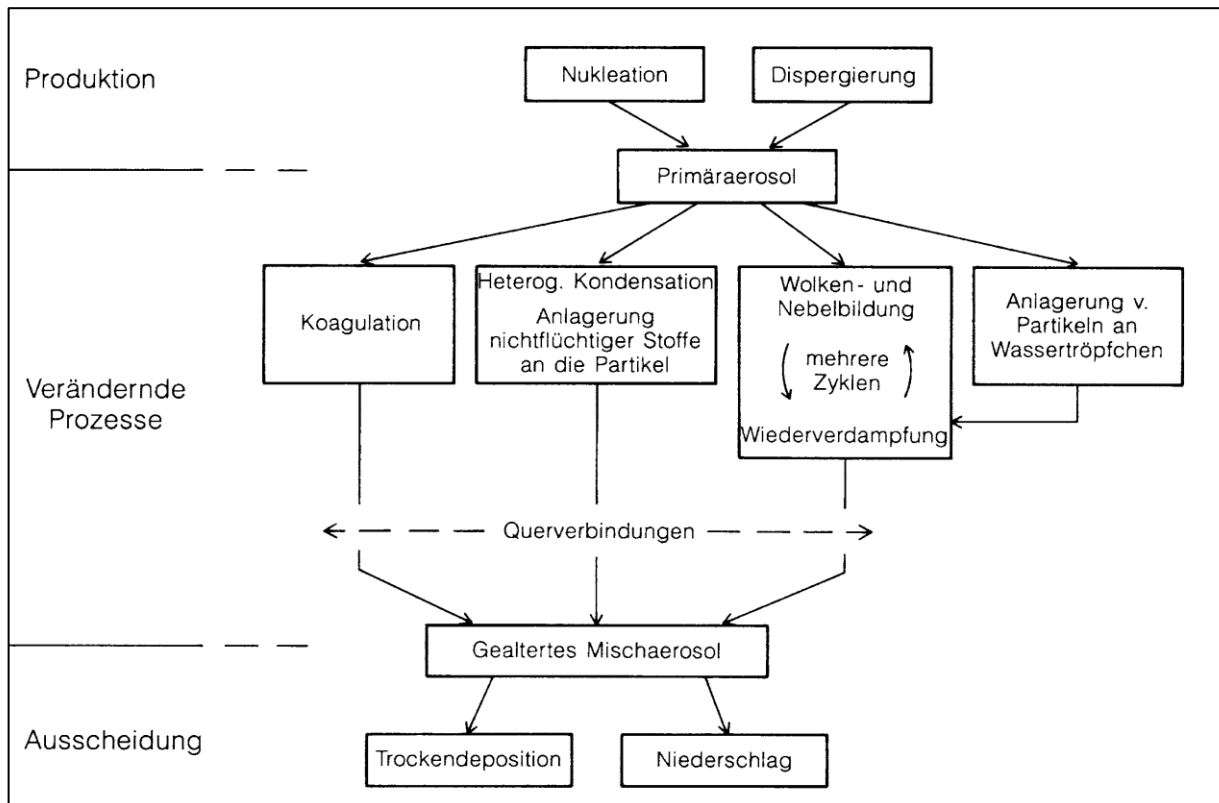


Abb. 11: Aerosolumwandlungsprozesse in der Troposphäre (aus Roedel & Wagner, 2011, S. 473)

Aus diesen Primäraerosolen entstehen sogenannte Mischaerosole durch Wechselwirkungen untereinander bzw. dienen diese als Kondensationskeime für Wolken- oder Nebeltropfchen (s. Abb. 11). Sowohl die primären Eigenschaften als auch Größenverteilungen ändern sich mit der Aufenthaltsdauer der Partikel in der Atmosphäre. Die Ausscheidung der Aerosole aus der Atmosphäre erfolgt über die Deposition. Dabei unterscheidet man die trockene Form der Deposition durch Sedimentation im Schwerfeld der Erde und die nasse Form. Hierbei handelt es sich um die Ausscheidung durch beispielsweise Regen. Die mittlere Lebensdauer für Aerosole, die über die nasse Deposition aus der Atmosphäre ausgeschieden werden, wird mit 4 bis 6 Tagen beziffert (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 473-480).

Aerosole werden auf Grund ihrer Größe geordnet, wobei man die drei folgenden Klassen kennt: Feine Partikel mit einem Durchmesser von $0,1\ \mu\text{m}$ - $2,5\ \mu\text{m}$, ultrafeine Partikel mit einem geringeren Durchmesser bzw. grobe Partikel mit einem Durchmesser über den genannten Bereichen. Außerdem werden Aerosole zwischen natürlichen und anthropogenen Quellen unterteilt. Zu zweitem zählen u.a. Verbrennungen oder der Einsatz von Lösungs- und Düngemittel (vgl. Klose, 2016, S. 232-237). Die Wirkung von Aerosolen auf die globale Temperatur ist negativ. Es besteht eine räumliche Verteilung, wobei eine Verringerung der Durchschnittstemperaturen über den Kontinenten der Nordhalbkugel stärker ausgeprägt ist als über den weniger verschmutzten südlichen Ozeanen. Aerosole streuen und absorbieren

Sonnenlicht wodurch sie dem Treibhauseffekt entgegenwirken, da sie in Bodennähe abkühlend wirken. Einen weiteren abkühlenden Effekt haben Aerosole durch ihre Funktion als Kondensationskeime für Wolken, die eine Erhöhung der Albedo zur Folge haben (vgl. Klose, 2016, S. 241-245).

Als stratosphärische Aerosolschicht bezeichnet man eine weltweite Schicht von flüssigem Sulfataerosolen mit einer Konzentration von ein bis zehn Partikeln pro Kubikzentimeter. Diese bestehen aus Wasser und Schwefelsäure, welche wiederum durch Oxidation von schwefelhaltigen Verbindungen anthropogenen Ursprungs sowie überwiegend aus Schwefelsäure vulkanischer Herkunft entsteht (vgl. Klose, 2016, S. 41).

3.4. Der Treibhauseffekt

Mit dem Begriff Treibhauseffekt subsummiert man Prozesse, die durch Absorption von Infrarotstrahlung der Erdoberfläche einen Teil ihrer abgestrahlten Energie zurückführen. Der Begriff ‚atmosphärisches Glashaus‘ (l’effet de serre¹⁸) wurde erstmals 1824 von Jean Baptiste Joseph Fourier benutzt. Die ersten Berechnungen des Strahlungsgleichgewichts der Atmosphäre dank spektraler Messungen lieferte Svante August Arrhenius 1896¹⁹. Erst durch weitere Erkenntnisse (beispielsweise Wissen um den vertikalen Aufbau unserer Atmosphäre, neuere Labordaten zur Absorption, besseren Messtechniken oder grundsätzlich dem Einsatz von Computern) konnte 1960²⁰ eine theoretische Beschreibung der Strahlungsübertragung in der Atmosphäre folgen. Ein Jahr später²¹ wurde jene Beschreibung in einem detaillierteren Modell um den vertikalen Energieaustausch durch Konvektion erweitert. 1964 konnten Manabe und Strickler²² die Wirkung des natürlichen Treibhauseffekts sowie die Wirkungsrichtung eines zusätzlichen Treibhauseffekts aufzeigen (vgl. Bakan & Raschke, 2002).

Durch die begriffliche Nähe sowie der häufigen Verwendung als Analogiebeispiel wird der atmosphärische Treibhauseffekt oft mit den Prozessen in einem Treibhaus für Pflanzen

¹⁸ *Annales de Chimie et de Physique*, Oktober 1824; Nachdruck: *Memoire sur les Temperatures du Globe Terrestre et des Espaces Planetaires* [Über die Temperaturen der terrestrischen Kugel und des interplanetaren Raumes]; *Memoires d l’Academie Royale des Sciences de l’Institute de France*, VII 570-604, 1827.

¹⁹ *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground* [Über den Einfluss von Kohlensäure in der Luft auf die Temperatur des Bodens]; *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 5/41, April 1896.

²⁰ Chandrasekhar, Subrahmanyan, *Radiative transfer*; Dover Publications, New York, 1960.

²¹ Manabe, Syukuro, Strickler, Robert F. (1961). *On the radiative equilibrium and heat balance of the atmosphere*. *Monthly Weather Review*.

²² Manabe, Syukuro, Strickler, Robert F. (1964). *Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 21(4), 361-385.

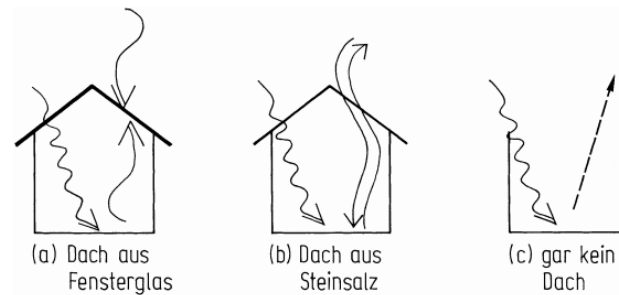


Abb. 12: Vergleich dreier Gewächshäuser mit dem Treibhauseffekt: (a) Fensterglas, durchlässig für solare Strahlung, nicht aber für terrestrische, (b) Steinsalz ist für beide Wellentypen durchlässig, (c) Gewächshaus ohne Dach; Kurze Wellensymbole stellen die solare, lange Wellensymbole die terrestrische Strahlung dar, die Konvektion wird durch eine gestrichelte Linie symbolisiert (aus Hantel, 2001, S. 348).

verwechselt. Der Vergleich mit einem Gewächshaus ist nicht zulässig, da er inkorrekt und irreführend ist (s. Abschnitt 2.1). Die sogenannten Treibhausgase haben für bestimmte Wellenlängenbereiche eine ähnliche Wirkung wie Glas oder Acrylglas. Sie sind für kurzwellige Strahlung durchlässig, jedoch für die langwelligere Strahlung kaum noch. Damit enden bereits die Gemeinsamkeiten. In einem Glashaus wird die Aufheizung der Luft im Raum hauptsächlich von der Konvektion an den warmen Flächen angetrieben. Die Luftbewegung wird durch die Glasscheiben behindert und damit ebenfalls der Wärmeabtransport. In Abb. 12 sind drei Gewächshäuser gegenübergestellt. Experimentell hat man festgestellt, dass das Haus mit Steinsalzdach genauso warm wird wie jenes aus Glas. D.h. das Entweichen von Infrarotstrahlung durch das Dach spielt keine Rolle für die Temperatur im Haus. Von Bedeutung ist das Entweichen der latenten und fühlbaren Wärme wie Bsp. (c) zeigt. Ohne Dach gibt der feuchte und warme Boden sein Wasser durch Verdunstung ab, wodurch seine Wärmeenergie durch Konvektion aufsteigt und entweicht und damit der „Treibhauseffekt“ verschwindet (vgl. Hantel, 2001, S. 347, 348).

Der Strahlungshaushalt der Erde gibt Auskunft über die über das Jahr gemittelte Energiebilanz. Als Ausgangspunkt für diese Betrachtung steht die solare Einstrahlung von $S_0/4 = 342 \text{ W/m}^2$. Nach Abb. 13 gelangen 198 W/m^2 davon bis zur Erdoberfläche, welche 30 W/m^2 davon reflektiert. Zusammen mit dem bereits in der Atmosphäre reflektierten Anteil werden 107 W/m^2 der einstrahlenden Energie in den Weltraum reflektiert. Die verbleibende Energie wird vom Erdboden und der Atmosphäre absorbiert, die sich dadurch erwärmen. Um die Bilanz auszugleichen, müssen 235 W/m^2 vom System Erde-Atmosphäre in den Weltraum ausgestrahlt werden, die direkt vom Erdboden durch atmosphärische Fenster und hauptsächlich durch atmosphärische Gase, Aerosole und Wolken stammen. Die für die Bilanz am Erdboden bestimmende Energie stammt von der Gegenstrahlung. Diese ist mit 324 W/m^2 größer als die

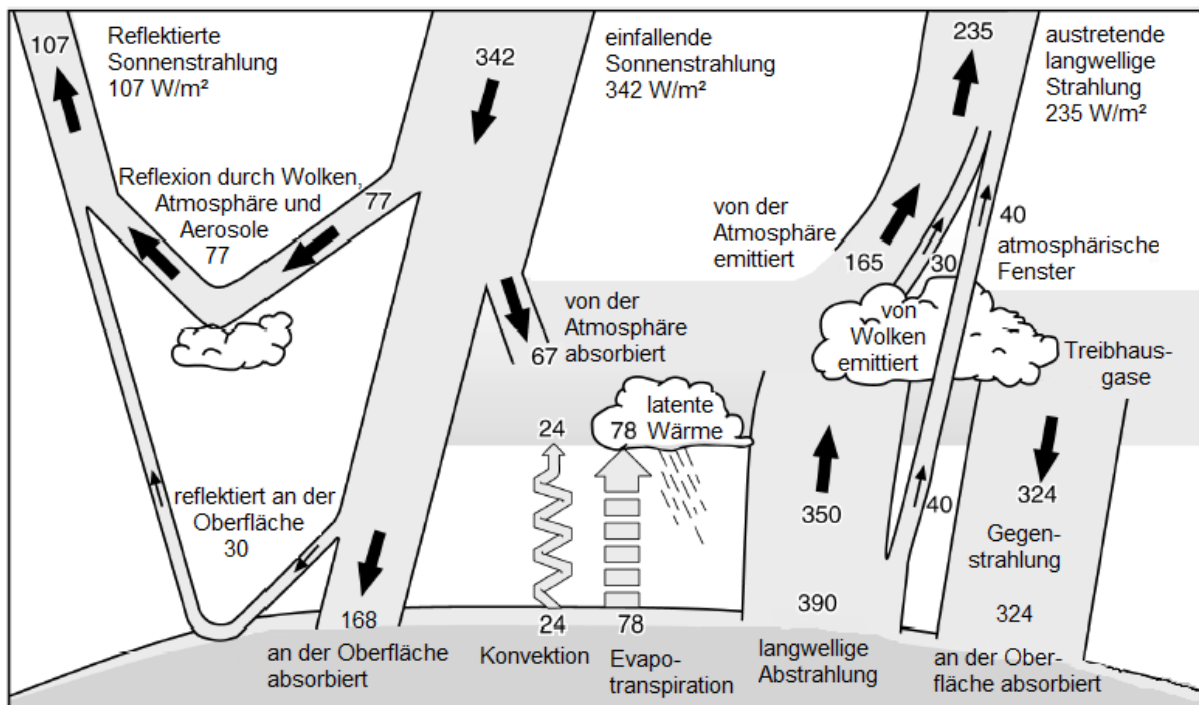


Abb. 13: Über das Jahr gemittelte globale Energiebilanz der Erde, Wertangaben in W/m^2 (aus ZAMG, 2020), nach Trenberth K., Fasullo J.T., Kiehl J. (2009)

solare Einstrahlung am Boden und deutlich größer als von der Atmosphäre in den Weltraum abgestrahlte Energie von 195 W/m^2 . In Folge dieser hohen Einstrahlung von zusammen 492 W/m^2 stellt sich am Erdboden eine höhere Gleichgewichtstemperatur ein. Der Boden führt die Energie durch infrarote Ausstrahlung (390 W/m^2), durch turbulenten (78 W/m^2) und durch latenten (24 W/m^2) Wärmetransport wieder ab. Die Konvektion und Evapotranspiration sind Indizien dafür, dass die Erdoberfläche durch die Einstrahlung so warm wird, dass die darüberliegende Luft instabil geschichtet ist.

Die Gegenstrahlung entsteht durch die selektiven Absorptions- und Remissionswirkungen verschiedener Bestandteile in der Atmosphäre. Einerseits wird ein Teil der Sonnenstrahlung absorbiert, wodurch der Erdboden weniger Energie empfängt. Andererseits strahlt die Atmosphäre selbst und der in Richtung Erdoberfläche abgestrahlte Energieanteil fällt höher aus als die Reduktion der Einstrahlung. Dadurch erhält die Erdoberfläche eine größere Energiemenge als dies ohne die sogenannten Treibhausgase der Fall wäre. Um langfristig wieder im Gleichgewicht zu stehen, reagiert der Erdboden mit einer Temperaturerhöhung. Die Treibhausgase werden auch als infrarotaktive Gase bezeichnet, die auf Grund ihres Dipolmoments die terrestrische Strahlung teilweise absorbieren können. Diesen Vorgang bezeichnet man als den natürlichen Treibhauseffekt. Wolken und Aerosole wirken durch Streuung des Sonnenlichts abschwächend auf die Energiezufuhr der Erde. Vielfach wird das

Sonnenlicht Richtung Erdboden, ein gewisser Anteil zurück ins Weltall gestreut (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 43, 44) (vgl. Bakan & Raschke, 2002).

Wasserdampf (H_2O) ist das wichtigste Treibhausgas, dem eine Wirkung von rund zwei Drittel des Treibhauseffekts zugeschrieben wird. In Reihung ihrer Wirksamkeit folgen Kohlendioxid (CO_2), bodennahes Ozon (O_3), Distickstoffoxid (N_2O), Methan (CH_4) sowie die beteiligten FCKW (vgl. Klose, 2016, S. 48, 49).

Die Kohlenstoffkreisläufe halten eine relativ konstante Kohlenstoffkonzentration in der Atmosphäre, im Ozean, den Landmassen sowie in der Biosphäre. Bei einer Änderung der Kohlenstoffmenge in einem gewissen Reservoir wirkt sich diese auf andere Kohlenstoffmengen aus. In Abb. 14 fällt auf, dass man eine Korrelation zwischen dem atmosphärischen Kohlenstoffdioxid und der Temperatur vermuten kann. Beide Parameter sind dynamisch (Milankovitch-Zyklen), wobei die Prozesse des Kohlenstoffkreislaufs in Eiszeiten verlangsamt werden.

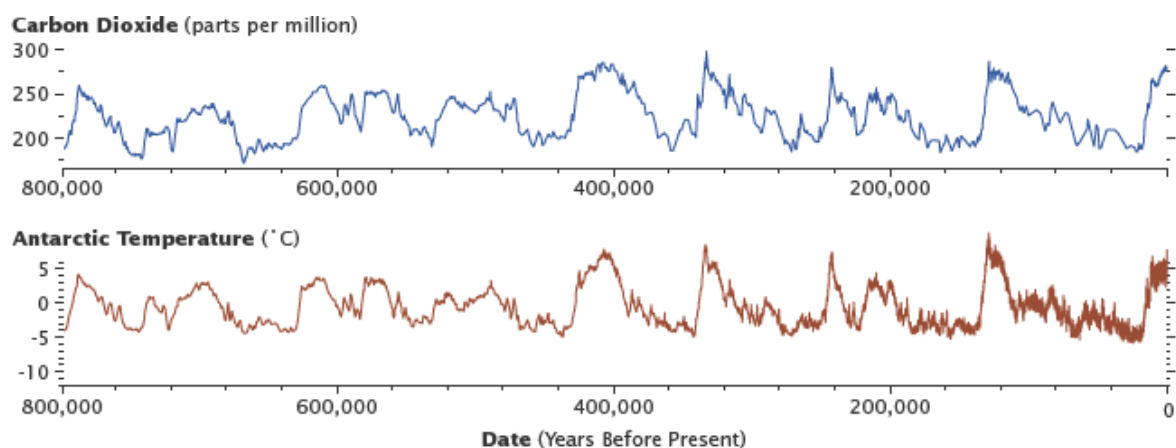


Abb. 14: Anteil des Kohlenstoffdioxids in der Atmosphäre und Temperaturverlauf der letzten 800 000 Jahre (aus NASA, 2011)

Festzuhalten ist, dass es sich beim Treibhauseffekt um einen natürlichen Prozess handelt, der die Erde für unser heutiges Leben erst bewohnbar macht. In breiten öffentlichen Diskussionen scheint eine Verstärkung des Treibhauseffekts durch anthropogene Ursachen die Interpretationshöhe zu haben. Es ist anzumerken, dass die anthropogenen Veränderungen quantitativ klein gegenüber dem natürlichen Effekt sind. Diese Verstärkungseffekte können drastische Änderungen bewirken und sollten keinesfalls für nichtig erklärt werden (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 44), denn bei einer Verdoppelung der Absorbermasse verdoppelt sich ebenso die emittierte Strahldichte. D.h. mit der Zunahme an infrarotaktiven Gasen nimmt proportional auch die Gegenstrahlung zur Erdoberfläche zu, was eine der hauptsächlichen Befürchtungen beim Treibhausproblem darstellt (vgl. Bakan & Raschke, 2002).

3.4.1. Strahlungsbilanzmodell der Erdatmosphäre mit und ohne Atmosphäre

Anhand eines einfachen Modells soll die Wirkung des Treibhauseffekts veranschaulicht werden. Die Modellrechnung ist der Gestalt, dass sie sich dafür eignet, in höheren Schulstufen auch für den Unterricht verwendet zu werden.

In Abschnitt 3.2 wurden die solare und die terrestrische Strahlung erwähnt. Für ein Energiegleichgewicht (die Erde heizt sich nicht instantan auf oder kühlt sich ab) müssen sich die einfallende und die emittierte Strahlung kompensieren. Die auf einer Erdhalbkugel empfangene Sonnenstrahlung (s. Abschnitt 3.2.1) wird durch die planetare Albedo (0,30) teilweise wieder zurückreflektiert, sodass die Erde den Anteil $(1 - A) \cdot S_0 \cdot \pi \cdot R_{Erde}^2$ erhält. In der nulldimensionalen Strahlungsbilanz ohne Berücksichtigung der Atmosphäre muss diese solare Energiezufuhr durch die Abstrahlung der Erde (s. Gleichung (15)) wieder abgeführt werden, sodass die absorbierte und die emittierte Strahlung betragsgleich sind.

$$(1 - A) \cdot S_0 \cdot \pi \cdot R_{Erde}^2 = 4 \cdot \pi \cdot R_{Erde}^2 \cdot \sigma \cdot T_{eff,Erde}^4$$

$$T_{eff,Erde} = \sqrt[4]{\frac{(1 - A) \cdot S_0}{4 \cdot \sigma}} = 255 \text{ K} \quad (17)$$

D.h. die Erdoberfläche strahlt mit $(255 \text{ K} - 273 \text{ K}) = -18 \text{ °C}$. Dabei handelt es sich um die effektive Temperatur (s. Gleichung (6)) der Erde, die sich ausschließlich über die Berechnung anhand der Strahlungsflussdichte ergibt. Würde man die Albedo unberücksichtigt lassen, ergibt sich eine Effektivtemperatur der Erde ohne Atmosphäre von 6 °C (279 K). In Abschnitt 3.2.2 wurde bereits erörtert, dass die Erde mit einer mittleren Temperatur von etwa 288 K (15 °C ²³) strahlt. Diese Differenz von $(288 \text{ K} - 255 \text{ K}) = 33 \text{ K}$ wird durch die Atmosphäre bzw. den Treibhauseffekt aufgelöst.

In einem 2-Flächenmodell betrachten wir die Atmosphäre mit Temperatur T_A (naiv als unendlich dünne Schicht gedacht²⁴) unter der Annahme, dass sie vollkommen durchlässig sei für kurzwellige Strahlung, langwellige jedoch absorbiert. Für die Erdoberfläche mit der

²³ Dieser Wert stellt einen Durchschnitt aus langzeitlichen globalen Messwerten dar, die in einer Höhe von 2 m über der Erdoberfläche beobachtet werden.

²⁴ Da in Kapitel 2 besprochen wurde, dass eine homogene Schicht, die einer Glasscheibe ähnelt, als Modell für die Atmosphäre nicht nur inkorrekt ist, sondern auch einem ganzheitlichen Verständnis des Treibhauseffekts zuwider läuft, sei hier ausdrücklich erwähnt, dass es sich bei diesem Modell nicht um ein Analogon zum Treibhauseffekt handelt, sondern lediglich eine Vereinfachung für die nachfolgenden Bilanzgleichungen.

Temperatur T_B (B = Boden) werden die gleichen Annahmen wie für Gleichung (17) herangezogen.

In Abb. 15 sind die beiden volumenlos gedachten Flächen gezeigt, an deren Temperaturen wir interessiert sind. Für die Bilanzen der Energieflussdichten in diesem Modell erhält man:

Bilanz an Fläche A:

$$\sigma \cdot T_B^4 - 2 \cdot \sigma \cdot T_A^4 = 0$$

Bilanz an Fläche B:

$$(1 - A) \cdot S_0/4 + \sigma \cdot T_A^4 - \sigma \cdot T_B^4 = 0 \quad (18)$$

Summe:

$$-\sigma \cdot T_A^4 + (1 - A) \cdot S_0/4 = 0$$

Die angeführte Summe aufgelöst nach T_A liefert uns aus den aus Gleichung (17) einen Wert von 255 K ($T_{eff,Erde}$). Eingesetzt in die Bilanzgleichung der Fläche A erhält man mit $\sigma \cdot T_B^4 = 2 \cdot \sigma \cdot T_A^4$ für die Bodenfläche $T_B = 303 \text{ K} = 30^\circ\text{C}$. Würde die solare Einstrahlung bereits an Fläche A reflektiert, würde sich die Summe nicht ändern und man erhielte $T_A = T_B$. Der deutlich überhöhte Wert für die Temperatur der Erdoberfläche ist der Tatsache geschuldet, dass im Gleichgewichtszustand zwei einfallende Strahlungsflussdichten kompensiert werden müssen: Einerseits vom absorbierten Teil der solaren Einstrahlung $(1 - A) \cdot S_0/4$ und andererseits von der langwelligen Strahlung der Atmosphäre in Richtung Erdboden $\sigma \cdot T_A^4$. Obwohl der errechnete Wert für die Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche um den Faktor 2 über der tatsächlich beobachteten terrestrischen Temperatur liegt, zeigt dieses Modell die prinzipielle Wirkung des Treibhauseffekts. Erst die Emission im langwelligen Bereich atmosphärischer Strahler ermöglicht, verbunden mit dem Umstand, dass die kurzwellige solare Strahlung erst von der Erdoberfläche und nicht bereits in der Atmosphäre absorbiert wird, habitable Temperaturen (vgl. Strahlungsbilanz ohne Erdatmosphäre (17)).

Um der beobachteten Temperatur der Erdoberfläche im globalen Mittel näher zu

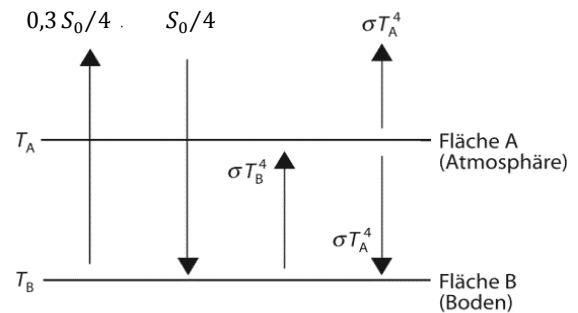


Abb. 15: Einfaches Strahlungsbilanzmodell der Erdatmosphäre. Die im Modell berücksichtigten Energieflussdichten sind durch nicht maßstäbliche Pfeile symbolisiert (nach Kraus, 2004, S. 112)

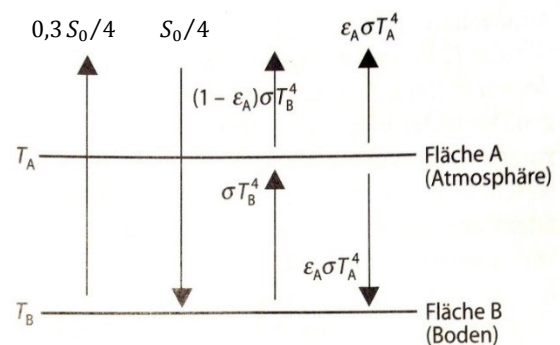


Abb. 16: Einfaches Strahlungsbilanzmodell der Erdatmosphäre mit $\epsilon_A < 1$. Die im Modell berücksichtigten Energieflussdichten sind durch nicht-maßstäbliche Pfeile symbolisiert (aus Kraus, 2004, S. 113)

kommen, soll das Modell aus Abb. 15 noch adaptiert werden. Darin wurde die Atmosphäre komplett „schwarz“ ($\varepsilon = 1$) für terrestrische Strahlung angenommen. In der Realität wird Strahlung in vielen Wellenlängenbereichen teilweise oder gar nicht bis kaum absorbiert (s. Abschnitt 3.3.1). Daher soll das relative Absorptionsvermögen der Atmosphäre ε_A in der Modellrechnung mit $0 < \varepsilon_A < 1$ berücksichtigt werden. In Abb. 16 ist das modifizierte Modell dargestellt, dessen Bilanzgleichungen nun folgender Art sind:

$$\begin{aligned} \text{Bilanz an Fläche A:} \quad & \varepsilon_A \cdot \sigma \cdot T_B^4 - 2 \cdot \varepsilon_A \cdot \sigma \cdot T_A^4 = 0 \\ \text{Bilanz an Fläche B:} \quad & (1 - A) \cdot S_0/4 + \varepsilon_A \cdot \sigma \cdot T_A^4 - \sigma \cdot T_B^4 = 0 \\ & -(2 - \varepsilon_A) \cdot \sigma \cdot T_B^4 + 2 \cdot (1 - A) \cdot S_0/4 = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

Die letzte Gleichung erhält man, indem die Bilanzgleichung der Fläche B mit 2 multipliziert und zur Bilanzgleichung der Fläche A addiert wird. Für die Temperaturen der Flächen A und B erhält man:

$$\sigma \cdot T_B^4 = \frac{(1 - A)}{(1 - \varepsilon_A/2)} \cdot \frac{S_0}{4} \quad \sigma \cdot T_A^4 = \frac{(1 - A)}{(2 - \varepsilon_A)} \cdot \frac{S_0}{4} \quad (20)$$

So gelangt man wieder zu $\sigma \cdot T_B^4 = 2 \cdot \sigma \cdot T_A^4$. Mit der in Gleichung (17) definierten effektiven Strahlungstemperatur gilt:

$$\sigma \cdot T_{eff,Erde}^4 = (1 - A) \cdot \frac{S_0}{4} \quad (21)$$

Wodurch sich die beiden Flächentemperaturen wie folgt schreiben lassen:

$$\sigma \cdot T_B = \sqrt[4]{1 - \varepsilon_A/2} \cdot T_{eff,Erde} \quad \sigma \cdot T_A = \sqrt[4]{2 - \varepsilon_A} \cdot T_{eff,Erde} \quad (22)$$

Mit der bisherigen Kenntnis der planetaren Albedo von 30 % und der beobachteten Temperatur der Erdoberfläche von $T_B = 15^\circ\text{C} = 288,15 \text{ K}$ lassen sich die Größen T_A und ε_A bestimmen. In Tab. 5 sind die Werte dieser beiden Größen auch mit jenen gegenübergestellt, deren Ausgang eine um einen Grad erhöhte Bodentemperatur der Erde T_B annimmt.

Tab. 5: Berechnete Werte für T_A und ε_A in der nulldimensionalen Strahlungsbilanz der Erdatmosphäre

	T_A	ε_A
Für $T_B = 288,15 \text{ K}$	242,30 K	0,7769
Für $T_B = 289,15 \text{ K}$	243,15 K	0,7937

Auch wenn der Wert für die Atmosphärentemperatur in diesem Modell zu gering ausfällt, kann dadurch trotzdem die Änderung der strahlungsaktiven Substanzen in der Atmosphäre berücksichtigt werden. Anhand der Werte aus Tab. 5 erkennt man, dass eine stärkere Emission der Atmosphäre ε_A eine höhere Erdoberflächentemperatur T_B bedingt. D.h. eine Zunahme der infrarotaktiven (Spuren-) Gase in der Atmosphäre, welche die terrestrische Strahlung absorbieren, führt zu einer Verstärkung des Treibhauseffekts.

Auf Grund der geringen Komplexität des Modells sind der Wasserdampfgehalt oder die Wolkenbildung und viele weitere Mechanismen (beispielsweise die Wärmeleitung zwischen Erdinneren und der Erdoberfläche, der sogenannte Bodenwärmestrom oder die Photosynthese der Pflanzen) nicht miteinbezogen. Hauptsächlich dominieren vertikale turbulente Flüsse fühlbarer und latenter Wärme (Evaporation) die interatmosphärische Dynamik, jedoch geben sie ebenso einen Teil der Energie vom Erdboden in die Atmosphäre ab. Daher müssten diese Energieflüsse in die Bilanzgleichung der Fläche B aufgenommen werden. Ebenso ist die Annahme eines gänzlichen Gleichgewichtszustandes in Bezug auf die säkulare Erwärmung der Erde²⁵ nicht ganz korrekt. Es liegt auf der Hand, dass das komplexe thermodynamische und dynamische Verhalten der Atmosphäre mit Hilfe eines einfachen Modells nicht abgebildet werden kann. Jedoch kann beispielsweise die Wirkung der Albedo erläutert werden und das Modell zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen T_B und $T_{eff,Erde}$ auf. Auch wird der Zusammenhang zwischen stärkerer Absorption bzw. Emission der Atmosphäre und einer höheren Gleichgewichtstemperatur der Erde ersichtlich. Damit kann das Modell zu einem besseren Verständnis über die Wirkung des Treibhauseffekts beitragen (vgl. Kraus, 2004, S. 112-114). Das Konzept einer globalen mittleren Temperatur ist plakativ und anschaulich. Auf Grund des Exponenten 4 im Stefan-Boltzmann-Gesetz (s. Gleichung (8)) ergibt sich ein hoher Generalisierungsgrad, wenn man die mittlere Abstrahlung einfach durch eine mittlere Temperatur ausdrückt. Die Gültigkeit und Genauigkeit dieser Vereinfachung ist besonders auf kleinräumiger Betrachtungsebene stark begrenzt, da warme Regionen mehr Energie abstrahlen als die kalten Pole. Den Bedenken zum Trotz hat sich die globale Durchschnittstemperatur als brauchbares Instrumentarium erwiesen und wird auch in aktuellen Publikationen bemüht (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 538).

²⁵ Im Zeitraum von 2003 bis 2012 beträgt die Zunahme der globalen Durchschnittstemperatur 0,78 K (vgl. IPCC, 2014, S. 40).

3.4.2. Der anthropogene Treibhauseffekt

Eine zusätzliche Wirkungsrichtung des natürlichen Treibhauseffekts bezeichnet man als anthropogenen Treibhauseffekt. Beim anthropogenen Treibhauseffekt sind, wie in diesem Kapitel bereits erläutert, mit Ausnahme von Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) die gleichen infrarotaktiven Gase an den gleichen Prozessen beteiligt. Durch menschliche Aktivitäten hat sich der Anteil der klimawirksamen Gase in der Atmosphäre empfindlich erhöht. Im Gegensatz zum natürlichen Treibhauseffekt, bei dem der Wasserdampf eine überragende Rolle bzgl. der Klimawirksamkeit spielt, ist es beim zusätzlichen vor allem das CO_2 (gefolgt von CH_4 , FCKW, O_3 und N_2O). Parallel zur verstärkten Einbringung von Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre werden CO_2 -Senken reduziert. Dies geschieht u.a. durch die großflächige Zerstörung von Vegetation (Rodung, Bodenversiegelung) und durch die Verschmutzung der Ozeane, die dadurch mit eingeschränkter Photosynthese des Phytoplanktons weniger CO_2 aufnehmen können (vgl. Kuttler, 2013, S. 239).

Mit Hilfe eines heute existierenden weltumspannenden Messnetzwerkes von rund 100 Stationen lassen sich atmosphärische Spurengase, insbesondere CO_2 , genau verfolgen (vgl. Schönwiese, 2013, S. 346). Die längste kontinuierliche Aufzeichnung über den Kohlenstoffdioxidgehalt befindet sich auf Hawaii. Auf dem Schildvulkan Mauna Loa wird auf 3 400 m Seehöhe durch die U.S. Behörde für Wetter und Ozeanographie (NOAA) seit 1958 der Kohlenstoffdioxidgehalt der Luft gemessen (s. Abb. 17). Die schwarze Linie stellt den

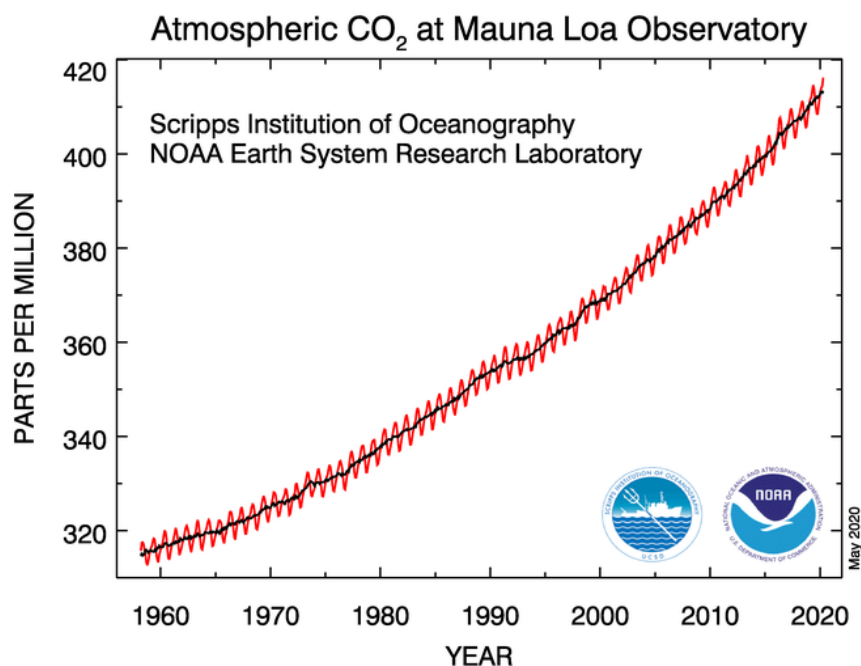


Abb. 17: CO_2 -Anteil in der Luft, gemessen am Mauna Loa Observatorium (aus Earth System Research Laboratory, 2020)

Mittelwert nach saisonalen Korrekturen dar. Diese Daten sind Messwerte von einer Messstation in den nördlichen Subtropen und können von einer global gemittelten CO_2 -Konzentration abweichen (vgl. Earth System Research Laboratory, 2020). Auffällig ist, dass in der Phase der letzten 800 000 Jahre (vgl. Abb. 14) der relative Anteil an CO_2 von heute über 400 ppm (vgl. Earth System Research Laboratory, 2020) nie erreicht wurde (vgl. NASA, 2011). Bezogen auf den in den letzten 1 100 Jahren relativ konstanten CO_2 -Anteil von 280 ppm stellt dies eine Steigerung seit der Industrialisierung von über 40 % dar. Bemerkenswert ist, dass sich diese Station rund 4 000 km vom Festland entfernt in einer Lavawüste befindet und damit die gute Durchmischung in der Homosphäre widerspiegelt (vgl. Kuttler, 2013, S. 241). Der starke Anstieg des Kohlenstoffdioxids wird auf anthropogene Ursachen zurückgeführt, insbesondere auf die Verbrennung fossiler Energieträger, bei der im Prinzip Kohlenstoff (C) in CO_2 umgewandelt wird. Die Weltprimärenergienutzung stieg von 1900 bis zum Jahr 2010 um einen Faktor 12 bis 15 und geht zum überwiegenden Teil (fast 90 %) auf fossile Energieträger (Kohle, Erdöl und Erdgas) zurück (vgl. Schönwiese, 2013, S. 348).

Neben Kohlenstoffdioxid wird seit dem industriellen Zeitalter auch ein erhöhter Methangehalt in der Atmosphäre registriert. Bedeutende anthropogene Methanquellen sind Rinderhaltung, Reisanbau sowie Leckagen bei der Erdgasförderung und der Förderung von Steinkohle. Durch das Auftauen von Permafrostböden, in denen Methan in fester Form als Clathrat (Einschlussverbindungen) gebunden ist, entweicht CH_4 in die Atmosphäre. Durch den intensiven Einsatz von stickstoffhaltigem Mineraldünger (Nitrate) in der Landwirtschaft wird der Atmosphäre verstärkt Distickstoffmonoxid (N_2O) zugeführt. Über die Treibhauswirkung von rein anthropogenen Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), beispielsweise Dichlordifluormethan (CCl_2F_2) und Trichlormonofluormethan (CCl_3F), besteht ein globaler Konsens, sodass deren Verwendung als Kühlmittel, als Treibgas in Druckgaspackungen (Spraydosen) oder bei der Herstellung von Polyurethanschaum seit 1995 verboten ist. Neben ihrer Eigenschaft als hochwirksamer thermischer Absorber, sorgen sie auch für den Abbau der stratosphärischen Ozonschicht (s. ‚Ozonloch‘). Die heute noch in Verwendung stehenden Fluorkohlenwasserstoffe (FKW), beispielsweise das 1,1,1,2-Tetrafluorethan ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$, als Kältemittel unter der Handelsbezeichnung R-134a bekannt), besitzen diese ozonangreifende Eigenschaft nicht, tragen mit ihrer Absorptionswirkung der langwelligen Strahlung jedoch nach wie vor zu einer Erwärmung der Atmosphäre bei.

Zur Erfassung ihrer thermischen Wirksamkeit werden infrarotaktive Spurengase anhand des globalen Erwärmungs- bzw. Treibhauspotentials (*global warming potential*, GWP) klassifiziert. Dabei dient das Kohlenstoffdioxid in einem Vergleichszeitraum (beispielsweise 100 Jahre) als Bezugsgröße und das GWP anderer Spurengase wird mittels des sogenannten CO₂-Äquivalent²⁶ ausgedrückt. 1 kg Distickstoffmonoxid (N₂O) weist die gleiche Wirkung wie 265 kg CO₂ auf (bei CH₄ beträgt dieser Wert 28 und 1 300 bei dem Kältemittel R-134a). Das anthropogene Spurengas mit dem höchsten GWP (bis 22 800) ist Schwefelhexafluorid (SF₆), welches u.a. als Füllgas für Autoreifen und Schallschutzfenster, als Schutzgas bei Schmelzvorgängen hochreaktiver Metalle (z.B. Magnesium), als Dielektrikum in Kondensatoren oder als Isoliergas bei der elektrischen Energieversorgung eingesetzt wird (vgl. Kuttler, 2013, S. 239-241).

3.4.3. Auswirkungen des Treibhauseffekts

Nach der eingehenden Behandlung des Treibhauseffekts und seiner Wirkung auf die global gemittelte Oberflächentemperatur der Erde soll in diesem Abschnitt kurz die Bedeutung des Treibhauseffekts für das irdische Klimasystem bzw. dessen Veränderungen angesprochen werden.

Das Klimasystem der Erde fasst folgende Teilsysteme zusammen: die Biosphäre (Fauna und Flora, Plankton, Regenwald), die Lithosphäre (Erdboden), die Kryosphäre (Land- und Meereis), die Hydrosphäre (Ozeane, Meeresströmungen, Niederschlag) sowie die Atmosphäre (Luftzirkulation, Wolken). Bei der Erdkruste, der Lithosphäre (die in guter Näherung eine Kugelschale ist) und bei der Atmosphäre (die „eine geschlossene Gashaut in Kugelgestalt“ ist), handelt es sich tatsächlich um Sphären im eigentlichen Wortsinn. Bei den anderen genannten Teilsystemen, die man auch als Klimakomponenten bezeichnet, handelt es sich dabei nicht um eine einzige, abgeschlossene Gestalt. So umfasst die Hydrosphäre neben den Ozeanen beispielsweise auch das atmosphärische Regenwasser und das Grundwasser. Die Kryosphäre subsummiert alles Eis auf unserem Planeten. So zählen neben den Eiskappen an den Polen auch Gletscher, Eis in Permafrostböden, Hagel oder Schnee zur Kryosphäre. Da es in der Atmosphäre, am Land, in den Ozeanen und selbst im Eis keine Stelle gibt, an der nicht Leben

²⁶ Das CO₂-Äquivalent gibt an, wie viel die Masse eines bestimmten Treibhausgases zur globalen Erwärmung im Vergleich zur gleichen Masse CO₂ beiträgt. Dieses Modell ermöglicht eine Vergleichbarkeit der Beiträge unterschiedlicher infrarotaktiver Spurengase, unabhängig von ihrem tatsächlichen Masse- beziehungsweise Erwärmungsanteil.

angetroffen wird, muss für ein ganzheitliches Verständnis des irdischen Klimasystems die Biosphäre in die Betrachtungen miteinbezogen werden. Im Grunde umfasst das Klimasystem alle Dynamiken mit ihren Akteuren der gesamten Erde, die sich in Nähe der Erdoberfläche konzentrieren, da hier die aktiven Umsetzungen stattfinden. Dabei stehen die verschiedenen Stoffe im Klimasystem im ständigen Austausch miteinander. Die physikalischen und chemischen Wechselwirkungen stehen häufig in mehrstufigen Abhängigkeiten zueinander, da es zu Rückkoppelungen kommt (vgl. Hantel, 2001, S. 314, 315).

Generell ist das Klimasystem ständiger natürlicher Veränderung unterzogen, die verschiedene Ursachen haben kann. Eine Veränderung der solaren Einstrahlung (Solarkonstante), der Erdbahnparameter bezüglich Sonnenumlauf, der Ekliptik oder der Präzession tragen ebenso bei wie geologische Ursachen (beispielsweise Vulkanismus, Kontinentaldrift) oder eine Änderung in der Treibhausgaskonzentration. In der Beschreibung von Klimaveränderungen trennt man im Allgemeinen interne Rückkoppelungsmechanismen von sogenannten Klimaantrieben. Unter Klima- bzw. Strahlungsantrieb, auch (radiative) forcing²⁷, versteht man eine (äußere) Störung des Strahlungsgleichgewichts. Die durch einen Treiber verursachte Veränderung des Strahlungsflusses wird an der Tropopause oder an der Atmosphärenoberfläche gemessen. In der Realität ist kein Strahlungsgleichgewicht vorherrschend, denn es existiert eine Strahlungsflussdivergenz mit einer Tendenz zur Erwärmung bzw. Abkühlung eines Volumens. In der Atmosphäre können beispielsweise Aggregatzustandsänderungen oder Advektion Divergenzen im Strahlungsfluss teilweise kompensieren. Wegen der vielschichten Kopplungen und möglichen Rückkoppelungen ist eine einfache Ursache-Wirkung-Beschreibung kaum möglich. Die Wirkmechanismen einzelner Systeme können durchaus in weniger komplexen Modellen beschrieben werden und computerunterstützte Berechnungen erlauben eine quantitative Abschätzung verschiedener Klimaantriebe in ihrer Wirkung auf das Klima. So ist beispielsweise die direkte Temperaturänderung auf Grund einer Erhöhung des CO₂-Gehalts sehr genau berechenbar. Die veränderte Temperatur bedingt weitere Veränderungen (z.B. geänderte Zirkulationsmuster, Erhöhung des Wasserdampfgehalts), die wiederum ihrerseits eine Änderung der Temperatur bewirken. So entsteht die Situation, dass in den Berechnungen der effektiven Wirkung verschiedener Klimaantriebe starke Unsicherheiten enthalten sind (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 537-539). Trotz einiger Kritik an der Klimaforschung kann festgehalten werden, dass „unser grundlegendes Verständnis von der Strahlungsübertragung in der Erdatmosphäre lückenfrei und schlüssig ist, dass die für die exakten Berechnungen

²⁷ Der Begriff des Strahlungsantriebs (radiative forcing) wurde von der IPCC eingeführt und wird in der Einheit W/m² angegeben.

geeigneten Methoden bekannt und die notwendigen Parameter in genügender Genauigkeit verfügbar sind, und dass die Qualität der nötigen Annahmen und Näherungen für die praktische Anwendung in Klimamodellen durch internationale Initiativen ausreichend sichergestellt wird“ (Bakan & Raschke, 2002). Die Beschreibung der Strahlungsübertragung fließt nicht nur in Berechnungen von Klimamodellen zur Energiebilanz der Erde ein, sondern findet vielfachen Einsatz im Bereich der Fernerkundung. In diesem Anwendungsbereich würden allzu große Abweichungen bzw. Fehler in den Berechnungsmodellen unmittelbar Wirkung zeigen. Man kann daher die Fernerkundung als objektiven ‚Überwacher‘ der Methoden und Annahmen der Klimaforschung betrachten. Die bereits erwähnte Einschränkung durch die teilweise stark mit Unsicherheiten behafteten, quantitativen Angaben bleibt aber erhalten. Auf Grund der komplexen räumlichen und mikrophysikalischen Struktur liegen die Schwierigkeiten hauptsächlich an der konkreten Parametrisierung von klimawirksamen Merkmalen. Diese Schwierigkeiten äußern sich vor allem bei der effektiven Wirkung von Wolken und Aerosolen auf den Strahlungshaushalt der Erde (vgl. Bakan & Raschke, 2002). Im Wesentlichen werden ihnen Abkühlungseffekte zugesprochen, die global gemittelt mit $-0,9 \text{ W/m}^2$ quantifiziert werden (vgl. IPCC, 2014, S. 44).

Die globale Mitteltemperatur wurde in den letzten Jahrhunderten durch den Treibhauseffekt immer höher. Die durchschnittliche Erwärmung im Zeitraum von 1901 bis 2000 lag bei $0,6 \text{ K/100 Jahre}$, im Zeitraum von 1906 bis 2005 bereits bei $0,74 \text{ K/100 Jahre}$. Nach Modellrechnungen wird eine weitere Erderwärmung bis zum Jahr 2100 von $1,8 \text{ K} - 4,0 \text{ K}$ prognostiziert. Der anthropogene Treibhauseffekt ist laut statistischen Auswertungen ein deutlicher Antrieb in den Klimaaufzeichnungen der letzten 70 Jahre (vgl. Klose, 2016, S. 50). In keiner der 30-Jahr-Perioden seit 800 Jahren war die Erdoberfläche so warm wie im Zeitraum zwischen 1983 und 2012 (vgl. IPCC, 2014, S. 40).

Die Erwärmung der Oberfläche der Erde führt auch zu einer Erwärmung des Ozeans. Mehr als 90 % der zusätzlichen Energie sind im Ozean gespeichert und nur 1 % in der Atmosphäre, wobei sich die oberen 75 m des Ozeans zwischen 1971 und 2010 um $0,11 \text{ K/10 Jahre}$ erwärmt haben. Außerdem hat die vermehrte Aufnahme von CO_2 anthropogenen Ursprungs zu einer Versauerung des Ozeans geführt. Durch den veränderten pH-Wert ist die Diversität biologischer Abläufe im Meer gefährdet. Zwischen 1901 und 2010 ist der mittlere globale Meeresspiegel um $0,19 \text{ m}$ gestiegen. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts wird eine höhere Zunahme pro Jahr als in den vorangegangenen zwei Jahrtausenden gemessen. Hauptsächlich wird die

thermische Ausdehnung des Wassers und das Abschmelzen des Festlandeises für diesen Anstieg ausgemacht.

In den mittleren Breiten der Nordhemisphäre haben Niederschläge seit 1901 zugenommen. Anhand des gemessenen Salzgehalts kann beobachtet werden, dass sich in verdunstungsreichen Regionen im Lauf der Zeit weniger und in niederschlagsstarken Regionen vermehrt Niederschlag ereignete. Auf der ganzen Nordhemisphäre hat die Schneebedeckung im Frühling abgenommen. Durch die höheren Oberflächentemperatur und der veränderten Schneebedeckung erwärmen sich seit 1980 die Permafrostböden und fast alle Gletscher der Erde sind weiter abgeschmolzen.

Der Grönländische und Antarktische Eisschild haben zwischen 1992 und 2011 an Masse verloren, wobei ab 2002 eine Beschleunigung dieser Entwicklung beobachtet wird. In der Arktis ist die mittlere jährliche Ausdehnung des Meereises zwischen 1979²⁸ und 2012 kontinuierlich zwischen 3,5 bis 4,1 % pro Jahrzehnt geschrumpft. Nicht ganz kompensieren kann die im selben Zeitraum beobachtete Zunahme mit 1,2 bis 1,8 % der mittleren jährlichen Ausdehnung des antarktischen Meereises (vgl. IPCC, 2014, S. 40-42).

Im Verhältnis zu anderen anthropogenen Klimaantrieben (Ozon- und Albedo-Veränderung) ist die Erhöhung der infrarotaktiven Spurengase in der Atmosphäre der wirksamste in Bezug auf die Erderwärmung seit 1950. Nach Berechnungen der IPCC beliefen sich die kumulativen anthropogenen CO₂-Emissionen zwischen 1750 und 2011 auf $(2\,040 \pm 310)$ Gt, wovon nur 40 % in der Atmosphäre verblieben, 30 % die Meere aufgenommen haben und der Rest in Pflanzen und Böden gespeichert ist. Trotz einer wachsenden Anzahl an gesetzlichen Regelungen zur Minderung des Klimawandels ist der anthropogene Ausstoß an Treibhausgasen zwischen 2000 und 2010 rascher gestiegen als in den drei Jahrzehnten davor. In den letzten Jahren ist dieser Trend beibehalten worden, wobei sich nach der Wirtschaftskrise 2007/2008 die Treibhausgaskonzentration zwischenzeitlich reduziert hat. D.h. die Art des menschlichen Wirtschaftens hat einen unmittelbaren Effekt, der dank den Messdaten auch zugänglich ist. Dem CO₂ werden am Gesamtanstieg der infrarotaktiven Spurengase mehr als 75 % zugesprochen (vgl. IPCC, 2014, S. 44-47).

Auch in Zukunft werden die Treibhausgasemissionen, insbesondere Kohlenstoffdioxid, zu einer weiteren Erwärmung der Erdoberfläche führen. Mit Annahmen, die auf Änderungsraten der Vergangenheit beruhen, wird eine Temperaturzunahme der Erde um 1,5 K bis zum Jahr

²⁸ Ab diesem Zeitpunkt waren Satellitenbeobachtungen möglich.

2032 bzw. 2052 vorausgesagt. Es wird u.a. mit einer Zunahme an Extremwetterereignissen (Hitze, Starkniederschlag etc.) sowie mit einem Meeresspiegelanstieg gerechnet. Diese Effekte bedingen wiederum Änderungen in der Biodiversität und einer Vielzahl an Ökosystemen. Diese Veränderungen beruhen nicht einzig auf die Zusammensetzung der klimawirksamen Spurengase in der Atmosphäre (vgl. IPCC, 2018, S. 8, 9). Diese Entwicklungen²⁹ machen es umso wichtiger, dass junge Menschen über die physikalischen Grundlagen des Treibhauseffekts informiert sind und damit die Voraussetzungen gegeben sind, um aktiv und gestaltend am gesellschaftlichen Diskurs mitzuwirken.

²⁹ Die möglichen Auswirkungen einer weiteren Erderwärmung auf das Klimasystem werden durch die weltweite Zusammenführung von Klimadaten von der IPCC prognostiziert und regelmäßig unter www.ipcc.ch veröffentlicht.

4. Physikalische Experimente zum Themenkomplex

Treibhauseffekt

Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, verfügen die Schülerinnen und Schüler (SuS) bereits über Alltagsvorstellungen zu den Ursachen und Prozessen des Treibhauseffekts. Um diese Vorstellungen um wissenschaftliche Konzepte zu erweitern, müssen angepasste Lernangebote entwickelt werden. Für einen erfolgreichen Konzeptwechsel muss ein unterrichtlicher Vermittlungsprozess an den vorhandenen Erfahrungen anknüpfen oder solche Erfahrungen über Versuche stiften (vgl. Niebert, 2009, S. 22). In diesem Kapitel werden physikalische Experimente vorgestellt, die genau solche Erfahrungen generieren können. Die Versuche sind derart gestaltet, dass sie die folgenden psychologisch-didaktischen Kriterien erfüllen:

- Der experimentelle Aufbau und die Manipulation sind einfach gehalten und überzeugen durch ihre Transparenz.
- Die Durchführung ist leicht, sodass Auslösung und Effektablesung problemlos möglich sind.
- Eine einfache Übertragbarkeit der Aussage auf das System Erde-Atmosphäre ist möglich.
- Der gesuchte Effekt stellt sich relativ schnell ein.

Trotz der didaktischen Reduktion sollen die Zusammenhänge wissenschaftlich korrekt demonstriert werden und möglichst frei von Störartefakten sein. Mit diesen Kriterien soll sichergestellt werden, dass der Wahrnehmungs- und Verständnisprozess der SuS erleichtert wird und keine Abwendung der Adressatinnen und Adressaten eintritt. Gerade im Schulalltag kann sich bei schwer durchschaubarem Aufbau von Experimenten bzw. deren Durchführung ein Desinteresse bei den SuS breit machen und damit die eigentlichen Versuchsaussagen überdecken (vgl. Huber, 1995, S. 1,2). Ein wenig komplexer Versuchsaufbau bringt einen weiteren positiven Effekt mit sich. Er ist meist mit geringem Material- und Kostenaufwand verbunden, sodass eine tatsächliche Umsetzung im Schulalltag möglich ist. Nicht immer wird auf ein teures Messinstrument (Thermosäule nach Moll) verzichtet, jedoch wurden die Experimente in der Regel mit günstigen und leicht zugänglichen Alltagsgegenständen umgesetzt. Vom Einsatz beispielsweise einer Wärmebildkamera wurde Abstand genommen. Auf Grund der Komplexität des Wirkungsgefüges Treibhauseffekt (s. Kapitel 3) lässt sich dieser nicht „in ein kleines Ganzes“ elementarisieren. Es erscheint daher sinnvoll, sich diesem Phänomen in seinen Teilphänomenen zu nähern. Die didaktische Herausforderung besteht

darin, dass sich die Teilabschnitte wechselseitig aufeinander und auf das Ganze beziehen müssen, um ein fachliches Lernen zu ermöglichen. Das Verständnis der SuS über die Teilphänomene soll zu einem Verständnis des zusammengesetzten Phänomens Treibhauseffekt beitragen (vgl. Höttecke, Maisyenka, Rethfeld, & Mrochen, 2009, S. 110).

Die in diesem Kapitel ausführlich beschriebenen Experimente beginnen mit einer Auseinandersetzung mit der solaren Einstrahlung und deren Absorption (4.2). Die Infrarotstrahlung, die Albedo und die Umwandlung kurzwelliger in langwelliger Strahlung sowie deren Absorption folgen in den Abschnitten 4.3 und 4.4. Die Remission durch infrarotaktive Moleküle und die Absorption der langwelligen Strahlung werden unter 4.5 behandelt. Zum Abschluss werden Experimente zu Auswirkungen einer möglichen Erwärmung der Erdatmosphäre erläutert (4.6).

4.1. Mehrfach eingesetzte Experimentiermaterialien

Noch vor den einzelnen Versuchsbeschreibungen sollen die in den Experimenten mehrfach eingesetzten Messgeräte beschrieben werden, damit nachfolgend eine detaillierte Erwähnung zu Gunsten der Lesbarkeit entfällt. Zur Temperaturmessung wurde ein digitales Thermometer³⁰ in Verbindung mit zwei NiCr-Ni-Temperaturfühlern³¹, die den thermoelektrischen Effekt nutzen, verwendet. Im weiteren Verlauf werden diese Teile insgesamt nur als Thermometer bezeichnet. Bei manchen Versuchen wurde eine Thermosäule nach Moll³² eingesetzt, die der Messung von Wärmestrahlung dient. Sie besteht aus einem Metallgehäuse mit einem Trichter, durch den die Strahlung auf ein schwarzes Metallplättchen (10 mm Messfläche) fällt, das über eine Messlötstelle mit dem Gehäuse verbunden ist. Bei einfallender thermischer Strahlung

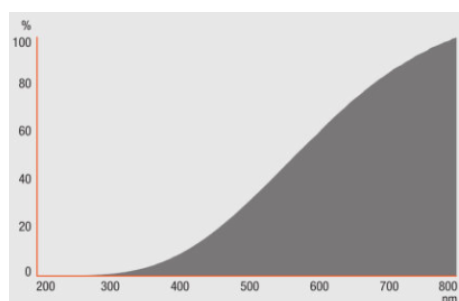


Abb. 18: Strahlungsverteilung einer Halogenlampe (400 W, 230 V, R7S-Fassung) (aus OSRAM GmbH, S. 4)

reagiert das Metallplättchen wegen seiner geringen Wärmekapazität in kurzer Zeit (2 s - 3 s) mit einer Empfindlichkeit von ca. 0,16 mV/mW während das Gehäuse auf Raumtemperatur bleibt. Durch den Temperaturunterschied tritt an der Messlötstelle eine Thermospannung auf. Diese ist proportional zur eingefallenen thermischen Strahlung und kann mittels

³⁰ Digitales Temperaturmeßgerät (666 209), Leybold Didactic GmbH.

³¹ Temperaturfühler NiCr-Ni (666 193), Leybold Didactic GmbH.

³² Thermosäule nach Moll, Kipp & Zonen B.V.

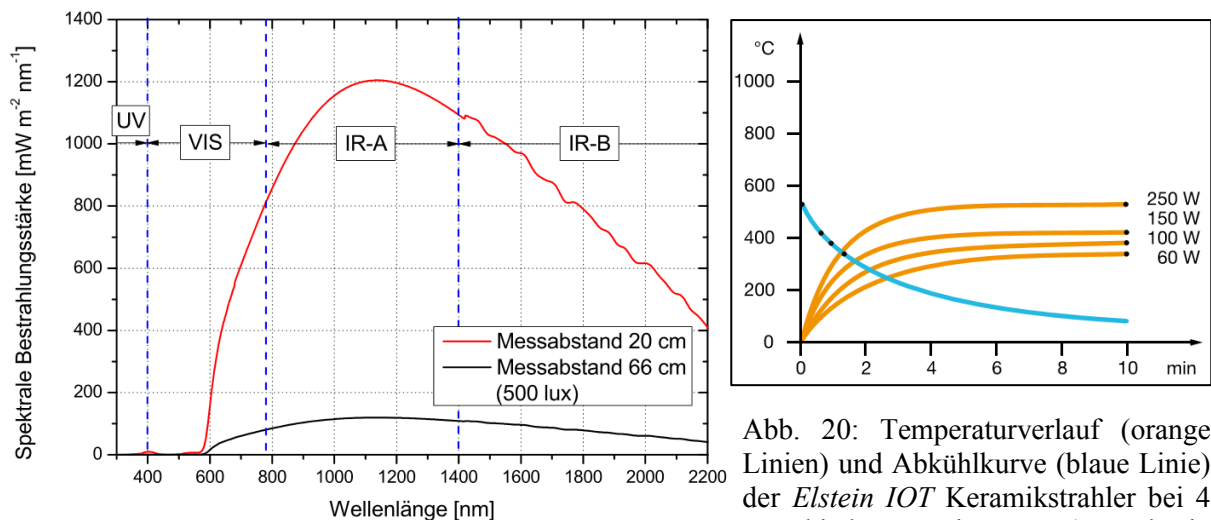


Abb. 19: Gemessene spektrale Bestrahlungsstärken einer *Philips PAR38*, 100 W Infrarotlampe in einem Abstand von 20 cm, sowie 66 cm (500 lux Distanz) (aus Weber, Schulmeister, Kitz, & Brusl, S. C270)

Abb. 20: Temperaturverlauf (orange Linien) und Abkühlkurve (blaue Linie) der *Elstein IOT* Keramikstrahler bei 4 verschiedenen Leistungen (aus Elstein GmbH & Co. KG, S. 32, 33)

Spannungsmessgeräts an den Ausgangsbuchsen der Thermosäule abgegriffen werden. Fällt thermische Strahlung von einem Körper mit geringerer Temperatur als jene der Umgebung auf die Messfläche, dann zeigt das Messgerät negative Spannungswerte (vgl. Leybold Didactic GmbH). Für die Messung von elektrischen Spannungen wurden Mehrfachmessinstrumente, sogenannte Multimeter verwendet. Bei den eingesetzten Halogenstrahlern handelt es sich um eine Schreibtischlampe (*Radium RJH-TS XE*, 80 W) und um eine Baulampe (230 V, *R7S*, 400 W). Außerdem wurden eine Infrarotlampe (*Philips PAR38E*, 150 W) und ein Keramikstrahler (*Elstein IOT90*, 150 W) verwendet. Der Spektralbereich einer Halogenlampe desselben Typs ist in Abb. 18 gezeigt. In Abb. 19 ist das gemessene Spektrum einer baugleichen Infrarotlampe mit geringerer Nennleistung (100 W) ersichtlich. Der *Elstein IOT90*-Strahler emittiert in einem Wellenlängenbereich von 3 μm - 10 μm mit einer Strahlungsflussdichte von 15 W/m^2 . Sein Wellenlängenbereich überlappt sich gut mit jenem der terrestrischen Ausstrahlung. Da der Keramikstrahler kein sichtbares Licht emittiert, wird er auch als Dunkelstrahler bezeichnet (im Handel auch Terrariumlampe genannt). Seine Eigenschaft, die für uns Menschen unsichtbare, langwelligere Strahlung auszusenden, unterstützt den didaktischen Zugang, wenn der Dunkelstrahler im Modell beispielsweise als Erde fungiert. Für einige Experimente benötigt man ein luftdichtes, für Strahlung im nahen und mittleren Infrarot weitgehend durchlässiges Material. Bei der Infrarot-Spektroskopie setzt man als sogenannte IR-Fenster unterschiedliche Materialien³³ ein, die sehr sensibel gegenüber äußeren Einwirkungen sind und sich auf Grund

³³ Je nach Verwendungszweck finden in der Infrarot-Spektroskopie unterschiedliche Materialien als IR-Fenster ihren Einsatz, beispielsweise Kaliumchlorid, Magnesiumfluorid oder Zinksulfid (vgl. msscintific Chromatographie-Handel GmbH).

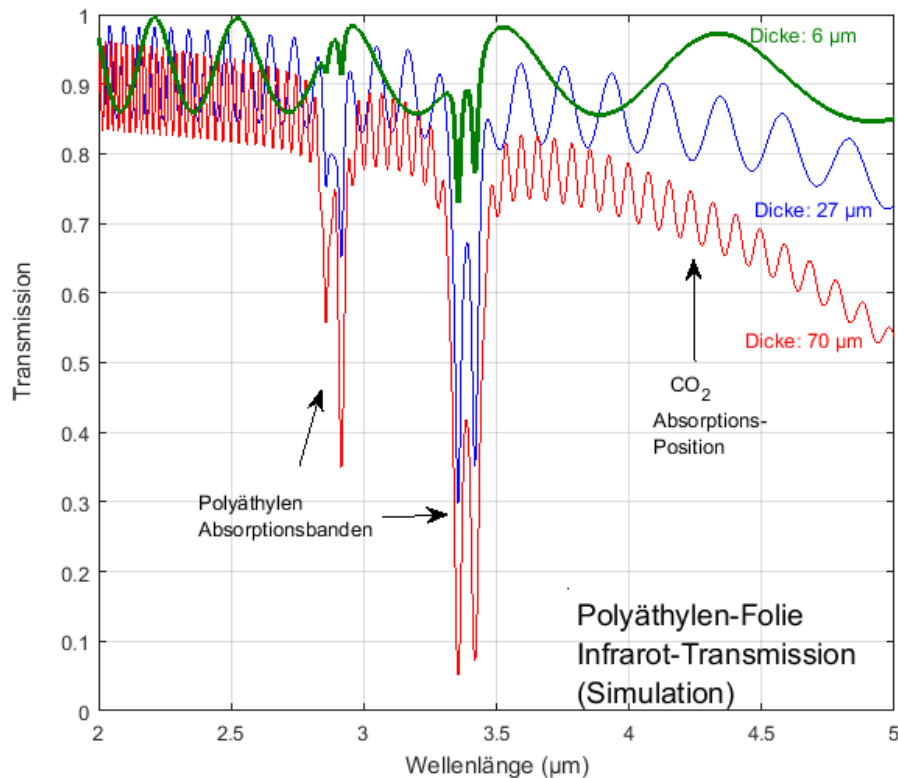


Abb. 21: Transmissionsgrad von Polyethylen-Folie verschiedener Schichtstärken, 6 µm (grün), 27 µm (blau), 70 µm (rot) (mit freundlicher Unterstützung von Dr. Heinz Krenn, 2019)

ihrer Kosten nicht für den Einsatz in einer Schule eignen. Als preisgünstiges und im Lebensmittelhandel jederzeit erhältliches IR-Fenster ist Polyethylen-Folie (PE-Folie) geeignet. Die sogenannte Frischhaltefolie in den Supermärkten gibt es von verschiedenen Herstellern und ist in der Regel zwischen 10 µm und 13 µm dick (vgl. Eckoldt, 2017). In Abb. 21 erkennt man, dass bei einer Schichtdicke von 27 µm die PE-Folie noch fast 80 % der Strahlung mit einem Wellenlängenbereich zwischen 4 µm und 4,5 µm transmittiert. In den folgenden Experimenten wird die Absorptionsbande um 4,26 µm von CO₂ genutzt, deren Emissionsmaximum bei 400°C liegt. Die 15 µm-Bande, welche den hauptsächlichen Antrieb des Treibhauseffekts liefert, kann in der Schule nicht so gut nachgewiesen werden. Diese Wellenlänge entspricht mit ca. 20°C der Raumtemperatur und ist damit schwer von der Umgebung isoliert zu betrachten. Da der Anteil des Wasserdampfgehalts in den Versuchsanordnungen in den gezeigten Fällen annähernd gleich groß ist und die jeweilige Versuchsdauer relativ kurz ist, kann dieser Faktor bei den Betrachtungen unberücksichtigt bleiben. Weitere eingesetzte Materialien sind den Materiallisten in den Versuchsbeschreibungen zu entnehmen.

4.2. Solare Strahlung

Die einfallende Sonnenstrahlung führt unserem Planeten Energie zu und ist damit der entscheidende Antrieb für die Dynamik in der Atmosphäre und an der Erdoberfläche. Ebenso beginnen mit ihr die Prozesse des Treibhauseffekts.

4.2.1. Albedo – Reflexionsvermögen der Erdoberfläche

Wie in Kapitel 3 beschrieben, haben die verschiedenen Oberflächen der Erde unterschiedliche Reflexions- bzw. Absorptionseigenschaften. Dieser Versuch veranschaulicht das Reflexionsvermögen zweier Farben bei gleichen Stoffeigenschaften.

Material

- Halogenstrahler 80 W (z.B. Schreibtischlampe)
- Schwarzer und weißer Kartonbogen
- 2 Thermometer
- Stoppuhr
- Maßband

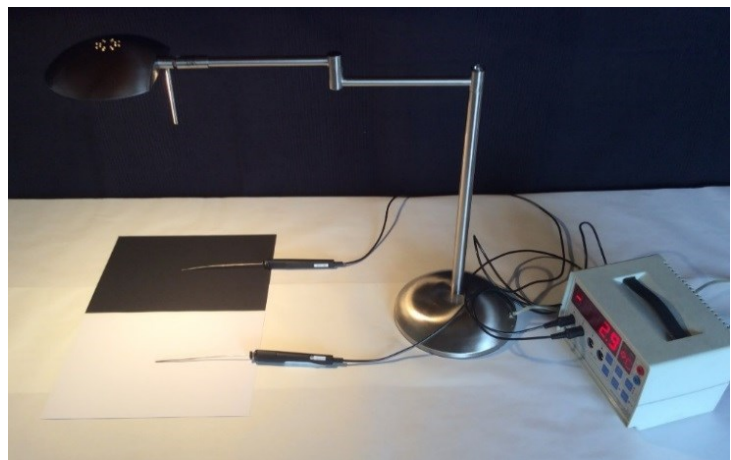


Abb. 22: Versuchsaufbau: Reflexionsvermögen der Erdoberfläche (eigene Aufnahme)

Aufbau und Durchführung

Bei den beiden Kartons handelt es sich um Bögen im A4-Format, wie sie beispielsweise in jedem Papierfachgeschäft erhältlich sind. Sie sind bis auf die Farbe in ihrer Beschaffenheit gleich. Sie werden mittig unter den Strahler positioniert, sodass sie zu gleichen Maßen beleuchtet werden. Im Messbeispiel betrug der Abstand zwischen der Schreibtischlampe und den beiden Pappen 42,5 cm. Die beiden Thermometer werden im gleichen Abstand zum Strahler mittig auf den jeweiligen Kartonbogen gelegt (s. Abb. 22). Nach dem Einschalten der Lampe werden jede Minute die Temperaturen beider Thermometer abgelesen und notiert.

Am Beginn der Messung betrug die Temperaturdifferenz $\Delta T_0 = 0,2^\circ\text{C}$. Bereits nach 3 Minuten stellte sich eine deutliche Differenz von $\Delta T_3 = 1,3^\circ\text{C}$ ein, die nach 20 Minuten auf $\Delta T_{20} = 3,0^\circ\text{C}$ anstieg.

Physikalischer Hintergrund

Die kurzwellige Strahlung des sichtbaren Lichts wird von der Pappe absorbiert und wieder emittiert. Die weiße Oberfläche reflektiert mehr Strahlung als die schwarze, weshalb für unser Auge die weiße Oberfläche heller erscheint. Da der Karton nicht transparent ist, werden keine sichtbaren Anteile transmittiert. Gemäß Gleichung (9) muss sich die Strahlung auf die Reflexion und Absorption aufteilen. Nach dem Kirchhoff'schen Strahlungsgesetz gilt $\text{Absorption} = \text{Emission}$. Trotz der direkten Bestrahlung der beiden Thermometer, wovon beide Thermometer gleich betroffen sind, veranschaulicht der Versuch das unterschiedliche Absorptionsverhalten von weißer und schwarzer Oberfläche.

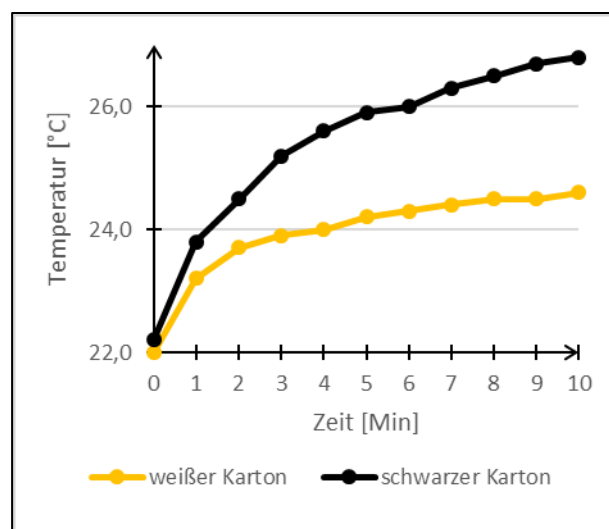


Abb. 23: Temperaturverlauf direkt über einer weißen bzw. einer schwarzen Oberfläche während einer Bestrahlungszeit von 10 Minuten

Bemerkungen

Übertragen auf das System Erde bedeutet dies, dass helle Erdoberflächen Sonnenstrahlung mehr reflektieren als dunkle und damit eine Erwärmung hemmen. Sind weniger Schnee- und Eisflächen vorhanden, wird mehr solare Strahlung absorbiert, wodurch sich die darüber befindliche Luft stärker erwärmt (Eis-Albedo-Rückkoppelung).

4.2.2. Spezifische Wärmekapazität von Erde und Wasser

Auf Grund verschiedener spezifischer Wärmekapazitäten verhalten sich unterschiedliche Stoffe hinsichtlich ihrer Erwärmung bei einer Energiezufuhr verschieden. Dieser Versuch stellt die spezifischen Wärmekapazitäten von Erde und Wasser gegenüber.

Material

- Halogenstrahler 400 W
- 2 idente Schalen
- 2 Thermometer
- Wasser
- Erde od. Sand
- Stoppuhr
- Maßband
- Stativmaterial



Abb. 24: Versuchsaufbau: spezifische Wärmekapazität Erde vs. Wasser (eigene Aufnahme)

Aufbau

Die beiden Schalen werden jeweils mit Wasser und Erde gefüllt, wobei die Füllhöhe identisch sein soll. Im Messbeispiel betrug diese 4 cm. Bei der Positionierung unter dem Strahler ist darauf zu achten, dass beide Schalen gleichmäßig bestrahlt werden. Anschließend werden die Thermometer in jede Schale platziert, wobei diese dieselbe Ausrichtung entlang der Symmetrieachse zwischen den Schalen und dieselbe Eintauchtiefe aufweisen sollen.

Durchführung

Wenn sich die beiden Thermometer bei einem Temperaturwert eingependelt haben, kann mit dem Versuch begonnen werden. Zuerst werden Erde und Wasser mittels Lampe, die als Sonne dient, angestrahlt. Anschließend wird die Messreihe noch einige Minuten nach Abschalten des Strahlers fortgeführt. Die angezeigten Temperaturen werden jede Minute abgelesen. Dabei kann man beobachten, dass sich die Erde sowohl rascher erwärmt als auch wieder abkühlt als Wasser.

Der Temperaturverlauf bei einer Bestrahlungsdauer von 8 Minuten ist in Abb. 25 gezeigt. Die Sonne wird durch einen Halogenstrahler nachgebildet, der im konkreten Fall einen Abstand von

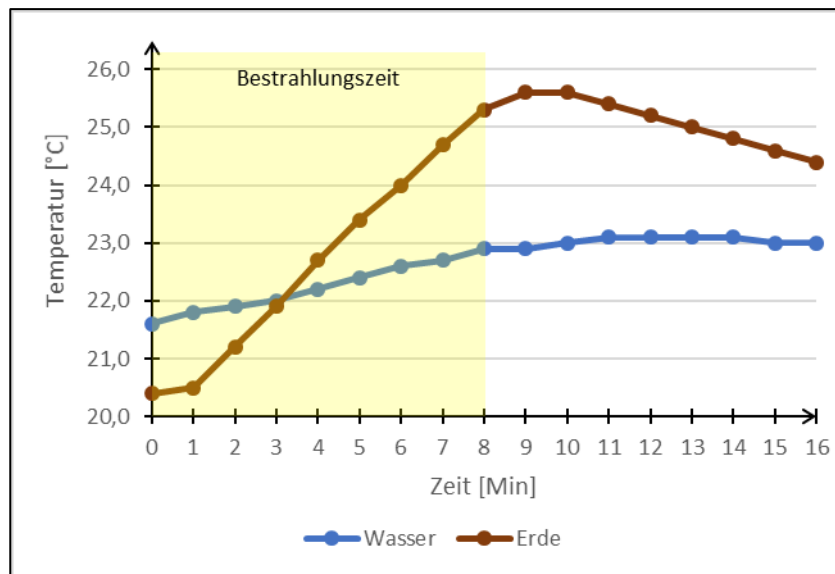


Abb. 25: Gemessene Temperaturen in Wasser und Erde nach einer Bestrahlung von 8 Minuten mit einer Halogenlampe

50 cm über den Schalen aufwies. Die erreichten Temperaturunterschiede im Vergleich zu den jeweiligen Ausgangswerten betrugen: $\Delta T_{\text{Wasser}} = 1,5 \text{ °C}$, $\Delta T_{\text{Erde}} = 5,2 \text{ °C}$. Aus dem Diagramm geht auch hervor, dass die erreichten Höchsttemperaturen erst mit einer Verzögerung zum Abschaltzeitpunkt der Lampe erreicht wurden. D.h. dass nicht nur Strahlung, sondern auch massebehafteter Energieaustausch stattfand. Für eine stärkere Eingrenzung auf die Energieübertragungsart der Strahlung empfiehlt sich eine kürzere Bestrahlungszeit.

Physikalischer Hintergrund

Ausgehend vom Halogenstrahler wird Energie in Form von Wärmestrahlung der Erde und dem Wasser zugeführt, wodurch sich die jeweiligen Temperaturen erhöhen. Das Verhältnis von Wärmemengenänderung ΔQ zu Temperaturänderung ΔT bezogen auf einen 1 kg eines Stoffes bezeichnet man als dessen *spezifische Wärmekapazität* c (vgl. Meschede, 2010, S. 258 f.). Sie ist eine Materialeigenschaft, die auch schwach von der Temperatur sowie vom Druck abhängt. Für grobe Abschätzungen reicht es die Massenabhängigkeit zu berücksichtigen, da sich die Werte von c innerhalb eines relativ großen Temperaturbereichs kaum ändern (vgl. Giancoli, 2010, S. 656).

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (23)$$

Zur Abschätzung der Energieaufnahme durch die gemessene Temperatur gelangt man durch die Überlegung, dass den beiden Schalen gleich viel Energie durch den Strahler zugeführt wurde.

$$\Delta Q_{Wasser} = \Delta Q_{Erde} \quad (24)$$

Die Masse m aus (23) lässt sich darstellen als Produkt aus Volumen V und der Massendichte ρ . Die beiden identen Schalen wurden gleich hoch mit Erde bzw. Wasser gefüllt, womit gilt: $V_{Erde} = V_{Wasser}$. Mit den Literaturwerten (vgl. Schönwiese, 2013, S. 127) für die spezifischen Wärmekapazitäten ($c_{Wasser} = 4,19 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$; $c_{Erde} = 0,80 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$) und Massendichte ($\rho_{Wasser} = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$; $\rho_{Erde} = 1,3 \text{ g}/\text{cm}^3$) setzt man in (24) ein und erhält:

$$c_{Wasser} \cdot \rho_{Wasser} \cdot V_{Wasser} \cdot \Delta T_{Wasser} = c_{Erde} \cdot \rho_{Erde} \cdot V_{Erde} \cdot \Delta T_{Erde}$$

$$\frac{c_{Wasser} \cdot \rho_{Wasser}}{c_{Erde} \cdot \rho_{Erde}} = \frac{V_{Erde} \cdot \Delta T_{Erde}}{V_{Wasser} \cdot \Delta T_{Wasser}} \quad (25)$$

$$\frac{4,19}{1,04} = \frac{\Delta T_{Erde}}{\Delta T_{Wasser}}$$

Das heißt bei gleicher Energiezufuhr erwärmt sich ein Volumen Erde um das 4,03-fache gegenüber einem gleichen Volumen Wasser. Auf Grund der im Verhältnis zu den meisten anderen Stoffen großen spezifischen Wärmekapazität von flüssigem Wasser führt eine hohe Energiezufuhr nur zu einem geringen Temperaturanstieg. Diese Eigenschaft macht das Wasser, aus denen Ozeane hauptsächlich bestehen, für das Klimasystem der Erde zu einem bedeutenden Einflussfaktor.

Die aus Abb. 25 stammenden Messwerte ergeben ein Verhältnis von 3,47. Die Abweichung zu Gleichung (25) erklärt sich einerseits aus den Differenzen von den tatsächlichen bzw. den verwendeten Literaturwerten der verschiedenen spezifischen Wärmekapazitäten. Andererseits kommt es zu einer Temperaturabnahme durch eine Energieabgabe der beiden Schalen an die Umgebung.

Bemerkungen

Übertragen auf das System Erde lässt dieses Experiment erahnen, welche Bedeutung das Wasser für das Klima als ‚Wärmespeicher‘ hat. Am Tag wird die Erde durch die Sonne bestrahlt und heizt sich auf, während sie in der Nacht abkühlt. Wie der Versuch gezeigt hat, ist das Wasser träge und seine Temperatur ändert sich selbst bei größeren Energieänderungen relativ wenig. Auch bei längeren Perioden wie beispielsweise Sommer- und Winterhalbjahr macht sich

die hohe spezifische Wärmekapazität von flüssigem Wasser bemerkbar, indem die über den Sommer zugeführte Energie im Laufe des Winters wieder abgegeben wird. Daneben kann die kurzweilige Sonnenstrahlung in Wasser tiefer eindringen als in festen Böden und die thermisch angetriebene Durchmischung des Wassers ist wesentlich wirkungsvoller als die Wärmeleitung des Bodenwärmestroms. Dies führt selbst bei hoher Einstrahlung tagsüber nur zu einem geringen fühlbaren Wärmestrom, da die meiste Energie dem Wasser zugeführt wird. Bei der Abgabe dieser Energie steigt der Wasserdampfgehalt der Luft, welcher die atmosphärische Gegenstrahlung erhöht. Dieses Wirkungsgefüge sorgt für einen ausgeglichenen Tages- und Jahresgang der Temperatur in Küstenregionen. Verglichen mit dem maritimen Klima ist der Temperaturverlauf in kontinentalklimatischen Regionen Schwankungen im Tages- und Jahresgang unterlegen (vgl. Gebhardt, Glaser, Radtke, & Reuber, 2011, S. 203-207).

Der Zuwachs an Energie im Klimasystem wird mehrheitlich im Ozean gespeichert. Die globale Erwärmung ist in den oberen 75 m des Ozeans am größten (s. Abschnitt 3.4.3) (vgl. IPCC, 2014, S. 40).

4.2.3. Abhängigkeit der Strahlungsintensität von Abstand & Azimut-Winkel

Die an der Atmosphärenoberfläche ankommende Strahlungsleistung der Sonne erreicht nur dann $1\,368\text{ W/m}^2$ (s. Gleichung (13)), wenn die Strahlen senkrecht auf die Oberfläche treffen. Die unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse, d.h. die Klimazonen der Erde sind abhängig vom Einfallswinkel der Sonnenstrahlen. Diese Winkelabhängigkeit der Strahlungsintensität wird mithilfe einer kleinen Solarzelle veranschaulicht.

Material

- Halogenstrahler
- Solarzelle
- Spannungsmessgerät
- 2 Kabel
- Maßband
- Kl. Elektromotor (fakultativ)
- Stativ (fakultativ)

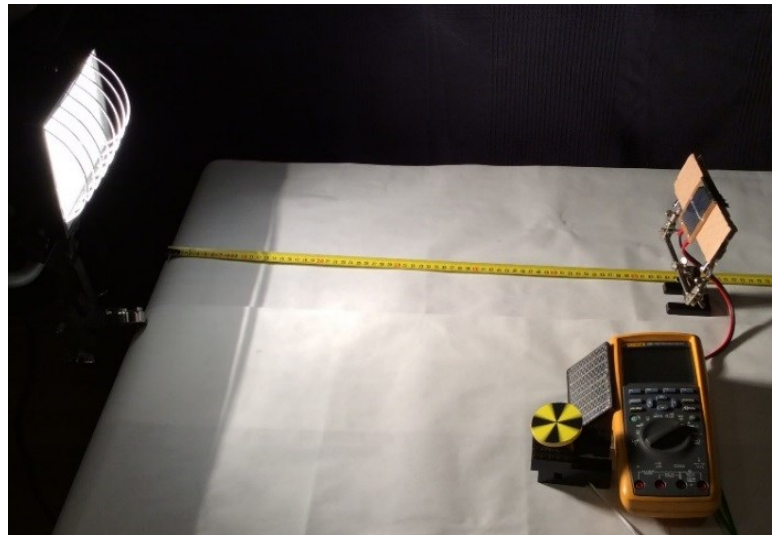


Abb. 26: Versuchsanordnung für die Beobachtung der Winkelabhängigkeit der Strahlungsintensität (eigene Aufnahme)

Aufbau & Durchführung

Die Solarzelle wird direkt mit dem Spannungsmessgerät verbunden. Mit dem Solarpanel in der Hand (oder an einem Stativ) kann man, je nach Neigung zur Strahlungsquelle, bereits verschiedene Spannungswerte beobachten. Alternativ kann anstatt dem Spannungsmessgerät auch ein kleiner Elektromotor mit der Solarzelle verbunden werden. Eine am Motor angebrachte Scheibe verdeutlicht die unterschiedlichen Drehgeschwindigkeiten je nach einfallender Intensität auf die Zelle. Möchte man tatsächlich nur den Unterschied beobachten, der durch verschiedene Einfallswinkel verursacht wird, so ist immer derselbe Abstand zwischen Strahler und Solarzelle einzuhalten.

Als eine Variante dieses Versuchs kann die Solarzelle am Stativ in einer vertikalen Position fixiert werden, um die Abstandsabhängigkeit der Intensität durch die unterschiedlichen Spannungswerte am Messgerät zu veranschaulichen. Erst durch den ‚passenden‘ Abstand zum Mutterstern ist es aeroben Lebewesen möglich, einen Planeten zu bewohnen. Man nennt dies die habitable Zone.

Physikalischer Hintergrund

Die auf eine Fläche einfallende Strahlungsintensität ist am größten, wenn die Fläche senkrecht zur Strahlung steht. Am Äquator ist dies der Fall, wohingegen die Sonneneinstrahlung an den Polen nur in einem sehr flachen Winkel auftreten (s. Lambert'sche Gesetz, Gleichung (8), Abb. 4). Die verschiedenen Klimazonen der Erde sind dadurch bedingt, dass mit zunehmender geographischer Breite weniger Energie pro m^2 auf der Erdoberfläche einfallen. Derselbe Effekt ist, bedingt durch die Ekliptik, für die jahreszeitlichen Schwankungen verantwortlich. Im Vergleich zum Winter ist die einfallende Sonnenstrahlung im Sommer steiler, wodurch mehr Energie pro Fläche einfällt.

Bemerkungen

Bei der im Versuch verwendeten Solarzelle handelt es sich um ein fertiges Spielzeug-Set, das aus den folgenden Komponenten besteht: Solarzelle ($0,45 \text{ V}$; $I_{\text{max}} = 400 \text{ mA}$; $85 \times 55 \text{ mm}$), Elektromotor mit Kabel, Kunststoffaufsteckpropeller und -scheiben mit bedruckten Kartons. Die Anschaffungskosten von 10 € für einen Einsatz in der Schule sind überschaubar. Solarzellen, mit und ohne Zubehör, sind leicht und günstig zu beziehen. Neben dem hier beschriebenen Versuch können mithilfe einer kleinen Solarzelle weitere Experimente durchgeführt werden, beispielsweise 4.2.4 oder im Themenbereich „erneuerbare Energien.“

4.2.4. Die Infrarotstrahlung im kontinuierlichen Spektrum

Im Spektrum der Sonne gibt es Infrarotanteile, die ebenso wie kurzwelligere Anteile (beispielsweise sichtbares Licht) auf die Atmosphäre bzw. Erde treffen. Die für unser Auge unsichtbare Strahlung über dem roten Bereich soll mittels Verwendung einer kleinen Solarzelle erfahrbar gemacht werden.

Material

- Diaprojektor mit 150 W Lampe
- Spalt-Dia
- Kleine Solarzelle
- CD-Rohling
- Spannungsmessgerät
- 2 Kabel
- Weißes Kartonblatt
- 2 Stative/ Klemmfüße
- Karton-Schachtel/ Schirm (fakultativ)

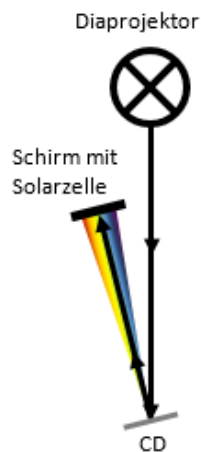


Abb. 28: Schematische Darstellung des Strahlengangs (eigene Darstellung)

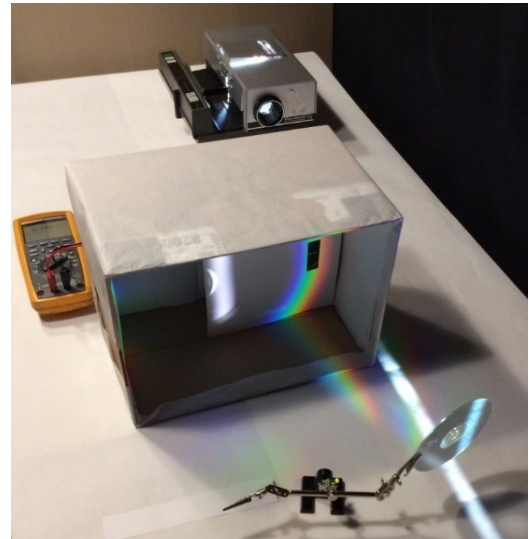


Abb. 27: Optische Anordnung zum Nachweis eines Infrarotanteils im Spektrum einer Glühlampe (eigene Aufnahme)

Aufbau

Für die Demonstration von Beugungsphänomenen werden in Schulen hauptsächlich Prismen verwendet. Glas ist für Infrarotstrahlung jedoch kaum durchlässig. Daher sind auf Grund der starken Absorption im langwelligen Bereich im Prisma keine verwertbaren Messergebnisse zu erwarten. Für die Durchführung dieses Versuchs benötigt man ein reflektierendes Beugungsgitter, am einfachsten eine CD oder DVD. Das Spalt-Dia kann, ausgeschnitten aus einem Karton, selbst hergestellt werden. Die gewählte Spaltbreite im Messbeispiel beträgt 2 mm. Die mit einem Spannungsmessgerät verbundene Solarzelle ist soweit mit einem weißen Karton abgedeckt, dass nur ein rund 16 mm breiter Streifen frei bleibt. Für die Abbildung des reflektierten Beugungsbild fungiert ein weißer Karton (in dem sich auch die Solarzelle befindet) als Schirm. Damit möglichst wenig Streulicht auf die Solarzelle fällt, kann diese noch zusätzlich mit einem Karton abgeschirmt werden. Die optische Anordnung, gezeigt in Abb. 27, erlaubt es, das Licht vom Diaprojektor über die CD auf der Solarzelle abzubilden. Der Spalt im Dia ist vertikal orientiert. Mit dem Objektiv des Diaprojektors kann der Spalt in der Ebene der Solarzelle scharf gestellt werden.

Durchführung

Im Raum soll es so dunkel wie möglich sein. Zuerst dreht man die CD derart, dass das unzerlegte weiße Spaltbild unter Beobachtung der angezeigten Leerlaufspannung U_{oc} auf die Solarzelle fällt. Rechts und links davon sieht man die kontinuierlichen Spektren der Beugung erster Ordnung. Durch Drehen der CD können die einzelnen Spektralbereiche auf der freien Fläche der Solarzelle abgebildet werden. Die gemessene Spannung ist nun geringer. Anschließend positioniert man die CD so, dass der rote Bereich auf den abgedeckten Teil der Solarzelle trifft und keine sichtbare Strahlung mehr auf die freie Solarfläche fällt. Am Spannungsmessgerät kann man dennoch eine geringe Spannung ablesen, die über jener liegt, die von der Hintergrundstrahlung hervorgerufen wird. Die für die Spannung nötige Energie wird von der Infrarotstrahlung transportiert.

Im Messbeispiel wurde ein Diaprojektor mit einer 150 W Lampe und ein Spalt-Dia mit einer Spaltbreite von 2 mm verwendet. Zum Einsatz kamen zwei unterschiedliche Solarzellen, die direkt mit dem Messgerät verbunden wurden, um die Leerlaufspannung zu detektieren. Eine stammt aus dem in Versuch 4.2.3 beschriebenen Set der Firma Conrad, die zweite eingesetzte Solarzelle misst 50 x 30 mm und weist folgende Angaben auf: ETM, $I_{max} = 500 \text{ mA}$, $U = 0,5 \text{ V}$. Die Messergebnisse sind in Tab. 6 dargestellt.

Tab. 6: Gemessene Leerlaufspannungen an Solarzellen zum Nachweis der Infrarotstrahlung im Spektrum einer Glühlampe
 U_{oc} [mV] ... Leerlaufspannung, Angabe abzgl. der Hintergrundintensität;
 *Angabe Messwert

	Solarzelle Conrad U_{oc} [mV]	Solarzelle ETM U_{oc} [mV]
Weißer Reflexion	34,1	54,7
Teilspektrum Blau	2,1	1,9
Teilspektrum Grün	3,7	4,1
Teilspektrum Rot	6,1	6,6
Teilspektrum nahes Infrarot	2,6	2,4
Gemessene Hintergrundintensität	0,6*	0,8*
Beleuchtete Fläche	85x16 mm	50x16 mm

Der Versuch zeigt, dass die Solarzelle auch eine Spannung aufbaut, wenn sie von Strahlung erreicht wird, die jenseits des sichtbaren roten Bereichs liegt. Dabei handelt es sich um Infrarotstrahlung (s. Abb. 1).

Physikalischer Hintergrund

Auf der Datenseite einer Compact Disc (CD) finden sich Rillen, sogenannte Spuren und Erhebungen in konzentrischen Kreisen. Dadurch und dank der verspiegelten Datenunterseite wirkt die CD wie ein Reflexionsgitter, da einfallendes Licht reflektiert und gebeugt wird. Bei senkrecht zur CD-Oberfläche einfallender Strahlung lassen sich die Winkel α der Beugungsmaxima N durch $\sin \alpha_N = N \cdot \lambda / g$ berechnen. Dabei ist g die sogenannte Gitterkonstante, die im Falle einer CD der Abstand zwischen zwei Spuren mit $g = 1,6 \mu\text{m}$ ist. In diesem Zusammenhang wird deutlich, dass die Beugungswinkel von der Wellenlänge λ abhängen und es zur Aufspaltung der einzelnen Farben kommt. Mit einer DVD funktioniert der Versuch genauso, allerdings sind die Abstände der Spuren (g) andere.

In erster Linie repräsentieren die Messdaten die spektrale Empfindlichkeit der verwendeten kristallinen Solarzellen, die im Bereich des sichtbaren blauen Lichts geringer ist als im roten. Bei der Messung der Leerlaufspannung mittels Spannungsmessgerätes (hoher Innenwiderstand) ist darauf zu achten, dass kein nennenswerter Strom fließt. Daher wird das Solarpanel direkt mit dem Messgerät verbunden, ohne einen (weiteren) Verbraucher dazwischen zu schalten. Bereits bei geringen Intensitäten steigt die temperaturabhängige Leerlaufspannung, die nicht linear von der Bestrahlungsstärke abhängt, gegen ihren Maximalwert.

Bemerkungen

Der Versuch stellt allgemein eine Möglichkeit dar, die für das menschliche Auge unsichtbare und daher schwer zu erfassende Infrarotstrahlung wahrnehmbar zu machen. Im kontinuierlichen Spektrum der Sonne (s. Abb. 9) sind nicht nur kurzwellige Strahlungsanteile im UV-Bereich und jenem Bereich des sichtbaren Lichts, sondern ebenso ein großer Infrarotanteil vorhanden, der teilweise in der Atmosphäre absorbiert wird.

4.3. Absorption kurzwelliger Strahlung und Emission langwelliger Strahlung

Trifft solare Strahlung auf die Erdoberfläche, wird sie absorbiert. Daraufhin emittiert die Erdoberfläche die einfallende Energie in Form von langwelliger Strahlung. Die folgenden Experimente beschäftigen sich mit diesem Phänomen, wobei anfangs die in unserer Alltagserfahrung kaum wahrgenommene Infrarotstrahlung anhand kurzer Freihandversuche behandelt wird.

4.3.1. Freihandversuche zur Infrarotstrahlung

Wie in Kapitel 3 ausführlich beschrieben, emittiert jeder Körper mit einer Temperatur über 0 K Strahlung. Das menschliche Temperaturempfinden ist subjektiv, da uns Sensoren ähnlich eines Thermometers fehlen, um die physikalische Temperatur ‚eindeutig zu spüren‘. Berührt man beispielsweise bei einem Geländer erst den Handlauf aus Holz und dann die Befestigung aus Metall, so erscheint uns das Holz wärmer als das Metall, auch wenn beide die gleiche Temperatur haben. Gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (s. Gleichung (7)) strahlt ein Körper in Abhängigkeit seiner Temperatur. Haben der strahlende Körper und seine Umgebung annähernd die gleiche Temperatur, so fällt es uns Menschen schwer, diese geringen Temperaturunterschiede zu fühlen. Da die infrarote Strahlung für das menschliche Auge unsichtbar ist, fehlt uns ein intuitiver Wahrnehmungszugang für diese Strahlung. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Freihandversuche machen Infrarotstrahlung erkenn- bzw. fühlbar.

Freihandversuch I – IR-Diode

Fernbedienungen von Fernsehgeräten sind häufig mit einer Infrarot-Diode ausgestattet, um das gewünschte Signal ohne physische Verbindung zwischen den beiden Geräten austauschen zu können. IR-Leuchtdioden können Wellenlängen von 840 nm bis 950 nm emittieren, wobei jene mit 840 nm in Verbrauchergeräten am Häufigsten anzutreffen sind. Die meisten Digitalkameras können in diesem nahen Infrarotbereich die elektromagnetischen Wellen sichtbar machen. Grundsätzlich reicht die Strahlungsempfindlichkeit von

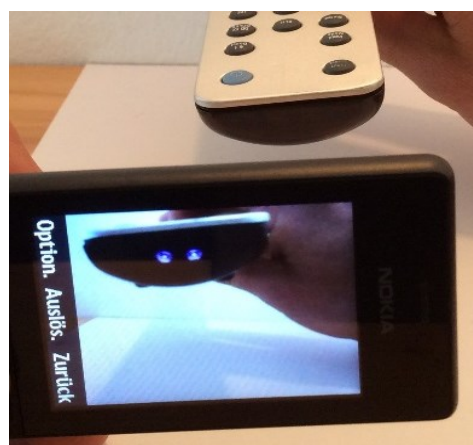


Abb. 29: IR-Diode einer Fernbedienung (eigene Aufnahme)

CCD-Chips auf Siliziumbasis bis 1100 nm, jedoch sind bei einigen Kameras Infrarotfilter verbaut. Die IR-Diode leuchtet dann blau-weiß. In Abb. 29 erkennt man, dass die verbaute

Kamera des Mobiltelefons die Infrarotstrahlung ‚sieht‘, die des Tablets mit der die Aufnahme gemacht wurde aber nicht (s. Front der Fernbedienung im oberen Bereich in Abb. 29).

Freihandversuch II – 3 Bechergläser

Für diesen Versuch werden drei gleiche Bechergläser benötigt, die mindestens mit 250 ml Wasser befüllt werden. Außerdem benötigt man einen Wasserkocher oder einen Tauchsieder und eine Stoppuhr. Das Wasser für ein Gefäß wird 3 Minuten, das des zweiten Bechers halb so lange erwärmt. Das Wasser im dritten Glas wird nicht erwärmt. Nun fühlt man seitlich der Bechergläser mit den Fingern die infrarote (Wärme-)Strahlung in unterschiedlicher Intensität, je nach Temperatur des darin befindlichen Wassers. Man kann auch mit der Wange fühlen, da diese Körperbereiche besonders empfindlich auf Wärme reagieren. Hier ist Vorsicht angebracht, sich nicht zu verbrühen. Fühlt man über den Gefäßen, ist die empfundene Wärme stärker, da hier, neben der Wärmestrahlung, auch die Konvektion (Wärmestrom) Wärme transportiert. Man kann den Versuch auch zuhause, beim Zubereiten eines Tees, durchführen, da durch das kochende Wasser der Temperaturunterschied zur Umgebung so groß ist, dass der Versuch dann auch mit einer Keramiktasse funktioniert.

Freihandversuch III – Infrarotstrahler

Bei diesem Versuch wird eine Thermosäule nach Moll (s. Abschnitt 4.1) verwendet. Es kann auch der Körper als ‚Detektor‘ der Infrarotstrahlung dienen.

Material

- Keramikstrahler 150 W
- Thermosäule
- Spannungsmessgerät
- Stativmaterial
- Kabel

Aufbau & Durchführung

Das Stativ mit der Thermosäule wird mit Kabeln mit dem Spannungsmessgerät

verbunden. Nach dem Einschalten des Multimeters lässt sich erkennen, dass kaum eine Spannung detektiert wird. Nun positioniert man den Keramikstrahler mit hinreichendem Abstand vor die Thermosäule. Dabei kann man beobachten, dass die (unsichtbare) infrarote Strahlung zu einem Ansteigen der gemessenen Spannung führt.



Abb. 30: Emission von Infrarotstrahlung eines Keramikstrahlers (eigene Aufnahme)

4.3.2. Wärmetransport durch Konvektion und Strahlung

Gemessen wird die Temperatur eines Absorbers, dem Energie einmal über Wärmestrahlung und einmal über Wärmestrahlung und Konvektion zugeführt wird. So soll der Unterschied der Energieübertragung zwischen Strahlung und Konvektion veranschaulicht werden. Innerhalb der Atmosphäre (aber auch in den Ozeanen) spielt die Konvektion eine entscheidende Rolle für einen globalen Energieaustausch.

Material

- Keramikstrahler 150 W
- Thermometer
- Aluminiumplatte
- Stativmaterial
- Stoppuhr
- Klebeband
- Maßband

Aufbau

Um die Wirkung der Konvektion zu messen, wird der Strahler unterhalb der Aluminiumplatte, die als Absorber dient, positioniert. Die Abstrahlung der Keramiklampe ist entgegen der Schwerkraft gerichtet. Um die Versuchsdauer zu reduzieren, sollte der Abstand zwischen Strahler und Absorber nicht zu groß sein. Das Thermometer ist an der strahlungsabgewandten Seite direkt hinter der Aluminiumplatte, berührt diese aber nicht. Die vor und während der Energiezufuhr gemessene Temperatur wird jede Minute notiert. Nachdem die Messapparatur abgekühlt ist, wird der Versuchsaufbau gedreht (s. Abb. 31) und derselbe zeitliche Temperaturverlauf noch einmal gemessen, der jetzt aber durch die Wärmestrahlung dominiert wird. Während der Messung ist Zugluft zu vermeiden, sodass eine relative Vergleichbarkeit der beiden Messreihen herrscht. Andere Effekte können bei kurzer Versuchsdauer vernachlässigt werden.

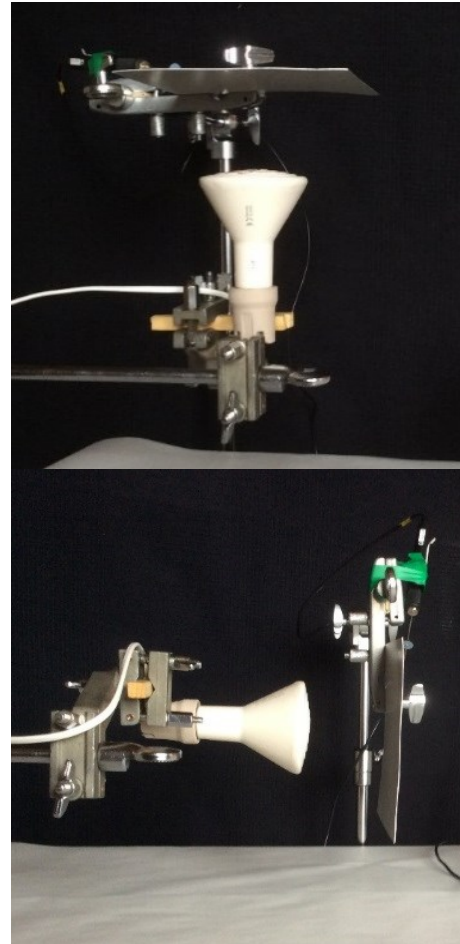


Abb. 31: Versuchsanordnung für einen Vergleich zwischen Strahlung und Konvektion (eigene Aufnahmen)

Durchführung

Im Messbeispiel, dessen Temperaturverläufe in Abb. 32 ersichtlich sind, wurde ein Abstand von 8 cm zwischen Strahler und Absorber gewählt, wobei beide Messreihen jeweils nach 7

Minuten beendet wurden. Die geringere Temperaturdifferenz zwischen dem Start der Messreihe und der ersten Minute ist der Verzögerung geschuldet, die der Keramikstrahler benötigt, um seine Leistung zu entfalten. Nach 7 Minuten ist eine Temperaturdifferenz von $\Delta T_7 = 27,7^\circ\text{C}$ erreicht. Aus dem Messbeispiel wird ersichtlich, dass bei einer Beteiligung der Konvektion die Energieübertragung wesentlich effizienter ist als rein durch Wärmestrahlung. Diese Feststellung ist jedoch nicht allgemeingültig, sondern trifft auf den unteren Teil der Atmosphäre zu.

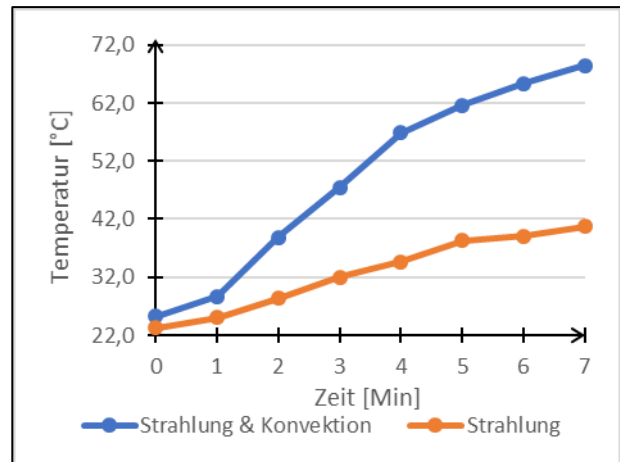


Abb. 32: Temperaturverläufe eines Absorbers während der Energiezufuhr einmal durch Strahlung und Konvektion und einmal nur durch Strahlung

Physikalischer Hintergrund

Bei der Konvektion handelt es sich um einen Massentransport bei dem u.a. Wärme in Form innerer Energie übertragen wird. Warme Flüssigkeits- oder Gasschichten mit geringerer Dichte steigen durch Auftriebskräfte nach oben. Die darüberliegende kältere Schicht sinkt dabei nach unten. So führt die Konvektion zu einem Wärmetransport von wärmere in kältere Raumgebiete. Die dabei transportierte Wärmemenge ist abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen sich vermischenden Nachbarschichten. Je nach Randbedingungen stellt sich eine laminare oder turbulente Konvektionsströmung ein (vgl. Demtröder, 2006, S. 292, 293).

Bemerkungen

In der Stratosphäre sind die Energieaustauschprozesse strahlungsbestimmt. In der erdnahen Troposphäre dominiert die Konvektion die Energieaustauschprozesse (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 186). Ein durch die Sonnenstrahlung aufgeheizter Erdboden erwärmt auch die an ihr angrenzende Luftschicht. In der Atmosphäre führt die erwärmte aufsteigende Bodenluft zu einem lokalen Tiefdruckgebiet. Durch die nachströmende Luft aus Arealen höheren Drucks entstehen Winde, die wiederum Masse und Wärmeenergie transportieren (vgl. Demtröder, 2006, S. 293). Mit kreisförmig angeordneten Kerzen lässt sich ein Minitiefdruckgebiet experimentell nachstellen. In diesem Freihandversuch lässt sich beobachten, dass die Kerzenflammen sich nach innen neigen. Dies geschieht durch die nachströmende Luft von außen, die den durch Konvektion bewirkten Unterdruck innerhalb des Kerzenkreises ausgleicht (vgl. Menner & Nistelberger, 2016, S. 130, 131).

4.3.3. Der Glashauseffekt

Dieser Versuch schließt an die Alltagserfahrung an, dass lichtdurchlässige Gebäude oder Autos ‚Wärme sammeln‘. Er soll helfen, bekannte Eindrücke in das Bewusstsein der SuS zu rücken. Unter gegebenen didaktischen Rahmenbedingungen kann anhand dieses Experiments das häufig anzutreffende Analogon des Gewächshauses thematisiert und dem planetaren Treibhauseffekt gegenübergestellt werden.

Material

- Lichtdurchlässiges Gefäß (z.B. dünnwandiges kleines Aquarium, Acrylglas- od. PE-Gefäß)
- 2 Thermometer
- Stoppuhr
- Ebener, gleichfärbiger Untergrund
- Karton- od. Aluschirme
- Strahler od. direktes Sonnenlicht

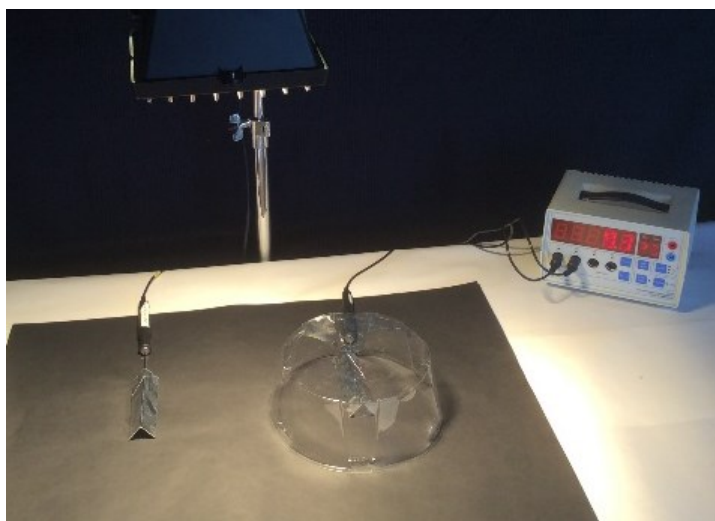


Abb. 33: Versuchsaufbau zum Glashauseffekt (eigene Aufnahme)

Aufbau

Die beiden Thermometer werden auf den ebenen, gleichfarbigen Untergrund gelegt, wobei sie den Boden nicht berühren. Eines der beiden Thermometer befindet sich im Freien, das andere in einem lichtdurchlässigen Gefäß. In Abb. 33 ist der Versuchsaufbau mit einem Halogenstrahler, der die solare Strahlung symbolisiert, abgebildet. Man kann den Versuch ebenso im Freien unter direktem Sonnenlicht durchführen. Für beide Varianten gilt beim Aufbau, dass die beiden Thermometer vor direkter Strahlung geschützt werden sollen. Hierzu reicht je ein gefaltetes Papierdach. Im Messbeispiel sind diese mit Aluminiumfolie ummantelt.

Durchführung

Führt man den Versuch im Freien durch, kann mit der Messung begonnen werden, sobald der beschriebene Aufbau realisiert wurde. Im Klassenraum bei künstlichem Licht, wie im Messbeispiel, startet die Messreihe mit der Temperatur unmittelbar vor dem Einschalten des Strahlers. In Abb. 34 ist der Temperaturverlauf der beiden Thermometer aufgetragen. Der rasche Temperaturanstieg beider Thermometer ist der künstlichen Bestrahlung durch einen Halogenstrahler (400 W) in einer Entfernung von 50 cm geschuldet. Das ‚Gewächshaus‘-Thermometer wurde durch eine Öffnung in dem PE-Gefäß platziert, sodass das Gefäß bündig

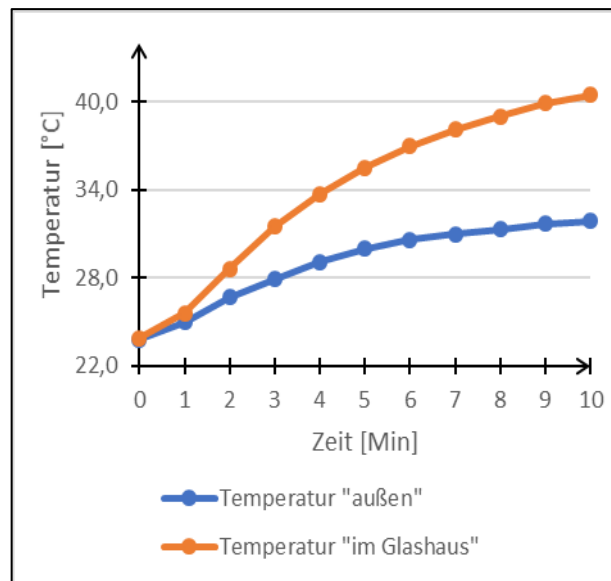


Abb. 34: Temperaturverlauf unter Bestrahlung innerhalb und außerhalb eines Modellgewächshauses

mit dem Boden abschloss. Bereits nach 2 Minuten ist ein deutlicher Temperaturunterschied messbar ($\Delta T_2 = 1,9^\circ\text{C}$), der im zeitlichen Verlauf kontinuierlich zunimmt und nach 10 Minuten $\Delta T_{10} = 8,6^\circ\text{C}$ beträgt.

Physikalischer Hintergrund

Auf Grund der Lichtdurchlässigkeit des Modelltreibhauses kann die kurzwellige Strahlung eindringen. Diese wird am Boden absorbiert und trägt dadurch zur Erwärmung der darüber befindlichen Luftschicht bei. Diese Luftschicht kann aus dem Haus nicht entweichen, wodurch ein Wärmeaustausch mit der Umgebung stark reduziert ist (s. Abb. 12). Nach Kapitel 3.4 ist bekannt, dass der planetare Treibhauseffekt auf dem Absorptionsverhalten atmosphärischer Moleküle basiert.

Bemerkungen

Den Versuch im Freien durchzuführen, stellt die didaktisch attraktivere Variante dar, da es den Modellcharakter reduziert. Parallel dazu steigt die aufgewendete Unterrichtszeit in Relation zur reinen Versuchszeit.

4.3.4. Erwärmung der Atmosphäre durch terrestrische Abstrahlung

Die Sonnenstrahlung erwärmt den Erdboden und dieser wiederum die Atmosphäre. Dieser Modellversuch stellt das System Erde-Atmosphäre anhand einer Kunststoffflasche nach.

Material

- Halogenstrahler 80 W (z.B. Schreibtischlampe)
- PET-Flasche (1,5 l)
- Schwarzer Karton
- PE-Folie
- 2 Thermometer
- Stoppuhr
- Klebeband
- Stativmaterial

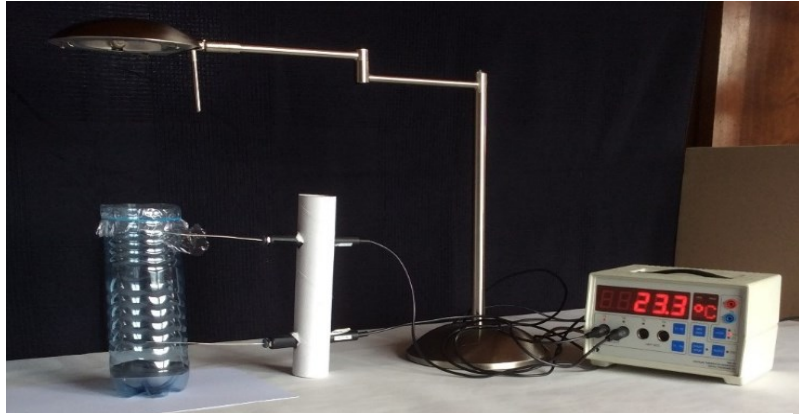


Abb. 35: Versuchsaufbau des Experiments „Erwärmung der Atmosphäre“ (eigene Aufnahme)

Aufbau

Bei einer handelsüblichen PET-Flasche wird der Flaschenhals abgeschnitten, sodass man am Flaschenboden einen schwarzen Karton anbringen kann, der die Erdoberfläche darstellen soll. Außerdem werden 2 Löcher in der Flaschenwand platziert, durch diese dann die Thermometer positioniert werden. Damit keine direkte Strahlung auf die Thermometer trifft, werden über den Löchern Aluschirmchen mit Klebeband fixiert. Eines der Thermometer befindet sich über dem Boden, das andere unter der PE-Folie mit der die Flaschenöffnung verschlossen wird. Die präparierte Flasche wird, wie in Abb. 35 zu sehen, direkt unter die Modellsonne, d.h. den Halogenstrahler gestellt.

Durchführung

Der im Diagramm (Abb. 36) gezeigte Temperaturverlauf wurde bei dem in Abb. 35 gezeigten Versuchsaufbau beobachtet. Die beiden Temperaturen wurden in einem Abstand von 13 cm zueinander gemessen. Die nach dem Einschalten des Strahlers rasch ansteigende Temperatur nähert sich nach rund 6 Minuten einem relativen Gleichgewichtszustand.

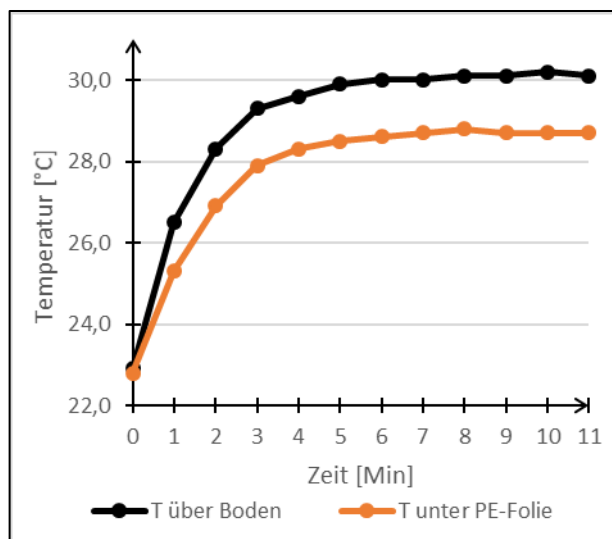


Abb. 36: Temperaturverlauf zum Experiment „Erwärmung der Atmosphäre“

Deutlich zu erkennen ist, dass sich die Lufttemperatur über dem Boden stärker erwärmt als jene unter der Folie.

In einer Variante des Experiments wurde dieselbe Messung nochmals durchgeführt. Dabei wurde am generellen Versuchsaufbau nichts geändert, jedoch die Flasche in eine aluminiumumwickelte Styroporbox gestellt. Hierbei zeigt sich im Allgemeinen derselbe Temperaturverlauf wie bei der unisolierten

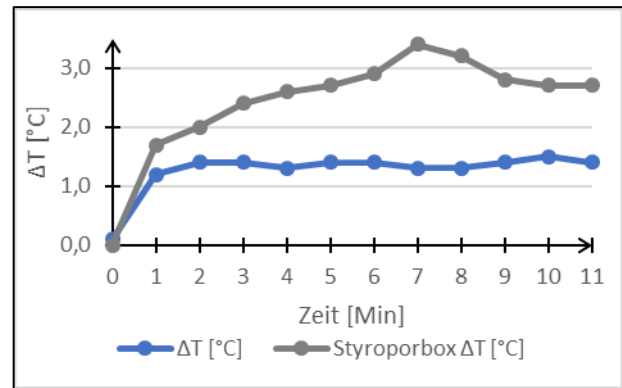


Abb. 37: Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen Boden und PE-Folie, mit unisolierter Flasche (blau), mit isolierter Flasche (grau)

Flasche (Abb. 36), jedoch mit dem Unterschied, dass die Temperatur deutlich schneller ansteigt ($\Delta T_{Boden, isoliert} - \Delta T_{Boden, un isoliert} = 4,9^{\circ}\text{C}$) und eine um knapp 22°C höhere Gleichgewichtstemperatur erreicht wurde. Erwartungsgemäß hemmt die Styroporbox die Austauschprozesse mit der Umgebung. Ein weiterer beobachteter Unterschied ist, dass sich bei der isolierten Variante auch ein größerer Temperaturunterschied zwischen der Bodenluft und der darüber befindlichen Luft einstellt (Abb. 37).

Physikalischer Hintergrund

Die kurzwellige Strahlung wird von Luft kaum, vom Boden jedoch stark absorbiert. Dadurch erwärmt sich die Luftschicht in Bodennähe stärker als in der darüberliegenden. Die Luft innerhalb der Flasche kann nicht entweichen, wodurch sie sich erwärmt. Bei der unisolierten Flasche stellt sich bereits nach 7 Minuten (Abb. 36) ein Fließgleichgewicht der Energie bei relativ konstanten Temperaturen in der Flasche $T_{Boden} = 30,0^{\circ}\text{C}$ bzw. $T_{Folie} = 28,7^{\circ}\text{C}$ ein, die auch nach 20 Minuten nicht überschritten wurden. Bei der isolierten Variante konnten nach 20 Minuten Messzeit noch Temperaturänderungen von $\Delta T = 0,1^{\circ}\text{C} - 0,3^{\circ}\text{C}$ registriert werden.

Bemerkungen

Dieses Experiment veranschaulicht die Erde als thermischen Strahler. Für einige SuS mag es entgegen ihrer Intuition sein, dass sich das von der (vermeintlichen) Strahlungsquelle, der Halogenlampe weiter entfernte Luftpaket rascher erwärmt. Wenn der schwarze Karton auf Grund der Absorption selbst als Strahler identifiziert ist, hilft es, sich die Erde als ebensolchen vorzustellen.

4.4. Absorptionsvermögen der Atmosphäre

Nach Kapitel 3 ist bekannt, dass es infrarotaktive Gase gibt, die auf Strahlung anders reagieren als jene Gasmoleküle, die über kein Dipolmoment verfügen. Die in diesem Kapitel vorgestellten Experimente demonstrieren das Absorptionsvermögen der Atmosphäre. Durch die Absorption erhöht sich die Temperatur des absorbierenden Gases. Anhand des Temperaturanstiegs sowie eines Intensitätsverlustes der Strahlung kann die Absorptionswirkung gezeigt werden.

4.4.1. Absorption in PE-Flaschen

Dieser Versuch hat zum Ziel, den Umfang der Versuchsmaterialien so einfach und gering wie möglich zu halten. Mittels handelsüblicher PET-Flaschen wird das Absorptionsvermögen von infrarotaktiven Spurengasen mit jenem der Luft verglichen.

Material

- Keramikstrahler (150 W)
- Stativmaterial
- 2 transparente PET-Flaschen mit Stopfen
- 2 Thermometer
- Stoppuhr
- CO₂ Gas
- N₂O Gas (fakultativ)
- Schlauch
- Maßband
- Markierungsstift

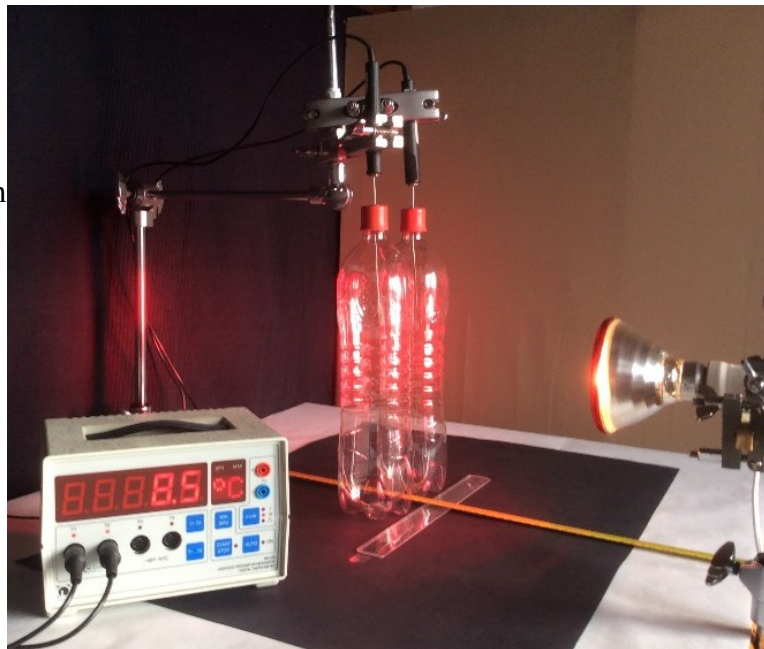


Abb. 38: Versuchsanordnung zur Beobachtung der Temperaturänderung zweier Gasgemische bei Absorption derselben Strahlungsenergie (eigene Aufnahme)

Aufbau

Die beiden PET-Flaschen werden je mit einem Gummistopfen verschlossen, der mit einer Bohrung versehen wird, die genauso groß ist, dass der Temperaturfühler schwergängig durchpasst. Der Gummistopfen darf sich während der Messung nicht verschieben können und es muss darauf geachtet werden, dass die Übergänge zur Flaschenöffnung und zum Messfühler des Thermometers dicht sind. Bei der Aufstellung der beiden PE-Flaschen nebeneinander ist sicherzustellen, dass sie in gleichen Maßen von der Lampe angestrahlt werden und sich nicht berühren. Die Sensoren des Thermometers sind an einem Stativ befestigt und durch die Gummistopfen im oberen Bereich der Flaschen positioniert. Für das Befüllen der Flaschen mit

einem klimawirksamen Spurengas wird ein kurzes Stück Schlauch benötigt, um sicherzustellen, dass das Gas bis an den Flaschenboden reicht. Im Messbeispiel wurden die Gase aus handelsüblichen Nachfüllpackungen in Kapselform verwendet. Dabei handelt es sich bei den sogenannten Sodakapseln um Kohlenstoffdioxid CO_2 und bei den Sahnekapseln um Distickstoffoxid N_2O . Die Kapseln wurden mit einer Sahnesprühflasche geöffnet und einige Minuten bei Raumtemperatur darin zwischengelagert. Damit kann man ungewünschte Effekte auf Grund der Abkühlung des Gases in Folge der raschen Ausdehnung beim Entweichen aus der Kapsel vermeiden. Dank der konischen Öffnung der Sprühflasche ist der Übergang zum Schlauch kaum verlustbehaftet.

Durchführung

Mit einer Testmessung, bei der sich in beiden Flaschen Luft befindet, kann festgestellt werden, ob sich die Temperaturen unter Bestrahlung parallel ändern. Danach wird in eine Flasche CO_2 und gegebenenfalls bei einer dritten Messung N_2O gefüllt. Nach dem Einschalten des Strahlers werden die Temperaturen jede Minute abgelesen. Die im Messbeispiel beobachteten Zeitverläufe der beiden Temperaturen in den Flaschen sind Abb. 39 zu entnehmen. Das Experiment wurde einmal mit einer Infrarotlampe und einmal mit einem Dunkelstrahler als Strahlungsquelle durchgeführt. Bei beiden Strahlern erwärmt sich der Gasinhalt mit höherem CO_2 -Gehalt schneller als jener mit Raumluft. Man erkennt auch die längere Aufwärmphase im Temperaturverlauf des Dunkelstrahlers (s. Abb. 20) sowie eine sich höher einstellende Gleichgewichtstemperatur. Die sich einstellende Temperaturdifferenz zwischen den beiden Gasgemischen ist bei der IR-Lampe ($\Delta T_{20} = 1,8^\circ\text{C}$) höher als bei dem Dunkelstrahler ($\Delta T_{20} = 1,1^\circ\text{C}$). In einer weiteren Versuchsreihe wurde das Verhalten von N_2O untersucht. Im

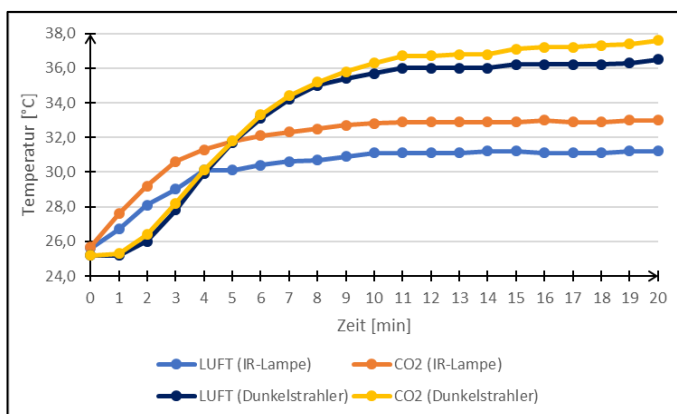


Abb. 39: Temperaturverlauf von Luft (blaue Linien) und CO_2 (orange Linien) bei Bestrahlung durch eine Infrarot-Lampe und durch einen Dunkelstrahler

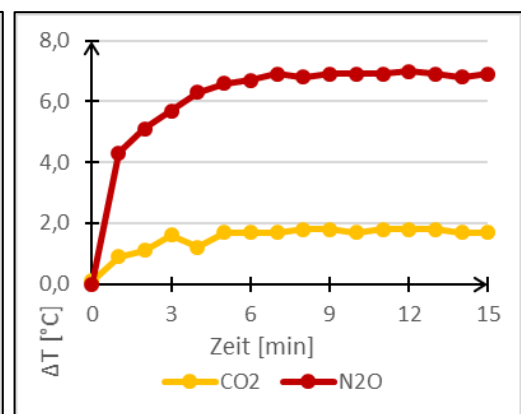


Abb. 40: Temperaturdifferenz zwischen Luft und CO_2 (orange Linie) sowie zwischen Luft und N_2O (dunkelrote Linie)

Vergleich zu CO_2 stellt sich, wie Abb. 40 zeigt, eine deutlich höhere Differenztemperatur zwischen N_2O und Luft ein.

Physikalischer Hintergrund

Über die generellen Vorgänge der Strahlungsabsorption wurde bereits in Kapitel 3 informiert. Der Vergleich der beiden Lampen ist nicht unproblematisch, da ihre Leistungen im Bereich der Absorptionsbanden der eingesetzten Spurengase unbekannt sind.

Bemerkungen

Mit diesem Versuch kann die Absorptionswirkung der Atmosphäre bzw. der infrarotaktiven Spurengase demonstriert werden. Mit geringem Mitteleinsatz kann die stärkere Erwärmung eines Gasvolumens mit höherem Anteil klimawirksamer Moleküle gezeigt werden. Bei dem Einsatz des Dunkelstrahlers kann die Versuchsdauer verkürzt werden, wenn dieser bereits vorgeheizt in den Experimentieraufbau eingesetzt wird.

4.4.2. Absorptionsrohr

Ziel dieses Experiments ist es, zu demonstrieren, dass Kohlenstoffdioxid (CO_2) Strahlung stärker absorbiert als Raumluft. Durch den Vergleich der Strahlungsintensität, die nach dem Durchtritt durch die Messstrecke noch detektiert wird, kann auf die Absorptionsstärke des jeweiligen Gases rückgeschlossen werden. Parallel zur Strahlungsintensität wird auch die Temperaturänderung der verwendeten Gase gemessen.

Material

- Keramikstrahler (150 W)
- Absorberrohr mit Ein- und Auslassventilen
- Frischhaltefolie (PE-Folie)
- Kohlenstoffdioxid (CO_2)
- Kältemittel R-134a (fakultativ)
- Schläuche
- Aluminiumfolie
- Kartonschirme
- Gummiringe (O-Ringe)
- Thermometer
- Thermosäule
- Multimeter
- Kabel
- Stativmaterial
- Knetmasse
- Klebestreifen
- Maßband



Abb. 41: Detailaufnahme des Absorberrohrs und der Thermosäule im Vordergrund (eigene Aufnahme)

Aufbau

Die Versuchsanordnung, in Abb. 42 gezeigt, besteht aus einer Strahlungsquelle, einem Strahlungsdetektor sowie einem Absorberrohr mit Thermometer. Beim Absorberrohr handelt

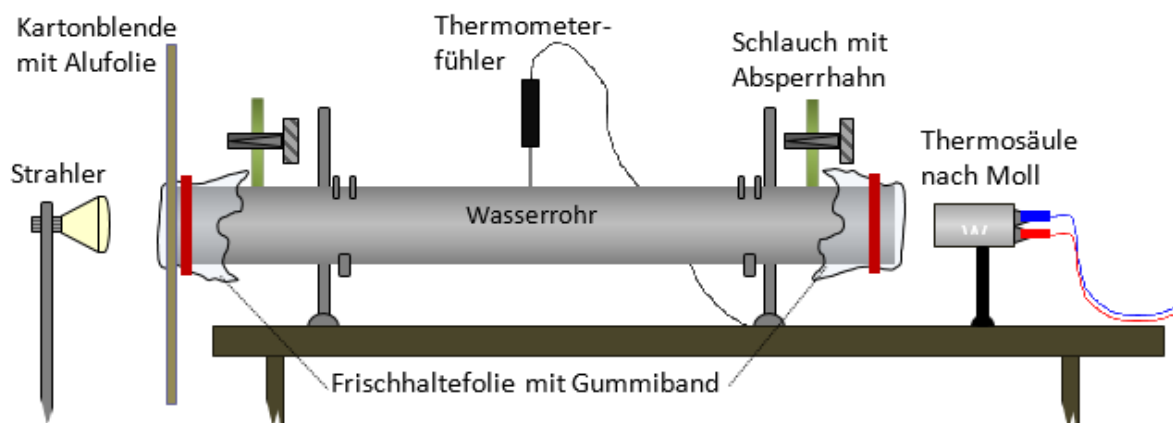


Abb. 42: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung zur Beobachtung der Strahlungsabsorption von Gasen (eigene Darstellung)

es sich um ein HT-Abwasserrohr mit einer Länge von 1 m und einem Innendurchmesser von 110 mm aus Polypropylen, welches sich durch seine Wärmebeständigkeit auszeichnet. Das Rohr, dessen Innenwände mit Aluminiumfolie verkleidet sind, verfügt über zwei mit Ventilen³⁴ schließbare Schlauchleitungen, die im Inneren des Rohrs auch mit Aluminiumfolie ummantelt sind. Die Aluminiumfolie dient zur Reflexion der einfallenden Strahlung. Sie soll einer allzu starken Absorption der Strahlung durch die Rohrwände entgegenwirken. In der Mitte des Rohrs befindet sich eine 2 mm große Öffnung, in der ein Messfühler des Thermometers, der ebenso mit Alufolie abgeschirmt ist, platziert wird. Diese Öffnung kann gegebenenfalls mit etwas Knetmasse abgedichtet werden. Der zweite Messfühler dient zur Kontrolle der Raumtemperatur in unmittelbarer Nähe des Absorberrohrs. Die beiden Stirnseiten des Rohrs werden durch einen Gummiring³⁵ mit PE-Folie (Frischhaltefolie) verschlossen. Die dem Strahler zugewandte Stirnseite wird mit einem mit Aluminiumfolie bezogenen Kartonschirm versehen, der nur eine Öffnung in der Größe des Innendurchmessers aufweist, sodass auch die Rohrwand an der Stirnseite abgedeckt ist. Dadurch soll ein Aufheizen des Absorberrohrs durch direkte Strahlung des Dunkelstrahlers verhindert werden. Der Keramikstrahler emittiert im Wellenlängenbereich von 3 μm - 10 μm Strahlung und steht im Versuch für die terrestrische Abstrahlung. Auf der gegenüberliegenden Stirnseite wird eine Thermosäule in kurzer Distanz (4 cm) zum Rohr positioniert, sodass möglichst wenig der unerwünschten Raumeinflüsse detektiert werden.

Durchführung

Das Verhalten der Gase wird hintereinander beobachtet. Im ersten Schritt wird die Raumluft im Absorberrohr bestrahlt. Dabei werden der Temperatur- und der Strahlungsintensitätsverlauf gemessen. Nach dem Schließen der Hähne sowie dem Einstellen eines konstanten Wertes am Thermometer kann mit der Messung begonnen werden. Dabei wird mit dem Einschalten des Strahlers jede Minute die Innenraumtemperatur und die Thermospannung notiert. Nach 7 Minuten kann die Messung beendet und die Strahlungsquelle ausgeschaltet werden. Das Rohr wird nun mit Kohlenstoffdioxid gefüllt. Durch die Entnahme des CO_2 aus einer Druckgasflasche expandiert das Gas rasch, was zu einer geringeren Temperatur führt. Daher wurde es während des Messablaufes mit Luft bereits in einen größeren Luftballon (günstige Alternative zu einem Gasbeutel) gefüllt bzw. zwischengelagert. Beim Befüllen sind beide Hähne zu öffnen, damit es nicht zu einem Überdruck bzw. einer Gasentweichung an der PE-

³⁴ Bei den Ventilen und den Schläuchen handelt es sich um Aquariumzubehör, welches in der Tierhandlung und teilweise in Baumärkten leicht zu beziehen ist.

³⁵ In der Muffe des HT-Rohrs befindet sich bereits ein Dichtring. Für einen festen Sitz der PE-Folie sind auch Dichtringe für Vorratsgläser (sogenannte „Rexgläser“) bestens geeignet, die man mit der Bezeichnung „Einkochringe“ im Handel findet.

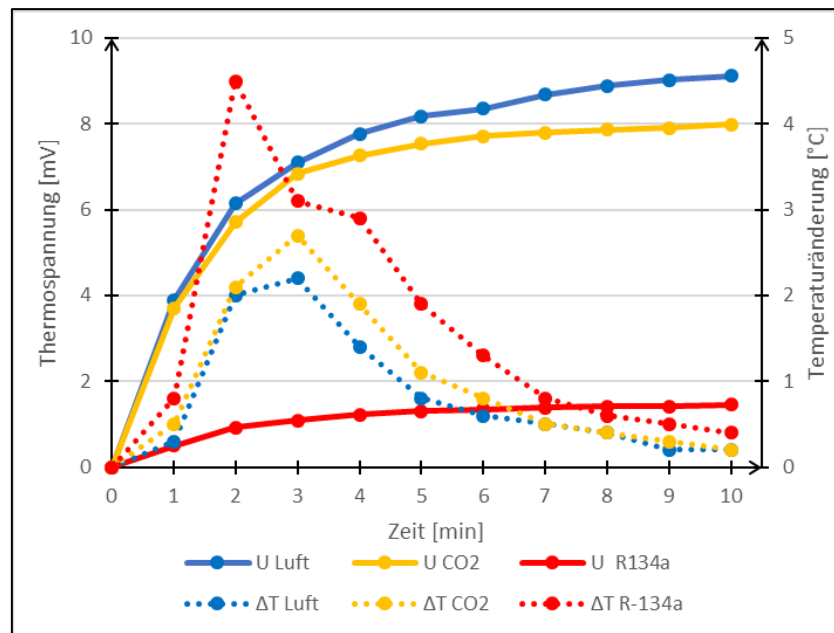


Abb. 43: Zeitlicher Verlauf der Thermospannung und der Temperaturänderung dreier Gase

Folie kommt. Da CO₂ ein höheres Molekulargewicht als Luft hat, drückt es die Luft über den Ablasshahn hinaus. Durch die Befüllung aus einem Ballon kann das Gas langsam einströmen. Ist der Ballon leer, kann die Strahlungsquelle aktiviert und damit derselbe Messverlauf wie zuvor mit Luft gestartet werden.

Das Diagramm in Abb. 43 zeigt die zeitlichen Verläufe der Thermospannung (durchgezogene Linien) und der Temperatur (strichlierte Linien) für die Gase: Luft (blau), CO₂ (orange) und das FKW R-134a (rot). Dabei handelt es sich um ein Fluorkohlenwasserstoff (1,1,1,2-Tetrafluorethan), ohne ozonschädigende Wirkung, jedoch mit einem hohen Treibhauspotential (GWP, s. Abschnitt 3.4.2). Bei der Betrachtung der Thermospannung erkennt man einen allgemeinen Anstieg in Abhängigkeit der vom Dunkelstrahler aufgebauten Intensität mit der Zeit (s. Abb. 20). Die erreichten Werte für die Thermospannung liegen bei deutlich erhöhtem CO₂-Anteil im Absorberrohr unter jenen Spannungen, die mit Raumluft gemessen wurden. Die Transmissionsmessung macht deutlich, dass mehr CO₂ zu einer stärkeren Absorption von Strahlung führt. Die bei dem Kältemittel gemessenen Thermospannungen zeigen, dass nur ein sehr geringer Anteil der Intensität vom Keramikstrahler nicht absorbiert wird. Die parallel aufgezeichneten Temperaturverläufe zeigen, dass sich die infrarotaktiven Gase rascher erwärmen als die nicht manipulierte Raumluft.

Physikalischer Hintergrund

Für eine detaillierte physikalische Erklärung sei auf die in Kapitel 3 erläuterte Theorie verwiesen. In Messungen mit einer Versuchsdauer von über 20 Minuten bestätigen sich die oben geschilderten Ausführungen. Die starke Temperaturzunahme am Beginn der Messungen entspricht der Erwartungshaltung im Reaktionsverhalten der unterschiedlichen Gase auf die Strahlung. Die Temperaturen mit Luft und CO₂ verändern sich zwischen Minute 10 und 30 nur mehr geringfügig um rund 2°C. Der Unterschied im Vergleich zum R-134a liegt in der Verzögerung, da sich dessen Temperaturverhalten sonst jenem der beiden anderen Gase ähnelt. Es ist daher davon auszugehen, dass der Versuchsaufbau stark mit der Umgebung wechselwirkt. Durch die große Energieabfuhr fallen die Temperaturunterschiede im Verlauf der Messung zwischen den einzelnen Gasen gering aus. Eine Diffusion des Gases durch die rund 13 µm dicke PE-Folie sorgt bei langen Messdauern ebenso für eine Energie- bzw. Temperaturabnahme des Gases. Die Temperaturänderungen pro Minute eines Gases in den ersten Versuchsminuten zeigen sehr wohl einen Unterschied durch die Gaszusammensetzung. Der Versuch wurde auch mit einer Infrarotlampe und einer Baulampe als Strahler durchgeführt, bei denen sich dasselbe Bild auf unterschiedlichen Temperaturniveaus zeigt.

Bemerkungen

Es empfiehlt sich, diesen Versuch nur einige Minuten lang ablaufen zulassen. Den einfachen Materialien des Experimentieraufbaus geschuldet, nehmen unerwünschte Effekte durch einen relativ großen Energieaustausch mit der Umgebung nach einigen Minuten zu. Das Phänomen der Strahlungsabsorption, das mit der Intensitätsmessung erfolgt, zeigt sich bereits nach kurzer Zeit und signifikant. In Langzeitmessungen sind ab der 10. Minute keine signifikanten Änderungen mehr messbar. Eine kurze Versuchsdauer genügt den am Beginn dieses Kapitels vorgestellten Prämissen an die Experimente. Der Einsatz des Keramikstrahlers bedingt eine geringere Signifikanz der Temperaturunterschiede als bei den anderen eingesetzten Strahlern, er ist aber als Modellerde dem terrestrischen Spektrum am Ähnlichsten. Die sich hier zeigende Absorptionsbande von CO₂ ist nicht jene die für den planetaren Treibhauseffekt hauptverantwortlich ist (s. Abschnitt 4.1). Der Versuch zeigt, dass atmosphärische Spurengase Strahlung absorbieren und sich dadurch leicht erwärmen. Größtenteils wird die absorbierte Energie gleich wieder in alle Richtung, so auch zurück zur Erde, emittiert. Das verwendete Kältemittel R-134a ist im Handel in unterschiedlichen Gebinden erhältlich, beispielsweise in Druckgaspackungen (Kältespray).

4.4.3. Absorption in Ballons

Mittels einer Thermosäule nach Moll kann durch einen minimalen Versuchsaufbau die Absorptionswirkung atmosphärischer Spurengase mit jener der Luft verglichen werden.

Material

- Keramikstrahler (150 W)
- Gase (CO_2 , CH_4 , R-134a)
- Ballons
- Stativmaterial
- Stück Draht und Klebeband
- Thermosäule nach Moll
- Multimeter
- Kabel
- Maßband
- Kartonschablone

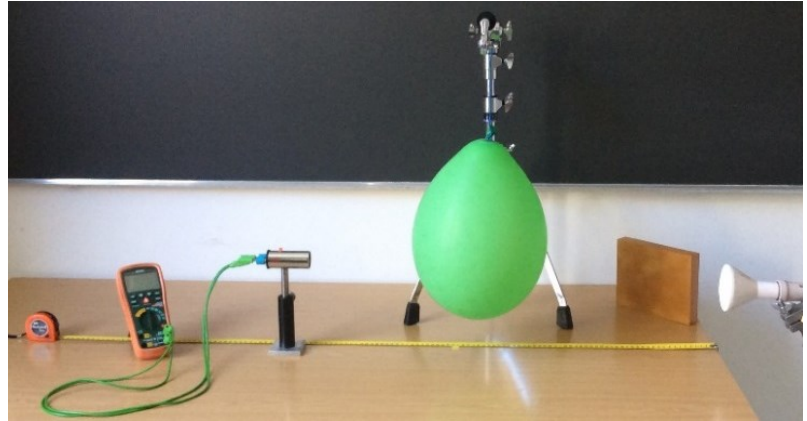


Abb. 44: Versuchsaufbau zur Strahlungsabsorption von Gasen in Ballons (eigene Aufnahme)

Aufbau

Die Versuchsanordnung besteht nur aus einem Strahler, einem Ballon an einem Stativ sowie einer Thermosäule nach Moll zur Messung der transmittierten Strahlungsintensität. Die einzelnen Komponenten werden entlang einer Achse, wie in Abb. 44 gezeigt, aufgebaut. Der Ballon wird im Strahlengang zwischen Quelle und Detektor gehängt. Für die Vergleichbarkeit der Daten ist es wichtig, dass die für verschiedene Gase verwendeten Ballons immer die gleiche Farbe haben und mit demselben Gasvolumen gefüllt sind. Um derartige Effekte zu minimieren, wurden innerhalb einer Messreihe Ballons der gleichen Farbe und der gleichen Packung verwendet. Eine aus Karton selbst angefertigte Schablone dient als Maßstab für das Befüllen der Gase mit demselben Volumen.

Durchführung

Bevor das Experiment beginnen kann, muss der Keramikstrahler rund 6 Minuten vorgeheizt werden (s. Abb. 20). Dieser wird erst am Ende einer Messreihe wieder ausgeschaltet. Der Versuch wird bei einer eingestellten Distanz zwischen Thermosäule und Strahler zuerst ohne, dann mit Ballon im Strahlengang durchgeführt. Die mit unterschiedlichen Gasen befüllten Ballons werden nacheinander gemessen. Dabei ist darauf zu achten, dass diese sich nicht allzu stark bewegen. Mit einer Drahtverbindung zwischen dem hängenden Ballon und dem Stativ findet der Ballon rasch nach dem Aufhängen seine Ruhelage. Die Empfindlichkeit der Thermosäule ist mit 2-3 Sekunden angeben, dennoch ist es ratsam, den Messwert erst nach einigen Sekunden vom Spannungsmessgerät abzulesen. Die Spannungswerte der detektierten Thermospannung aus dem Messbeispiel sind Tab. 7 zu entnehmen. Dabei sind die

Gasbezeichnungen aufsteigend ihrer Absorptionswirkung gereiht, wobei die stärkste Absorption durch das Kältemittel R-134a (s. Abschnitt 3.4.2) erfolgt. Bis auf jene Messwerte in einem grünen Ballon fanden alle Messungen in gelben Ballons statt. Die Verwendung verschiedener Farben der Ballons wirkt sich deutlicher bei jenen Strahlern aus, die im sichtbaren Wellenlängenbereich emittieren, machen aber auch für die Strahlung eines Dunkelstrahlers einen messbaren Unterschied.

Tab. 7: Messergebnisse zur Absorptionswirkung verschiedener Gase in einem Ballon bei unterschiedlichen Abständen zwischen Strahlungsquelle und-detektor sowie 3 verschiedenen Strahlern als Quelle (Baulampe 400W, IR-Lampe 150 W, Dunkelstrahler 150 W)

STRAHLER	Bau-lampe	Dunkel-strahler	IR-Lampe	Bau-lampe	Dunkel-strahler	IR-Lampe	Bau-lampe	Dunkel-strahler	IR-Lampe
ABSTAND	80 cm			60 cm			40 cm		
	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]
Leerlaufspannung	17,4	3,6	25,4	27,2	6,1	41,9	48,3	11,8	70,5
Pressluft	7,2	2,3	10,3	12,0	3,9	17,3	21,1	7,9	30,1
Atemluft	7,3	2,2	10,2	12,0	3,8	17,0	22,0	7,5	29,9
Atemluft (gr. Ballon)	8,3	2,4	11,9	8,3	4,1	20,2	24,3	8,3	35,9
CO ₂	6,8	2,1	7,2	6,8	3,6	16,5	18,6	7,2	29,6
CH ₄	6,7	2,0	6,6	6,7	3,5	16,3	19,5	6,9	27,2
R-134a	5,9	0,8	6,4	5,9	1,4	15,6	17,5	2,9	26,2

Physikalischer Hintergrund

Über die atmosphärische Zusammensetzung und Absorptionswirkung einzelner Spurengase wurde bereits in Kapitel 3 informiert. Für einen Vergleich der Gase innerhalb eines bestimmten Abstandes bei Verwendung derselben Strahlungsquelle ist auf die gleiche Anzahl an Gasmolekülen zu achten. Gemäß dem *Satz von Avogadro* sind in gleich großen Gasvolumina bei gleichem Druck und bei gleicher Temperatur die gleiche Anzahl an Molekülen enthalten (vgl. Giancoli, 2010, S. 614). Zur Sicherstellung der annähernd gleich großen Volumina der einzelnen Ballons wurde eine Schablone aus Karton angefertigt. Dieses Hilfsmittel ist in der Schule leicht umsetzbar und minimiert allzu große Abweichungen.

Bemerkungen

Die relativ kurze Messstrecke (vgl. Experiment 4.4.2) und die nicht bekannten Transmissionseigenschaften des Ballons lassen nur geringe Unterschiede der Messwerte in absoluten Zahlen zu. Dieser Versuch besticht durch seinen geringen Materialaufwand und zeigt eine Absorptionswirkung unterschiedlicher Stärke auf Grund der jeweiligen Beschaffenheit des verwendeten Gases.

4.5. Remission von Wärmestrahlung

Für den Prozess des Treibhauseffekts ist es von entscheidender Bedeutung, dass die von den infrarotaktiven atmosphärischen Gasen absorbierte Strahlungsenergie auch in Richtung Erdoberfläche remittiert wird. Diese Gegenstrahlung, welche mit 324 W/m^2 größer ist als die von der Erdoberfläche absorbierte Solarstrahlung (168 W/m^2), ist ein maßgeblicher Motor der Erwärmung der Erdoberfläche. Ein erhöhter Anteil klimawirksamer Spurengase führt zu einer Verstärkung der Erderwärmung (s. Abb. 13, Abschnitt 3.4). Die Remission von Wärmestrahlung ist anhand von Festkörpern in einfachen Versuchen gut zu veranschaulichen. Eine mögliche SuS-Frage in Bezug zum Treibhauseffekt kann sein, ob die an fester Materie beobachteten Phänomene auch auf Gase übertragen werden können. Die nachfolgend vorgestellten Experimente demonstrieren die Remission von Wärmestrahlung verschiedener Stoffe, beginnend mit Anknüpfungsmöglichkeiten an Alltagssituationen der SuS. In Experiment 4.5.3 wird die Remissionswirkung atmosphärischer Spurengase untersucht.

4.5.1. Freihandversuch zur Remission von Wärmestrahlung

Dieser Freihandversuch ermöglicht Wärmestrahlung zu spüren und damit qualitative Sinneseindrücke bei den SuS zu erzeugen, die an Alltagserfahrungen anknüpfen.

Material

- Schreibtischlampe (80 W)
- Glas- od. Acrylglasplatte (~5 mm dick)
- Wasserkocher
- Stoppuhr

Aufbau & Durchführung

Im ersten Schritt setzt sich die Versuchsperson neben die Lampe, sodass die von ihr ausgehende Wärmestrahlung auf einer Wange spürbar ist. Nun wird die Acrylglasplatte (vulgo „Plexiglasplatte“) in den Strahlengang zwischen Lampe und Wange gehalten. Im zweiten Schritt wird die Platte rund zwei Minuten von der Lampe bestrahlt, ohne dabei die Wange zu bestrahlen. Unmittelbar nach dem Abschalten der Lampe hält man die Acrylplatte dicht an die Wange, ohne sie dabei zu berühren. Man wird einen Unterschied zwischen den beiden Seiten der Platte feststellen. Abschließend kann die Platte in rund 60°C heißem Wasser erwärmt werden und, wie oben beschrieben, ihre Wärmeabstrahlung geprüft werden.

Physikalische Erklärung und Bemerkungen

Die empfundene Wärme durch die Lampe im ersten Schritt wird bei vorgehaltener Acrylplatte deutlich geringer. Das sichtbare Licht kann beinahe ungehindert durch die Platte

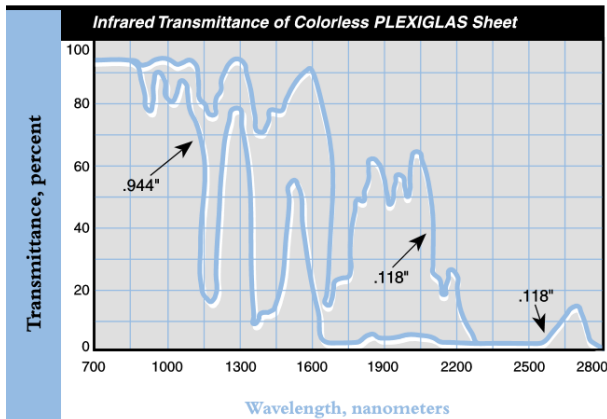


Abb. 45: Transmissionsgrad in Prozent im Wellenlängenbereich von 700 - 2 800 nm zweier transparenter Acrylglasplatten mit den Schichtstärken 24 mm (0,944") bzw. 3 mm (0,118") (aus Acrylic Sheet - Optical & Transmission Characteristics, 2000, S. 5)

(,durchsichtig‘), langwelligere Strahlung wird teilweise, ab 2 200 nm fast gänzlich absorbiert. In Abb. 45 sind die Transmissionseigenschaften zweier transparenter Acrylglasplatten mit verschiedenen Schichtstärken dargestellt. Im weiteren Schritt erfährt man, dass die Platte einen Teil der absorbierten Strahlung auch wieder abstrahlt.

Diese Emission geschieht in alle Richtungen, auch noch nach dem Abschalten der Lampe. Dass es sich nicht um Reflexion handelt, wie SuS eventuell vermuten könnten (s. Abschnitt 2.1), ist leicht zu erkennen an demselben

Verhalten der Acrylglasscheibe, wenn sie auf andere Art, durch warmes Wasser, erwärmt wurde. Der Versuch zeigt, dass Objekte im infraroten Spektralbereich strahlen können, ganz ohne einer „aktiven“ Strahlungsquelle. Bei genügend großen Temperaturunterschieden nehmen wir diese Strahlung in Form von Wärme wahr.

4.5.2. Remission von Wärmestrahlung einer Acrylplatte

In diesem Experiment wird einer Acrylglasplatte erst langwellige Strahlung zugeführt und anschließend das Remissionsverhalten der Scheibe detektiert und mit seinem Temperaturverlauf verglichen.

Material

- Keramikstrahler (150 W)
- Glas- od. Acrylglasplatte (~5 mm dick)
- Stativmaterial
- 2x Thermometer
- Thermosäule
- Multimeter
- Stoppuhr
- Kabel
- Maßband

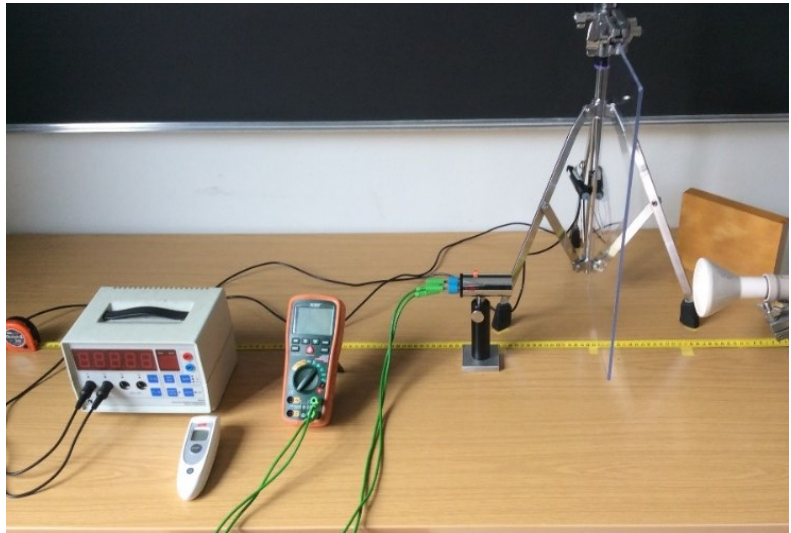


Abb. 46: Versuchsanordnung zur Remission von Strahlung anhand einer Acrylglasplatte (eigene Aufnahme)

Aufbau

Die Acrylglasplatte wird im gleichen Abstand zu Strahlungsquelle und Thermosäule in den Strahlengang platziert. Im Messbeispiel betrug der jeweilige Abstand zur Glasplatte 15 cm. Direkt auf der Oberfläche der Scheibe wurden, sowohl auf der Seite des Strahlers als auch auf der vom Strahler abgewandten Seite, je ein Thermometer angebracht, die das Acrylglas berühren. Auf eine Abschirmung direkt vor den Thermometern wurde im Messbeispiel verzichtet. Die Messfühler für die Temperatur wurden außerhalb der direkten Verbindungslinie zwischen Strahler und Detektor an derselben Stelle auf beide Seiten der Scheibe positioniert.

Durchführung

Vor dem Messbeginn wird der Strahler rund 6 Minuten vorgeheizt (s. Abb. 20). Danach wird der Strahler wie oben beschrieben positioniert. Ab diesem Zeitpunkt werden jede Minute die Messwerte der beiden Thermometer und die der Thermosäule notiert. Nach einer zweiminütigen Bestrahlung wird der Strahler abgeschaltet und entfernt, damit von ihm keine weitere Strahlung mehr auf die Versuchsanordnung fällt. Die Messung wird noch einige Minuten weitergeführt, sodass die von der Platte remittierte Strahlung beobachtet werden kann.

Anhand des in Abb. 47 gezeigten Verlaufs der Thermospannung erkennt man, dass die Acrylglasplatte nicht aufhört, Strahlung zu emittieren, auch wenn der Strahler nach 2 Minuten

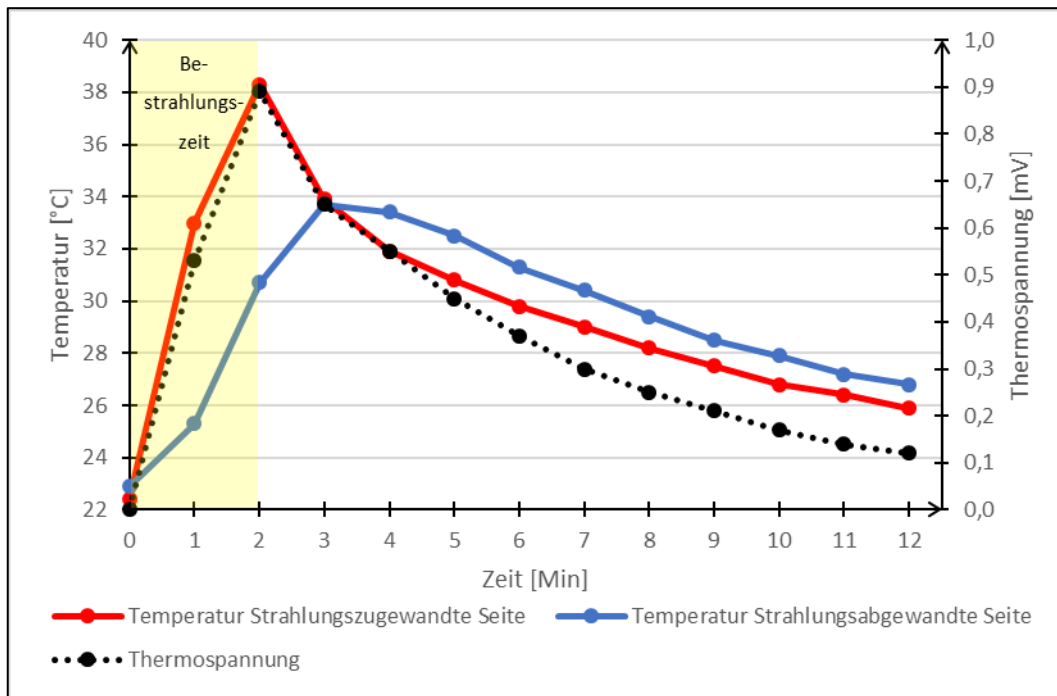


Abb. 47: Verlauf der Temperaturen einer Acrylplatte sowie der Thermospannung während einer zweiminütigen Bestrahlung durch einen Dunkelstrahler (150 W) und in den darauffolgenden 10 Minuten

aus der Versuchsanordnung entfernt wurde. Sie strahlt auch dann noch, wenn an der Thermosäule keine Spannung mehr aufgebaut wird. Hat die Scheibe die gleiche Temperatur erreicht wie ihre Umgebung, kann die Thermosäule sie nicht getrennt von der Umgebung detektieren. Ebenso sieht man im Diagramm, dass sich die Intensität der Strahlung proportional zur Temperatur verhält. Der langsamere Anstieg der Temperatur auf der dem Strahler abgewandten Seite beruht auf der Verzögerung der Transportvorgänge innerhalb der Platte. Nach rund einer Minute bestrahlungsfreier Zeit hat sich die Temperatur auf beiden Seiten der Platte auf das gleiche Niveau eingependelt und nimmt im weiteren Verlauf im selben Ausmaß ab.

Physikalische Erklärung

Durch die Scheibe wird ein Großteil der Strahlung vom Dunkelstrahler (hauptsächliche Emission $> 3 \mu\text{m}$) absorbiert, da Acrylglas für Strahlung im langwelligen Bereich kaum noch durchlässig ist (s. Abb. 45). Durch die Absorption der Strahlung erwärmt sich die Platte und strahlt ebenfalls aus. So lange die Scheibe eine höhere Temperatur als die Umgebung hat, strahlt die Acrylplatte mehr Energie aus, als sie absorbiert und erwärmt dabei ihre Umgebung. Dies geschieht so lange, bis die Platte wieder Raumtemperatur erreicht hat und sich somit ein Gleichgewicht zwischen absorbierter und emittierter Strahlung einstellt. Der proportionale Zusammenhang von Temperatur und abgestrahlter Leistung (vgl. Stefan-Boltzmann-Gesetz,

(7)) ist anhand der Messung auch zu erkennen (s. Abb. 47). Die ständige Wechselwirkung der Versuchsanordnung mit der Umgebung kühlt die Scheibe ab, sodass die gemessenen Temperaturen nicht ohne derartige Berücksichtigung für etwaige quantitative Abschätzungen herangezogen werden können.

Bemerkungen

Im planetarischen System Erde stellt die Acrylglasplatte in diesem Experiment nach Entfernen des Strahlers (Modellerde) die Atmosphäre dar, die für Infrarotstrahlung weitgehend undurchlässig ist. Der Versuch zeigt, dass die Scheibe auf Grund von einfallender Strahlung selbst Strahlung remittiert. Übertragen auf die Atmosphäre bedeutet dies, dass sie die von der Erde ausgestrahlte Wärmeenergie absorbiert und in alle Richtungen, auch zur Erdoberfläche, Wärmeenergie remittieren. Die Atmosphäre mit einem Festkörper zu modellieren, birgt einen nicht zu vernachlässigbaren Abstraktionsgrad in sich, der auch zu falschen Schlüssen bei SuS führen könnte (s. Abschnitt 2.1). Interessant ist der Vergleich der selektiven Absorption zwischen der Atmosphäre mit ihrem sogenannten Fenster (s. Abb. 10) und der Acrylglasscheibe (s. Abb. 45). Sichtbares Licht (Wellenlängenbereich von ca. 380 nm bis 780 nm) kann ebenso wie die Acrylglasscheibe (die für uns daher durchsichtig erscheint) die Atmosphäre bei klarer Wetterlage praktisch ungehindert passieren. In Wellenlängenbereichen des infraroten Spektrums hingegen können nur noch geringe Anteile die Atmosphäre bzw. die Scheibe passieren.

4.5.3. Remission von Wärmestrahlung durch Treibhausgase

In diesem Modellexperiment zum Treibhauseffekt wird die Remission von Wärmestrahlung durch atmosphärische Spurengase anhand zweier Luftvolumina demonstriert. Dank eines relativ geringen Mitteleinsatzes und dem Auskommen mit zwei Thermometern als Messinstrumente kann dieses Experiment leicht im Klassenraum erarbeitet und umgesetzt werden.

Material

- Halogenstrahler (400 W)
- Kristallisierschale
- Destilliertes Wasser
- Styropor-Behälter
- Aluminiumfolie
- PET-Flasche (2 Reservoir)
- PE-Folie (Frischhaltefolie)
- Schwarzer Karton
- Treibhausrelevante Gase (CO_2 , N_2O etc.)
- 2x Thermometer
- Stativmaterial
- Stoppuhr
- Gummiringler
- Klebestreifen

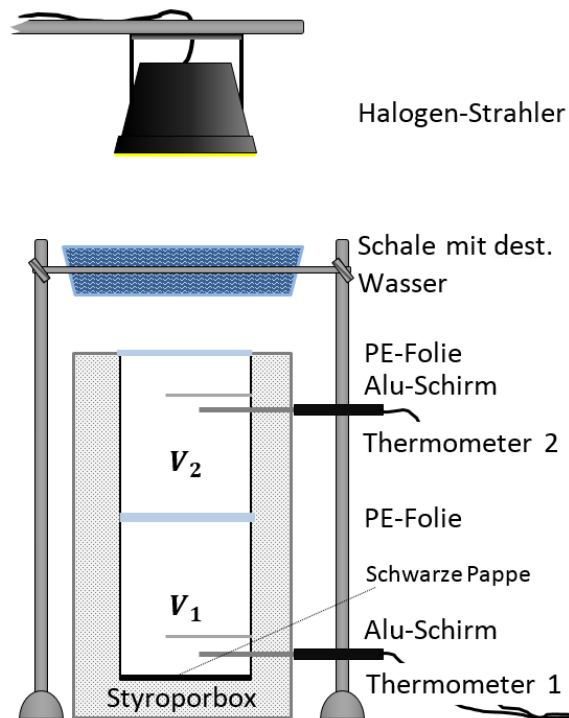


Abb. 48: Versuchsanordnung für den Nachweis der Remission von Wärmestrahlung infrarotaktiver Gase (eigene Darstellung)

Aufbau

Die in Abb. 48 gezeigte Versuchsanordnung besteht aus zwei räumlich getrennten Behältern (V_1 , V_2), die sich übereinander angeordnet in einer Styroporbox befinden. Die mit Aluminiumfolie ummantelte Styroporbox dient der Isolierung, um die beiden Gasreservoir besser von der Umgebung zu trennen. Bei den beiden Behältern handelt es sich um eine 1,5 l große Polyethen-Flasche (Mineralwasserflasche), die in der Mitte geteilt und deren Flaschenhals entfernt wird. Der Flaschenboden wird mit schwarzem Karton ausgelegt, der den Erdboden symbolisiert. Die Wand jedes Behälters wird mit einer kleinen Öffnung versehen, durch die die Temperaturfühler in den Innenraum geführt werden. Hierbei ist auf eine möglichst gute Abdichtung zwischen Thermometer und Flaschenwand zu achten. Zur Abschirmung der direkten Strahlung dienen horizontal über den beiden Fühlern in V_1 und V_2 angebrachte Streifen von Aluminiumfolie. Mit PE-Folie (Frischhaltefolie) werden die drei Öffnungen der beiden Flaschenteile zu Behältern verschlossen, wobei der obere Teil für das Befüllen mit

verschiedenen Gasen leicht zu öffnen sein soll (s. Abb. 49). Der Flaschenteil mit dem Boden wird zuerst in die Isolierbox gestellt und nachfolgend nur noch mit V_1 bezeichnet. Jener Flaschenteil, der sich über V_1 in dem Styroporbehälter befindet, wird V_2 genannt (s. Abb. 48). Man kann auch in einen (unzerschnittenen) Behälter eine PE-Folie einkleben, um zwei getrennte Raumabschnitte zu erhalten. Dabei muss ausgeschlossen werden, dass zwischen V_1 und V_2 eine Gasdiffusion stattfinden kann. Im vorliegenden Messbeispiel wurde zu Gunsten einer dichten Trennung der beiden Volumina und der einfacheren Handhabung eine weitere Schicht PE-Folie beim Übergang vom oberen in den unteren Behälter in Kauf genommen. Auf Grund der geringen Schichtdicke ($\sim 13 \mu\text{m}$) und der relativ guten Transmission naher infraroter Strahlung von Polyethylen (s. Abb. 21) können die durch eine weitere Folienschicht verursachten Effekte vernachlässigt werden. Die Anordnung in der Styroporbox wird gemäß Abb. 48 unter einer Schale mit kaltem destilliertem Wasser gestellt, über der sich ein Halogen-Strahler (Baulampe) befindet. Das Wasser dient als Filter, um möglichst nur sichtbares Licht und nahe Infrarotstrahlung der Lampe durchzulassen. Bei der Verwendung von destilliertem Wasser können unerwünschte Streueffekte an Mineralien und anderen Partikel, die in Leitungswasser enthalten sein können, minimiert werden. Das Wasser muss vor jeder Messung gewechselt werden.

Durchführung

Das Experiment besteht aus zwei Teilversuchen, deren Messergebnisse gegenübergestellt werden. Im ersten Teilversuch befindet sich Luft sowohl in V_1 als auch in V_2 . Nachdem in beiden Behältern in der Isolierbox die Messfühler des Thermometers positioniert sind, werden die Temperaturen T_1 und T_2 in V_1 und V_2 bestimmt. Nun schaltet man den Strahler ein, wobei jede Minute die Temperaturen gemessen werden. Im zweiten Teilversuch wird der



Abb. 49: 2 räumlich durch PE-Folie getrennte Gasvolumina aus einer Mineralwasserflasche (eigene Aufnahme)

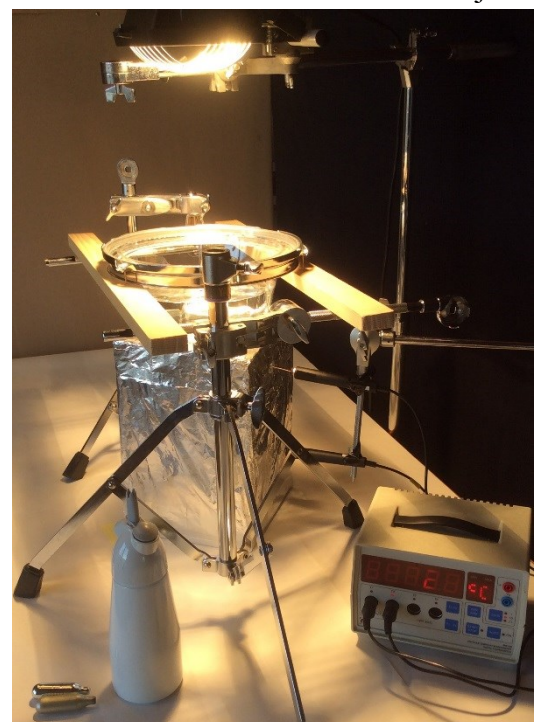


Abb. 50: Versuchsaufbau zur Remission infrarotaktiver Gase (eigene Aufnahme)

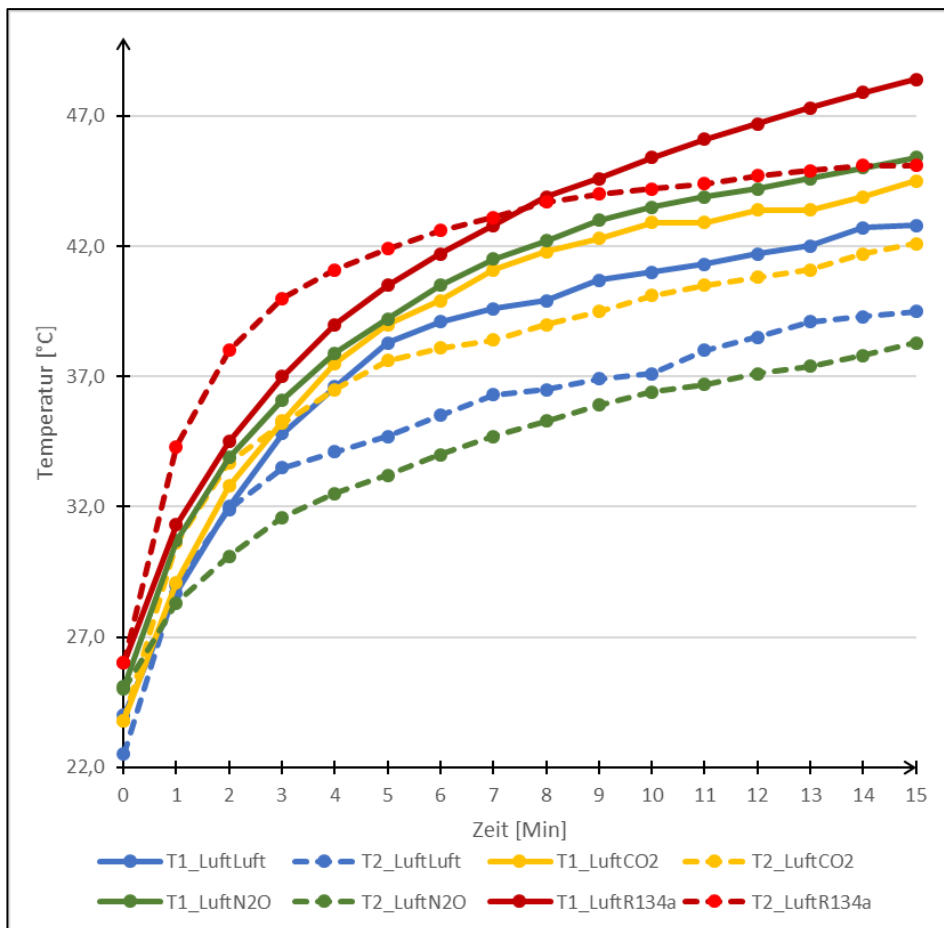


Abb. 51: Temperaturverläufe der Remission-Messungen der Gase: Luft (blau), CO₂ (orange), N₂O (grün), R-134a (rot)

obere Raum (V_2) mit Kohlenstoffdioxid, Distickstoffoxid oder R-134a gefüllt und die Messungen wie zuvor beschrieben durchgeführt.

Die verschiedenen Temperaturverläufe aus dem Messbeispiel sind Abb. 51 zu entnehmen. In allen Messungen zeigt sich, dass die Temperatur T_1 direkt über dem Boden stärker ansteigt als T_2 in dem Gasbehälter darüber. Das heißt, dass die Lichtstrahlen der Lampe tatsächlich vom schwarzen Karton absorbiert werden und im langwelligeren Bereich als Wärmeenergie remittiert werden. Dieses Phänomen wurde bereits in Experiment 4.3.3 gezeigt. Reiht man die erreichten absoluten Temperaturwerte T_1 nach 15-minütiger Bestrahlung ihrer Größe nach, so spiegeln diese die Reihung der verwendeten Spurengase gemäß ihres Treibhauspotentials (s. GWP, Abschnitt 3.4.2) wieder. Bei allen Messungen mit Ausnahme bei der Verwendung von Distickstoffoxid (N₂O) erhöhte sich nicht nur die Temperatur T_1 im erdnahen Bereich, sondern auch T_2 des darüber liegendem Gaspakets. Die stärkere Erwärmung lässt Rückschlüsse zu, dass die Gase CO₂, N₂O und R-134a die vom Karton emittierte Strahlung mehr absorbieren als es das Gasgemisch Luft tut. Dadurch erwärmen sie sich selbst und emittieren wiederum

Strahlung in alle Richtungen und führen im bodennahen mit Luft gefülltem Raum zu einer vermehrten Einstrahlung und somit zu einer Temperaturerhöhung.

Physikalischer Hintergrund

Die durch die Wasserschale gefilterte Strahlung der Halogenlampe wird am schwarzen Kartonboden absorbiert, der wiederum Strahlung emittiert. Dabei verändern sich die Wellenlängen, d.h. sie werden größer. Dadurch erhöht sich einerseits die Temperatur T_1 und andererseits durch die langwellige Strahlung auch T_2 . Befindet sich ein infrarotaktives Gas im oberen Volumen, steigt die Temperatur wesentlich stärker an als dies bei Luft in beiden Kammern der Fall ist. Diese beobachteten Temperaturanstiege beruhen auf der geringeren Transmission der langwelligen Strahlung durch einen erhöhten Treibhausgasanteil. Weniger Strahlungsenergie kann entweichen, da die vom Karton emittierte Strahlung durch die infrarotaktiven Gase stärker absorbiert wird. Diese Absorption bedingt eine stärkere Erwärmung des Gases und eine Remission in alle Richtungen. Jene emittierten Anteile in Richtung Boden (s. Abschnitt 3.3.1, bzw. 3.4) führen zu einem größeren Temperaturanstieg. Würde die Wärmeenergie direkt vom Strahler stammen, dürfte der Effekt, dass sich das vom Strahler weiter entfernte Volumen stärker erwärmt als das durchstrahlte obere Volumen, nicht auftreten. Durch die Versuchsanordnung (s. Abb. 48) ist die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung und Konvektion unterbunden. Durch die räumliche Trennung von Absorber und Strahlungsquelle beruhen die gemessenen Temperaturunterschiede auf der Absorption und der Remission von Strahlung.

Bemerkungen

Dieses Modellexperiment veranschaulicht zwei Phänomene. Einerseits wird gezeigt, dass eine höhere Konzentration klimawirksamer Stoffe zu einer höheren Temperatur des Gasgemisches selbst führt. Gleichzeitig zeigt sich eine höhere Temperatur im darunter befindlichen Gasgemisch Luft, die eine Folge der Remission klimawirksamer Spurengase ist. Durch dieses Experiment gewinnt man Einblicke in die Emissionsfähigkeit von Gasen bzw. zum Begriff der Remission als Reaktion auf die Absorption. Die Remission von Wärmestrahlung in der irdischen Atmosphäre ist Voraussetzung für den Treibhauseffekt. Die Versuchsanordnung erlaubt das Prinzip dieses komplexen atmosphärischen Phänomens mit überschaubarem Aufwand zu demonstrieren. Dadurch, dass mit atmosphärischen Gasen gearbeitet wird, reduziert sich der Abstraktionsgrad des Modells (vgl. Acrylglasplatte als „Festkörperatmosphäre“) und erleichtert den didaktischen Zugang.

4.5.4. Absorption der remittierten Wärmestrahlung

Auf die Erdoberfläche fällt nicht nur solare Strahlung, sondern auch infrarote Strahlung aus der Atmosphäre, die sogenannte Gegenstrahlung (s. Abb. 13). Im Experiment 4.2.1 wurde die Energieaufnahme unterschiedlicher Oberflächen durch die Solarstrahlung demonstriert. Mit diesem Versuch wird die Wirkung der Farbe bei einfallender langwelliger Strahlung gezeigt.

Material

- Weißes und schwarzes T-Shirt (Baumwolle)
- 8 Wäscheklammern
- 2 Klebepunkte
- Projektionsschirm
- Keramikstrahler (150 W)
- 2 Thermometer
- Stoppuhr
- Stativmaterial
- Maßband

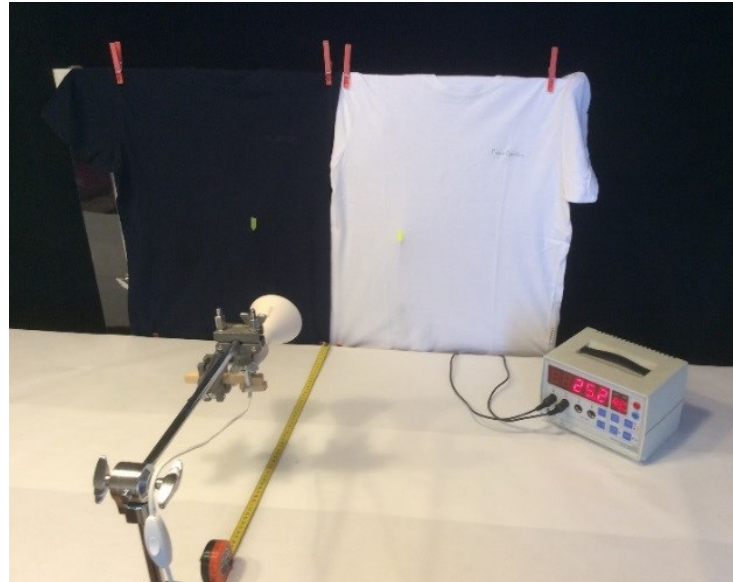


Abb. 52: Versuchsanordnung zur Absorption der remittierten Wärmestrahlung an der Erdoberfläche (eigene Aufnahme)

Aufbau

Beide T-Shirts werden nebeneinander mit Wäscheklammern auf einen Projektionsschirm gespannt. Im Idealfall sind die T-Shirts gleichen Typs, sodass sie sich in ihrer Beschaffenheit nur durch ihre Farbe unterscheiden. Im Messbeispiel fungierte eine dünne Acrylglasplatte aus einem Bilderrahmen als Projektionsschirm, um sicherzustellen, dass sich die beiden Kleidungsstücke in der gleichen Ebene befinden. Mit 2 auf den T-Shirts symmetrisch zueinander angebrachten Klebepunkten werden die Temperaturmessstellen markiert. Die beiden Thermometer werden hinter den Kleidungsstücken (jedoch vor dem Projektionsschirm) mit ihren Fühlerspitzen auf die Position der Klebepunkte ausgerichtet positioniert. Der Keramikstrahler wird mit Abstand zwischen 30 cm und 40 cm, wie in Abb. 52 zu sehen, vor den Projektionsschirm bzw. die T-Shirts ausgerichtet.

Durchführung

Nach dem Aufbau werden die sich an den Thermometern einstellenden Temperaturen abgelesen und der Strahler eingeschaltet. Während der ungefähr 7-minütigen Bestrahlung werden jede Minute die Temperaturwerte abgelesen. Die im Diagramm (Abb. 53) dargestellten Temperaturverläufe wurden bei einem Abstand von 34 cm zwischen dem Dunkelstrahler und

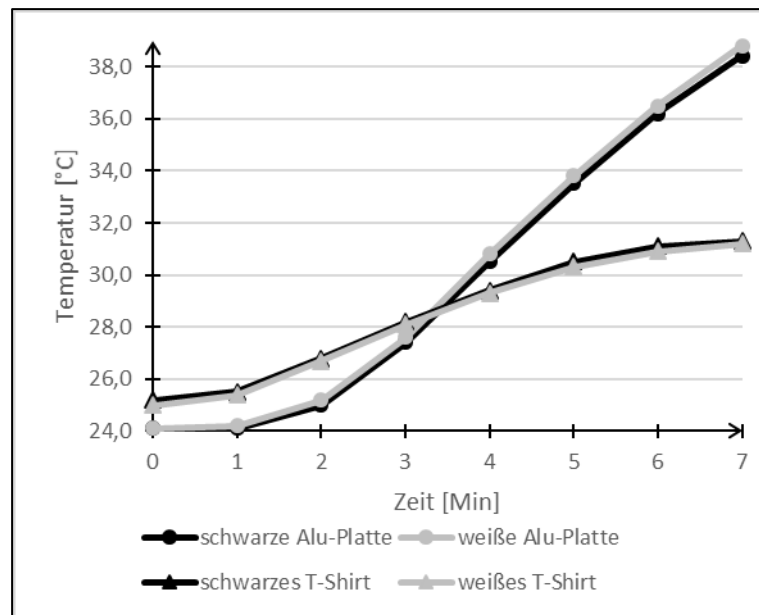


Abb. 53: Temperaturverläufe unter Bestrahlung eines Keramikstrahlers zweier Aluminiumplatten und zweier T-Shirts, jeweils schwarz bzw. weiß

den T-Shirts gemessen. Man erkennt das simultane, farbunabhängige Ansteigen der Temperaturen beider Kleidungsstücke. Dasselbe Bild zeigen die ebenso im Diagramm enthaltenen Temperaturverläufe zweier Aluminiumplatten. Genauso wie die beiden T-Shirts sind die Platten in ihrer Beschaffenheit, abgesehen von der Farbe, ident. Bei deutlich geringerem Abstand (10 cm) zwischen den Aluminiumplatten und dem Strahler sind die gemessenen Temperaturen höher als bei den Baumwolle-Shirts. Die Versuchsanordnung mit der Variante der Aluminiumplatten als Absorber für die Wärmestrahlung ist in Abb. 54 gezeigt. Um die Konvektion als Übertragungsmechanismus auszuschalten, ist die Abstrahlrichtung der Quelle entgegen der Wirkrichtung der Konvektion ausgerichtet.

Physikalischer Hintergrund

Die höheren Temperaturen der Aluminiumplatten im Vergleich zu den Baumwolle-Shirts sind, neben der relativ kurzen Distanz zum Strahler, vor allem durch die stofflichen Eigenschaften (spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit etc.) zu erklären. Verglichen mit der kurzwelligeren, sichtbaren Strahlung (s. Experiment 4.2.1) spielt die Farbe bei der Absorption des vom Dunkelstrahlers emittierten Spektrums keine



Abb. 54: Eine Variante der Versuchsanordnung zur Absorption der remittierten Wärmestrahlung an der Erdoberfläche (eigene Aufnahme)

Rolle. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf die Abhängigkeit des Absorptionsvermögens von der Wellenlänge. So ist der Absorptionskoeffizient von Schnee im Bereich des sichtbaren Lichts auf Grund der hohen Albedo ($A = 0,9$, s. Tab. 3) äußerst gering, im Wellenlängenbereich der atmosphärischen Gegenstrahlung jedoch sehr groß ($\alpha = 0,995$). Auch andere planetarische Oberflächen, beispielsweise Sand, Gras oder Wolken, absorbieren die langwellige Strahlung mit über 90 % und damit deutlich mehr als die sichtbare Strahlung (vgl. Roedel & Wagner, 2011, S. 43).

Bemerkungen

Übertragen auf das System Erde-Atmosphäre stellt der Dunkelstrahler die atmosphärische Gegenstrahlung dar, welche durch den Erdboden (T-Shirts bzw. Aluminiumplatten) absorbiert wird. Wird die Gegenstrahlung größer, erhöht sich auch die Temperatur der absorbierenden Erdoberfläche. Die Erwärmung der Strahlungsabsorber im Experiment geschieht solange, bis sich ein neues Gleichgewicht als Folge der Energiezufuhr durch den Strahler und der Energieabfuhr an die Umgebung eingestellt hat. Ab diesem Zeitpunkt ändern sich die Temperaturen nicht mehr nennenswert und es ergibt sich für die SuS ein nachvollziehbares Versuchsende. In der Variante mit den Kleidungsstücken war dies nach 7 Minuten der Fall.

4.6. Mögliche Auswirkungen einer Erwärmung

Laut IPPC wird sich die globale Erwärmung der Erdoberfläche in den nächsten Jahren von 1,0 K auf 1,5 K gegenüber dem vorindustriellen Niveau erhöhen. Darauf aufbauend gibt es eine Reihe von Modellrechnungen, die Auswirkungen und Folgen einer derartigen Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur abschätzen. Hitzeextreme, Starkniederschlagsereignisse, weiter ansteigender Meeresspiegel, fortschreitender Rückgang der Gletscher-Eismassen, Niederschlagsdefizite bis hin zu einer Veränderung der Biodiversität und Ökosysteme reichen die prognostizierten Folgen (vgl. IPCC, 2018). Die nun folgenden Experimente beschäftigen sich mit einem Anstieg des Meeresspiegels in Folge einer weiter voranschreitenden Erderwärmung und stellen den Abschluss der physikalischen Experimentierreihe zum Treibhauseffekt dar.

4.6.1. Thermische Ausdehnung von Wasser

Durch die Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur erwärmt sich auch der Ozean. Der beobachtete Meeresspiegelanstieg, der zwischen 1993 und 2010 3,2 mm pro Jahr betrug, wird seit den 1970er Jahren auf den Gletscher-Massenverlust und die thermische Ausdehnung in Folge der Erwärmung des Ozeans rückgeführt (vgl. IPCC, 2014, S. 42). Im Gegensatz zu Versuch 4.1.4, in dem die hohe spezifische Wärmekapazität c von Wasser jener der Erde gegenübergestellt wurde, demonstriert dieser Versuch die Volumenänderung in Folge einer Temperaturänderung von Wasser.

Material

- Dunkelstrahler (150 W)
- Glaskolbengefäß mit Stopfen
- Glasrohr mit geringem Durchmesser
- Stativmaterial
- Filz-/ Folienstift

Aufbau und Durchführung

Der Glaskolben wird mit Wasser gefüllt, sodass sich möglichst keine Luft im Gefäß befindet und mit einem Stopfen fest verschlossen. Durch den Gummistopfen führt ein Glasröhrchen mit einem geeigneten Innendurchmesser von (6 - 8) mm. (Kein Kapillarrohr verwenden.) Es ist



Abb. 55: Versuchsaufbau zur Demonstration der thermischen Ausdehnung von Wasser (eigene Aufnahme)

darauf zu achten, dass sich der Stopfen nicht aus seiner Position löst und dicht mit dem Gefäß und dem Röhrchen abschließt. Die Messung wird fehlerhaft beeinflusst, sollte sich der Stopfen lockern. Nun erwärmt man den Glaskolben mit dem Wasser darin und beobachtet die Veränderung der Höhe der Wassersäule. Für die Erwärmung können verschiedene thermische Strahler wie z.B. eine Herdplatte, eine Halogenlampe oder ein Haarfön verwendet werden. Im Messbeispiel wurde eine Keramiklampe eingesetzt, die zu Gunsten einer kürzeren Versuchsdauer nur wenige cm entfernt vom Glaskolben positioniert wurde. Nach einer Abkühlphase, die je nach Bestrahlungszeit variiert (c_{Wasser}), kann eine Kontrolle durch den Vergleich mit dem Ausgangspegelstand vorgenommen werden. Die jeweiligen Pegelstände können mit einem wasserlöslichen Stift markiert werden.

Physikalischer Hintergrund

Fast alle Stoffe (in allen Aggregatzuständen) dehnen sich bei Erwärmung aus und ziehen sich bei Abkühlung zusammen. Bei Flüssigkeiten verändern sich die Volumina mit der Temperatur (bei konstantem Druck) (vgl. Demtröder, 2006, S. 278). Der Betrag der Volumenänderung ΔV bei gegebener Temperaturänderung ΔT ist durch folgende Beziehung gegeben:

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta T \quad (26)$$

Dabei ist V_0 das ursprüngliche Volumen und der Proportionalitätsfaktor γ der sogenannte Volumen-Ausdehnungskoeffizient. Gleichung (26) ist nur bei kleinen ΔV bezogen auf V_0 aussagekräftig, da der stoffabhängige Ausdehnungskoeffizient auch temperaturabhängig ist (vgl. Giancoli, 2010, S. 604-607).

Bemerkungen

In diesem Modellversuch symbolisiert der IR-Strahler die atmosphärische Rückstrahlung und das Wasser im Kolben die Ozeane. Erhöht sich die globale Durchschnittstemperatur erwärmen sich auch die Ozeane, wodurch es zu einer Wärmeausdehnung des Meerwassers kommt, die einen wesentlichen Beitrag zum Anstieg des Meeresspiegels leistet. In absoluten Zahlen erscheint der Meeresspiegelanstieg mit 3,2 mm pro Jahr in den letzten 20 Jahre gering, jedoch beobachtet man einen Anstieg der jährlichen Änderungsrate. Weitreichender sind die biologischen Auswirkungen eines Ozeans mit höherer Durchschnittstemperatur (vgl. IPCC, 2014, S. 42-44).

4.6.2. Meereis vs. Schelfeis

Dieser Versuch zeigt, dass das Abschmelzen von bereits im Meer schwimmenden Packeis keinen, das Abschmelzen von Eis auf der Landmasse sehr wohl eine Auswirkung auf den Meeresspiegel hat.

Material

- 2 (identische) Glasschalen
- Modelllandmasse
- Eiswürfel
- Wasser
- Halogenlampe od. andere Wärmequelle
- Filz-/Folienstift od. Klebpunkte
- Stativmaterial



Abb. 56: Versuchsanordnung zum Schmelzvorgang von Packeis und Schelfeis (eigene Aufnahme)

Aufbau und Durchführung

In eines der beiden Glasgefäße wird ein Modell der Landmasse gelegt, in der Versuchsanordnung von Abb. 56 wurde ein Stein verwendet. Die beiden Glasgefäße werden mit Wasser gefüllt und anschließend mit 3 Eiswürfeln bestückt. Der Wasserpegel ist so zu wählen, dass die Eiswürfel auf dem Stein vor dem Schmelzen nicht ins Wasser ragen. Die Wasserpegel werden gleich nach dem Hinzugeben der Eiswürfel markiert. Danach schaltet man die Lampe ein und beobachtet den Pegelstand vor und nach dem Schmelzvorgang. Das Schmelzwasser der schwimmenden Eiswürfel führt nicht zu einer Pegelerhöhung. Das Schmelzwasser jener Eiswürfel auf dem Stein erhöht den Wasserstand.

Physikalischer Hintergrund

Beim Eintauchen eines Körpers in eine Flüssigkeit bewirkt der Druckunterschied zwischen Ober- und Unterseite eine Auftriebskraft. Nach dem Archimedischen Prinzip ist die Auftriebskraft, den ein eingetauchter Körper verdrängt, gerade so groß wie die Masse der vom Körper verdrängten Flüssigkeitsmenge. Ist die Dichte eines Körpers kleiner als die Dichte der Flüssigkeit, in die er eingetaucht ist, dann ist die Auftriebskraft größer und der Körper schwimmt.

Bemerkungen

Weltweit, mit Ausnahme der Gletscher an der Peripherie der Antarktis, schrumpft das Gletschervolumen. Unter der Annahme einer Zunahme der Erderwärmung wird ein weitreichendes Abschmelzen der globalen Gletschervolumen in den nächsten Jahrzehnten prognostiziert. Neben der thermischen Ausdehnung des Meerwassers ist der Gletscher-Massenverlust hauptsächlicher Antrieb für den Anstieg des Meeresspiegels. Auf Grund der höheren globalen Durchschnittstemperatur verändern sich auch die Grönländischen und Antarktischen Eisschilde. Der Meeresspiegelanstieg betrug in den letzten 20 Jahren rund 3,2 mm pro Jahr und liegt damit über der jährlichen Änderung in den Jahrzehnten davor (vgl. IPCC, 2014, S. 42, 64).

4.6.3. Entstehung konvektiver Strömungsmuster – Der Golfstrom

Durch die Erwärmung des Ozeans können sich auch Strömungsmechanismen im Meer verändern. Das als Golfstrom bekannte Nordatlantische Strömungssystem wird je nach Berechnungsszenario im Laufe des 21. Jahrhunderts eine Abschwächung der Strömungsintensität von 11-34 % erfahren. Eine Veränderung des Salzgehalts, beispielsweise durch vermehrten Süßwassereintrag von Schmelzwasser, bedingt auch eine Änderung der Dichteverhältnisse im Ozean. Für das Einstellen der für das System Golfstrom notwendigen Tiefenströmung im Nordatlantik ist dort eine relativ hohe Dichte Voraussetzung. Nimmt also der Salzgehalt im Nordatlantik ab, reduziert sich die Fließgeschwindigkeit des Golfstroms und die mitgeführte Energie (Strömungsintensität). Ein gänzlicher Zusammenbruch noch vor dem Jahr 2100 wird nicht angenommen (vgl. Umweltbundesamt, 2017). Der Golfstrom ist Teil des globalen ozeanischen Strömungssystems und hat einen enormen Einfluss auf das europäische Wettergeschehen. Er transportiert warmes Oberflächenwasser aus der Karibik und dem Golf von Mexico bis an die nordeuropäischen Küsten. Dieser Modellversuch stellt das Entstehen konvektiver Strömungsrichtungen und -muster in einem Aquarium nach.

Material

- Kleines Aquarium
- Vorratsbehälter für Eis, z.B. Küchensieb
- Halogen-Strahler (400 W)
- Wasser
- Salz
- Eis
- Kaliumpermanganat
- Klebestreifen
- Stativmaterial

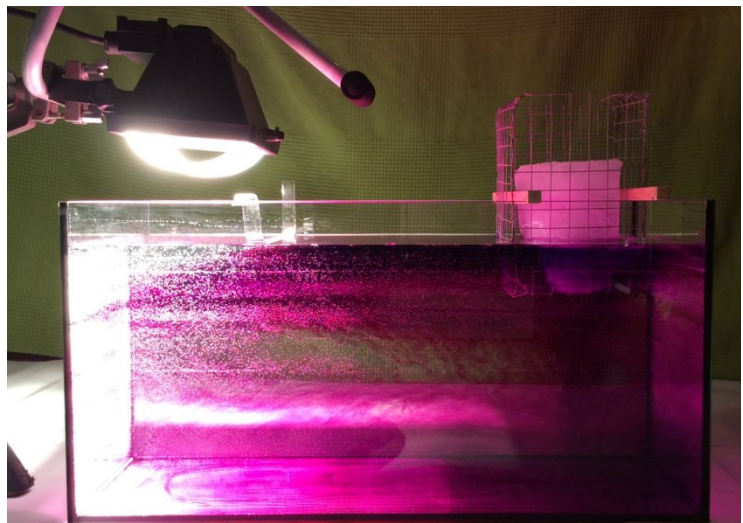


Abb. 57: Versuchsanordnung zum Antrieb des Golfstroms nach einer Versuchsdauer von 4 Minuten (eigene Aufnahme)

Aufbau und Durchführung

Für den Versuch wird ein Behälter für das Eis benötigt. Im Messbeispiel wurde das Vorratsgefäß aus einem kleinen Stück Zaungitter geformt, welches über 2 Holzstangen in verschiedenen Tiefen ins Wasser getaucht werden kann. Alternativ kann auch ein Küchensieb verwendet werden. Die Modellsonne, d.h. der Halogenstrahler wird knapp über der Wasseroberfläche an einer Breitseite des Aquariums, wie in Abb. 57 zu sehen, positioniert. Nach dem Befüllen des Aquariums mit Salzwasser, welches Zimmertemperatur hat, schaltet

man die Lampe ein. Nach einer 10-minütigen Bestrahlung hängt man das Korbgefäß mit dem Eis auf der anderen Breitseite des Aquariums ins Wasser. Mit einer Verzögerung von ca. 2 Minuten klebt man den zuvor mit Kaliumpermanganat-Pulver bestäubten Klebestreifen in der Nähe des Strahlers über die Breite des Aquariums, sodass der Klebestreifen auf der Wasseroberfläche aufliegt. Das vorbeiströmende Wasser verfärbt sich und macht die sich einstellende Strömung sichtbar. Dabei kann man beobachten, dass das Wasser an der Oberfläche vom aufgeheizten Ort unter dem Strahler in Richtung Eis strömt. Durch die Abkühlung unter der Eisschicht sinkt das Wasser zu Boden, von wo aus es zurück zur Stelle des Strahlers strömt.

Physikalischer Hintergrund

Die Entstehung des Golfstroms beruht nicht auf einem einfachen Ursache-Wirkungs-Prinzip, sondern benötigt mehrere Faktoren. Er ist ein Teilsystem in einem weltumspannenden maritimen Strömungssystem. In sich geschlossene Strömungsmuster sind im Aquarium daher nicht abbildbar. Man kann beobachten, dass sich das abgekühlte Wasser nicht mehr an die Oberfläche erheben kann. Die prinzipielle Entstehung kann mit diesem Experiment relativ einfach dargestellt werden. Die deutliche Abwärtsbewegung des Wassers unter der Eisschicht ist gut beobachtbar. Diese Abwärtsbewegung unter den polaren Eismassen im kalten, relativ salzhaltigen Nordatlantik ist ein wesentlicher Antrieb für den Golfstrom. Die nach unten sinkenden Wassermassen müssen ersetzt werden, womit eine Zirkulation einsetzt.

Bemerkungen

Für die Bildung eines deutlichen Strömungsmusters sollte man eine große Menge Eis (3 - 4) kg verwenden und wenige cm als Eintauchtiefe wählen, sodass das Oberflächenwasser leicht unter den Eiskorb strömen kann.

Wenn sich eine größere Menge leichteres Süßwasser über dem dichteren Salzwasser aufschiebt, entstehen keine Strömungen zwischen Oberfläche und Boden. Eine Variante des Versuchs veranschaulicht dieses Verhalten. Das Aquarium wird mit Salzwasser gefüllt. Nachdem die Wasseroberfläche zur Ruhe kommt legt man drei bis vier Eiswürfel dazu. Mit Kaliumpermanganat, an der Kante des Eises gelegt, verfärbt sich das Schmelzwasser. Das verfärbte Süßwasser verteilt sich über die Fläche des Aquariums, vermischt sich jedoch nicht mit dem Salzwasser.

4.7. Anmerkungen zu den Experimenten

Die dargestellten Experimente zeigen jeweils eine von mehreren möglichen Versuchsvarianten. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich die einzelnen Teilphänomene immer auf den gesamten Prozess des Treibhauseffekts beziehen lassen. Wie eingangs dieses Kapitels beschrieben, sind die Experimente thematisch gereiht, beginnend mit der solaren Einstrahlung über die Umwandlung in terrestrische Strahlung, deren Absorption, sowie der Remission in der Atmosphäre und der Absorption der atmosphärischen Gegenstrahlung durch die Erdoberfläche. Abschließend wurden drei Versuche zu den möglichen Auswirkungen einer erhöhten globalen Durchschnittstemperatur gezeigt.

Die Experimente unterscheiden sich in ihrer Komplexität bereits auf Grund ihrer verschiedenen Aussagen. Für die Beobachtung der Absorptionswirkung eines Gases ist ein komplizierterer Versuchsaufbau nötig als dies für einen Festkörper (Acrylglasscheibe) der Fall ist. Die Versuche, insbesondere die Freihandversuche, bestechen durch ihren einfachen Aufbau mit Alltagsgegenständen. Thermometer und ein Diaprojektor sind in den allermeisten Schulen vorhanden. Bei jenen Materialien, die sich nicht ohnehin in einem Haushalt befinden, sollen die Anschaffungskosten³⁶ exemplarisch angegeben werden: So kostet das in Experiment 4.4.2 verwendete Rohr 3,25 €, das in jeder Apotheke erhältliche Kaliumpermanganat aus Versuch 4.6.3 beläuft sich auf 5,- € (20 g). Das Aquarium aus demselben Versuch kostet 25,- €, der häufig verwendete Dunkelstrahler 26,- € und das wie bereits unter 4.2.3 beschriebene Solarmodul mit Elektromotor 9,99 €. Die so entstehenden Anschaffungskosten sind überschaubar und daher schultauglich. In den Experimenten finden Strahler und Gase Verwendung von denen ein erhöhtes Verletzungsrisiko ausgeht. Lehrpersonen sind gemäß dem Schulunterrichtsgesetz mit der Aufsichtspflicht betraut, die auch „die körperliche Sicherheit und Gesundheit“ der SuS miteinschließt (vgl. BMBWF, 2020). Je nach Organisationsform gelten unterschiedliche Sicherheitsvorschriften bei der Durchführung von Experimenten. Bei den verwendeten Strahlern besteht Verbrennungsgefahr bei Berührung. Die Arten von Gefahren sowie die richtige Verwendung eines Gases kann dem jeweiligen Sicherheitsdatenblatt des Herstellers entnommen werden. Bei Methan und Distickstoffmonoxid handelt es sich um ungiftige, leicht entzündbare Gase. Das Kältemittel R-134a kann in hoher Konzentration Ersticken verursachen. Kohlenstoffdioxid ist weder entzündbar noch giftig. Die Mengen an Gas mit denen bei den Experimenten hantiert wird ist so gering, dass bei der Verwendung gemäß Sicherheitsdatenblatt kein erhöhtes Sicherheitsrisiko besteht. Sind diese

³⁶ Die Anschaffungskosten beziehen sich auf das Jahr 2019, in dem die Materialien gekauft wurden.

Gefahrenquellen mit den SuS besprochen, so können grundsätzlich alle Versuche auch durch die SuS selbst durchgeführt werden.

Einige Experimente veranschaulichen nicht unmittelbar ein Teilphänomen des Treibhauseffekts. Dies ist einerseits ihrem Abstraktionsgrad und der didaktischen Reduktion geschuldet. Andererseits wurden Versuche hinzugezogen, die zu einem vertiefenden Verständnis bestimmter Phänomene im Zusammenhang mit dem Wärmehaushalt der Erde beitragen. Die unter 4.3.1 beschriebenen Freihandversuche haben das primäre Ziel ein Gefühl für die Infrarotstrahlung zu vermitteln. Dasselbe Ziel hat auch der Nachweis der Infrarotstrahlung im kontinuierlichen Spektrum (Experiment 4.2.4), der sich jedoch direkt auf das solare Spektrum beziehen lässt. Bei der Gegenüberstellung der spezifischen Wärmekapazitäten von Wasser und Erde (Experiment 4.2.2) wird die große Bedeutung des Ozeans als Wärmeenergiespeicher für das irdische Klima hervorgehoben. Ein Teil dieser Energie wird nicht über Strahlung, sondern Konvektion transportiert. In Versuch 4.3.2 wird die Wirkung der Konvektion mit jener der Wärmestrahlung verglichen. Das Experiment 4.5.2 zeigt den Vorgang der Remission anhand einer Acrylscheibe, mit den gleichen Zielen wie Versuch 4.5.3 anhand von Spurengasen zeigt. Mit den Experimenten 4.2.1, 4.3.3, 4.4.2, sowie 4.5.3 und 4.5.4 lässt sich der Treibhauseffekt durchgängig beschreiben. Speziell die gemessene Remission durch, die für das menschliche Auge unsichtbaren, infrarotaktive Spurengase (Experiment 4.5.3) legt vielleicht die Vermutung nahe, es handelt sich um mikroskopische Ursachen. Die thermische Ausdehnung des Wassers (Experiment 4.6.1) und das Abschmelzen von Schelfeis (Experiment 4.6.2) bedingen einen Meeresspiegelanstieg, der evident ist. Einen Antriebsmechanismus des Golfstroms zeigt der Versuch 4.6.3., wobei der didaktische Fokus mehrheitlich auf der Entstehung konvektiver Strömungen liegt und in Bezug auf den Treibhauseffekt als optional angesehen werden kann. Das Experiment 4.3.3 dient der Darstellung des häufig verwendeten Analogons eines Gewächshauses und kann Grundlage einer generellen Betrachtung von Modellen in der Klasse sein. Die Experimente zeigen, dass es möglich ist, die Prinzipien der Wirkmechanismen des Treibhauseffekts im Klassenraum abzubilden.

5. Abschlussbetrachtung

Die Stellung der Klimaveränderung als epochaltypisches Schlüsselproblem und die Forderung der Lehrpläne nach fachlich gut ausgebildeten, kompetenzstarken, kritischen Teilhabern an gesellschaftspolitischen Entscheidungen prädestinieren den Themenkomplex für die Behandlung im Unterricht. Dem für die Erwärmung der Erdoberfläche ursächliche Prozess – dem Treibhauseffekt – kommt dabei eine besondere Bedeutung zu.

Eine Veränderung menschlichen Agierens als Reaktion auf das sich ändernde Klimasystem ist Aushandlungssache unter gesellschaftlichen Aspekten. Hierbei spielen ethische Werte aber auch viele Interessen wie wirtschaftliche oder geostrategische Überlegungen eine Rolle, sodass nicht einzig auf der Basis naturwissenschaftlicher Begründungen gesellschaftspolitische Entscheidungen getroffen werden. Naturwissenschaftliche Erkenntnisse sind jedoch in der Lage, eine rationale Grundlage für Diskussionen und daraus folgenden Entscheidungen zu liefern. Ebenso kann der Physikunterricht durch eine fachlich korrekte Erklärung der Wirkungszusammenhänge Fehlvorstellungen oder falsche Darstellungen auflösen. Das Engagement der jungen Menschen rund um den Globus nach der Umsetzung der verabschiedeten politischen Ziele zur Reduktion des anthropogen verursachten Klimaantriebs zu fordern, kann als Indikator für ein starkes Interesse an dieser Thematik verstanden werden. Der dem Schulunterricht oft in Abrede gestellte Bezug zur Alltagswelt der Schülerinnen und Schüler ist diesem Thema quasi immanent. Die kontinuierliche Präsenz der Klimaveränderung in den (sozialen) Medien auf einem breiten Spektrum an (sozialen) Plattformen verstärkt den Alltagsbezug zusätzlich. Wie dargelegt wurde, ortet die fachdidaktische Forschung jedoch teilweise große Wissenslücken beim Thema Treibhauseffekt.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Experimente stellen einen Handlungsansatz von Seiten des Physikunterrichts dar, den Wissenslücken und Fehlvorstellungen entgegenzuwirken. Sie zeigen eine von mehreren Versuchsvarianten, deren konkrete Umsetzung den gesetzten Rahmenbedingungen folgten. Durch den Einsatz von vor allem Alltagsgegenständen erscheint die Umsetzungsmöglichkeit in der Schulpraxis niedrigschwellig genug zu sein. Die Durchführung der Experimente zeigt, dass die Wirkmechanismen der Teilphänomene des Treibhauseffekts in Form physikalischer Schulversuche plausibel dargestellt werden können. Darüber hinaus liefern einige Experimente Aussagen über Sachverhalte, die im Zusammenhang

mit dem Treibhauseffekt stehen. Dank den Versuchsanordnungen zur Absorptions- und Remissionswirkung können die für den Treibhauseffekt so wichtigen Wechselwirkungen auch ohne quantenmechanische Hintergründe rein phänomenologisch nachvollzogen werden. Dadurch können die Versuche Erfahrungen stiften, die sich unserer alltäglichen Wahrnehmung entziehen, und können dazu beitragen die schulische Umweltbildung um eine physikalische Perspektive zu erweitern.

Literaturverzeichnis

- Aeschbacher, U., & Huber, E. (1996). Der Treibhauseffekt - auch eine pädagogische Herausforderung. Entwicklung eines Demonstrationsexperimentes als didaktische Forschung. *Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung* 14/2, S. 180-192.
- Arkema Inc. (2000). Acrylic Sheet - Optical & Transmission Characteristics. 12. Philadelphia: Arkema Inc. Abgerufen am 3. April 2019 von <https://www.plexiglas.com/export/sites/plexiglas/.content/medias/downloads/sheet-docs/plexiglas-optical-and-transmission-characteristics.pdf>
- Bakan, S., & Raschke, E. (2002). Der natürliche Treibhauseffekt. *Promet* 28, Heft 3/4, S. 85-94.
- BMBWF. (10. Dezember 2019). Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen (BGBl. II Nr. 395/2019). Wien: Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung. Abgerufen am 31. Mai 2020 von <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568>
- BMBWF. (15. März 2020). Schulunterrichtsgesetz (SchUG). (*BGBl. Nr. 13/2020*). Wien: Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung. Abgerufen am 31. Mai 2020 von <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10009600>
- Demtröder, W. (2005). *Experimentalphysik 3*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Demtröder, W. (2006). *Experimentalphysik 1*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Demtröder, W. (2009). *Experimentalphysik 2*. Berlin: Springer.
- Department of Physics and Astronomy, Georgia State University. (30. Juli 2020). *Radiation Curves*. Von HyperPhysics (©C.R. Nave, 2017): <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/bbrc.html> abgerufen
- Duit, R. (1. Februar 2010). Schülervorstellungen und Lernen von Physik. *piko - Physik im Kontext*, S. 5. Abgerufen am 2020 von <https://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/abteilungen/didaktik-der-physik/piko>
- Duit, R., Tesch, M., & Mikelskis-Seifert, S. (1. Februar 2010). Das Experiment im Physikunterricht. *Piko-Brief* Nr. 7, S. 1-5.
- Earth System Research Laboratory. (5. Mai 2020). *Laboratories Global Monitoring*. Abgerufen am 5. Mai 2020 von Trends in Atmospheric Carbon Dioxide: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html#mlo_growth
- Eckoldt, T. (10. November 2017). *NDR Ratgeber Verbraucher*. Abgerufen am 9. April 2019 von Welche Frischhaltefolie ist am besten?:

<https://www.ndr.de/ratgeber/verbraucher/Frischhaltefolie-im-Test,frischhaltefolie106.html>

Elstein GmbH & Co. KG. (kein Datum). Ceramic Infrared Screw Heaters. *CeramicInfrared Emitters IOT/75, IOT/90*. Northeim: Elstein-Werk M. Steinmetz GmbH & Co. KG. Abgerufen am 17. September 2019 von http://www.elstein.com/fileadmin/user_upload/PDFs/INT/Katalog/Catalogue_EN.pdf

Gebhardt, H., Glaser, R., Radtke, U., & Reuber, P. (2011). *Geographie - Physische Geographie und Humangeographie*. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.

Giancoli, D. C. (2010). *Physik*. München; Boston; San Francisco; Harlow, England; Don Mills, Ontario; Sydney; Mexico City; Madrid; Amsterdam: Pearson Studium.

Glenza, J., Evans, A., Ellis-Petersen, H., & Zhou, N. (15. März 2019). Climate strikes held around the world – as it happened; Young people, inspired by Greta Thunberg, rally to press politicians to act on climate change. *The Guardian*. Abgerufen am 27. Mai 2019 von <https://www.theguardian.com/environment/live/2019/mar/15/climate-strikes-2019-live-latest-climate-change-global-warming>

Haken, H., & Wolf, H. C. (2006). *Molekülphysik und Quantenchemie*. Berlin: Springer.

Hanslmeier, A. (2014). *Einführung in Astronomie und Astrophysik*. Berlin: Springer Spektrum.

Hantel, M. (2001). Klimatologie. In W. Raith, S. J. Bauer, L. Bergmann, C. Schaefer, & Bergmann-Schaefer, *Bergmann Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik Band 7: Erde und Planeten* (S. 311-426). Berlin: de Gruyter.

Harsch, N., & Barke, H. D. (10. Oktober 2014). Treibhauseffekt, Ozon und Saurer Regen – Eine Soll-Ist-Zustandserhebung und eine darauf aufbauende Unterrichtsreihe für Lernende ab Jahrgangsstufe 10. *MNU (Mathematischer und Naturwissenschaftlicher Unterricht (MNU))* 67, S. 408-414.

Höttecke, D., Maiseyenka, V., Rethfeld, J., & Mrochen, M. (2009). Den Treibhauseffekt verstehen. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 20, 111/112, S. 110-112.

Huber, E. (1995). Die Problematik von Demonstrationsexperimenten zum Treibhauseffekt: Analyse und Lösungen. *MNU (Mathematischer und Naturwissenschaftlicher Unterricht)* 48, S. 7.

InfraTec GmbH. (2020). *Infrared Radiation*. Abgerufen am 31. Mai 2020 von <https://www.infratec.eu/sensor-division/service-support/glossary/infrared-radiation/>

IPCC. (2013). *Klimaänderung 2013/2014: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Beiträge der drei Arbeitsgruppen zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)*. Bonn, Wien, Bern: Deutsche Übersetzungen durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle,

- Österreichisches Umweltbundesamt, ProClim. Abgerufen am 27. Mai 2019 von https://www.de-ipcc.de/media/content/AR5-WGI_SPM.pdf
- IPCC. (2014). *Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) [Hauptautoren, R.K. Pachauri und L.A. Meyer (Hrsg.)]*. IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016. Abgerufen am 20. Mai 2019 von https://www.de-ipcc.de/media/content/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5° C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5° C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Chang*. Genf: IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Abgerufen am 20. Mai 2019 von https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/03/SR1.5-SPM_de_barrierefrei-2.pdf
- Keller HCW GmbH. (19. Mai 2020). *Keller ITS (infrared temperature solutions*. Abgerufen am 19. Mai 2020 von Grundlagen der Infrarot-Temperaturmessung: <https://www.keller.de/de/its/pyrometer/applikationen/grundlagen/grundlagen-der-infrarot-temperaturmessung.htm>
- Kircher, E., Girwidz, R., & Häußler, P. (2007). *Physikdidaktik - Physikdidaktik*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Klafki, W. (2019). Kategorien als Leitbegriffe für ein nachhaltig ausgerichtetes Bildungskonzept (Referat in der AG 15 des DGFE-Kongresses „Innovation durch Bildung“ am 25.03.2002 in München). In K.-H. Braun, F. Stübiger, & H. Stübiger, *Allgemeine Erziehungswissenschaft. Systematische und historische Abhandlungen*. Wiesbaden: Springer VS, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Klose, B. (2016). *Meteorologie - Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre* (3. Auflage Ausg.). Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Konnerth, J. (6. Mai 2020). *Holz als urbaner Baustoff der Zukunft*. Abgerufen am 21. Mai 2020 von Universität für Bodenkultur Wien: <https://boku.ac.at/news/newsitem/59256>
- Kraus, H. (2004). *Die Atmosphäre der Erde*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Krenn, H. (9. April 2019). persönliche e-mail. *Transmission von Polyäthylen*. Graz.
- Kuttler, W. (2013). *Meteorologie*. Paderborn: Ferdinand Schöningh.
- Leybold Didactic GmbH. (kein Datum). Gebrauchsanweisung 557 36. *Thermosäule nach Moll*. Hürth: Leybold Didactic GmbH. Abgerufen am 17. September 2019 von <https://www.ld-didactic.de/documents/de-DE/GA/GA/5/557/55736de.pdf>
- Malberg, H. (2002). *Meteorologie und Klimatologie - Eine Einführung*. Berlin, Heidelberg: s.l.: Springer.

- Menner, C., & Nistelberger, J. (Mai 2016). Diplomarbeit. *90 Experimente zur Physik mit Kerzen*. Graz. Abgerufen am 31. Juli 2020 von https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/IEP/Thermophysics_Group/Files/Teachers/Diplomarbeit_Nistelberger_Menner.pdf
- Meschede, D. (2010). *Gerthsen Physik*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- msscscientific Chromatographie-Handel GmbH. (26. März 2019). *IR-Fenster für die FTIR-Spektroskopie und andere Anwendungsbereiche*. Abgerufen am 26. März 2019 von https://www.msscscientific.de/ir_fenster.htm
- Müller, W., Müller, A., & Kuhn, J. (2009). Jetzt können wir nicht mehr warten! Gründe und Ansätze für Unterricht zum Thema "Treibhauseffekt und Klimawandel". *Naturwissenschaften im Unterricht Physik 20/ 111-112*, S. 4-9.
- NASA. (16. Juni 2011). *Changes in the Carbon Cycle*. Abgerufen am 19. September 2019 von The Earth Observatory: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle/page4.php>
- Niebert, K. (20. 111/112 2009). "Es wird wärmer, weil mehr Sonne auf die Erde scheint": wie Lernende sich die globale Erwärmung vorstellen. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, S. 20-23.
- OSRAM GmbH. (2020). Produktdatenblatt HALOLINE PRO 400 W 230 V R7S. München. Abgerufen am 30. Mai 2020 von https://www.osram.at/ecat/HALOLINE%20PRO-HALOLINE-Halogenlampen-Lampen-Digital%20Systems/at/de/GPS01_1027717/PP_EUROPE_AT_eCat/ZMP_83732/
- Parchmann, I. (2. April 1996). Treibhauseffekt und Ozonloch – Ein großes Durcheinander. *Plus Lucis*, S. 33-37. Abgerufen am 10. April 2019 von <https://www.univie.ac.at/pluslucis/PlusLucis/962/OZON.pdf>
- Reinfried, Sibylle, Rottermann, Benno, Aeschbacher, Urs, . . . Erich. (1. Februar 2010). Alltagsvorstellungen über den Treibhauseffekt und die globale Erwärmung verändern - eine Voraussetzung für Bildung für nachhaltige Entwicklung. *Schweizerische Zeitschrift für Bildungswissenschaften 32*, S. 251-273. Abgerufen am 27. Mai 2019 von https://www.pedocs.de/volltexte/2014/8600/pdf/SZBW_2010_2_Reinfried_ua_Alltagsvorstellungen.pdf
- Roedel, W., & Wagner, T. (2011). *Physik unserer Umwelt: die Atmosphäre*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Scherndl, G., Scholda, I., & Yossef, A. (2. Februar 2019). Greta Thunbergs junge Garde. *der Standard*. Abgerufen am 27. Mai 2019 von <https://www.derstandard.at/story/2000097404818/greta-thunbergs-junge-garde>
- Schönwiese, C.-D. (2013). *Klimatologie*. Stuttgart: Ulmer UTB.

- Umweltbundesamt. (11. Dezember 2017). *Fünfter Sachstandsbericht des Weltklimarats*. (v. d. der Bundesrepublik Deutschland, Herausgeber) Abgerufen am 19. September 2019 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/weltklimarat/fuenfter-sachstandsbericht-des-weltklimarats#was-steht-im-funften-sachstandsbericht>
- UNFCCC secretariat. (2019). *UN Climate Change Conference - December 2019*. Abgerufen am 31. Mai 2020 von <https://unfccc.int/cop25>
- Voiland, A. (25. Mai 2010). *www.nasa.gov*. Abgerufen am 19. September 2019 von Why NASA Keeps a Close Eye on the Sun's Irradiance: <https://www.nasa.gov/topics/solarsystem/features/sun-brightness.html>
- Weber, M., Schulmeister, K., Kitz, E., & Brusl, H. (kein Datum). *Seibersdorf Laboratories, AUVA Report Nr. 52 „Gefährdung durch optische Strahlung: Sichtbare und infrarote optische Strahlung – VIS-IR“ Anhang C: Strahlerkatalog*. Wien: Allgemeine Unfallversicherungsanstalt. Abgerufen am 18. April 2020 von <https://www.auva.at/cdscontent/load?contentid=10008.544759&version=1430388141>
- Wiesner, H., Schecker, H., & Hopf, M. (2018). *Physikdidaktik kompakt*. Seelze: Aulis Verlag.
- wikipedia.org. (19. Mai 2020). *Steradian*. Von https://en.wikipedia.org/wiki/Solid_angle#/media/File:Solid_Angle,_1_Steradian.svg abgerufen
- Wirth, J., Thillmann, H., Künsting, J., Fischer, H. E., & Leutner, D. (Mai/Juni 2008). Das Schülerexperiment im naturwissenschaftlichen Unterricht. Bedingungen. *Zeitschrift für Pädagogik 54 - Heft 3*, S. 361-375.
- ZAMG. (2020). *Energiebilanz der Erde*. (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG)) Abgerufen am 30. Mai 2020 von https://www.zamg.ac.at/cms/de/images/klima/bild_ip-klimawandel/klimasystem/umsetzungen/2-3-1_1_energiebilanz

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Elektromagnetisches Spektrum (aus InfraTec GmbH, 2020)	14
Abb. 2: Graphische Darstellung von 1 Steradian aus zwei Perspektiven (aus wikipedia.org, 2020)	16
Abb. 3: Spektrale Dichteverteilung von Schwarzkörperstrahlung bei vier verschiedenen Temperaturen (aus Department of Physics and Astronomy, Georgia State University, 2020)	18
Abb. 4: Lambert'sches Strahlungsgesetz © Häckel, 1999 (aus Klose, 2016, S. 211)	19
Abb. 5: Schematische Gegenüberstellung der Spektren spezifischer Ausstrahlung eines schwarzen, grauen und nicht-grauen Strahlers (aus Keller HCW GmbH, 2020)	21
Abb. 6: Normalschwingungen (symmetrische Streckschwingung ν_1 , Knick-/Biegeschwingung ν_2 , antisymmetrische Streckschwingung ν_3), (a) eines nichtlinearen (H_2O) und (b) eines linearen (CO_2) dreiatomigen Moleküls (aus Demtröder, 2005, S. 328)	23
Abb. 7: Umlauf der Erde um die Sonne mit einer Ekliptik von $23,5^\circ$; Entstehung der Jahreszeiten (aus Gebhardt, Glaser, Radtke, & Reuber, 2011, S. 199)	25
Abb. 8: Schematische Darstellung der atmosphärischen Extinktion der Sonneneinstrahlung (aus Schönwiese, 2013, S. 116)	29
Abb. 9: Das Sonnenspektrum an der Atmosphärenoberfläche und auf Meeresniveau, sowie ein Schwarzkörperspektrum bei $T = 5\,800\text{ K}$ (aus Hanslmeier, 2014, S. 232)	32
Abb. 10: Absorptionsspektren (blaue Bereiche absorbieren, weiße Bereiche sind durchlässig) der gesamten Atmosphäre in Bodennähe (a), an der Tropopause (b) sowie die Absorptionsbanden der wichtigsten infrarotaktiven atmosphärischen Gase (c) (aus Schönwiese, 2013, S. 121)	36
Abb. 11: Aerosolumwandlungsprozesse in der Troposphäre (aus Roedel & Wagner, 2011, S. 473)	41
Abb. 12: Vergleich dreier Gewächshäuser mit dem Treibhauseffekt: (a) Fensterglas, durchlässig für solare Strahlung, nicht aber für terrestrische, (b) Steinsalz ist für beide Wellentypen durchlässig, (c) Gewächshaus ohne Dach; Kurze Wellensymbole stellen die solare, lange Wellensymbole die terrestrische Strahlung dar, die Konvektion wird durch eine gestrichelte Linie symbolisiert (aus Hantel, 2001, S. 348)	43
Abb. 13: Über das Jahr gemittelte globale Energiebilanz der Erde, Wertangaben in W/m^2 (aus ZAMG, 2020), nach Trenberth K., Fasullo J.T., Kiehl J. (2009)	44
Abb. 14: Anteil des Kohlenstoffdioxids in der Atmosphäre und Temperaturverlauf der letzten 800 000 Jahre (aus NASA, 2011)	45
Abb. 15: Einfaches Strahlungsbilanzmodell der Erdatmosphäre. Die im Modell berücksichtigten Energieflussdichten sind durch nicht maßstäbliche Pfeile symbolisiert (nach Kraus, 2004, S. 112)	47
Abb. 16: Einfaches Strahlungsbilanzmodell der Erdatmosphäre mit $\varepsilon A < 1$. Die im Modell berücksichtigten Energieflussdichten sind durch nicht-maßstäbliche Pfeile symbolisiert (aus Kraus, 2004, S. 113)	47
Abb. 17: CO_2 -Anteil in der Luft, gemessen am Mauna Loa Observatorium (aus Earth System Research Laboratory, 2020)	50

Abb. 18: Strahlungsverteilung einer Halogenlampe (400 W, 230 V, R7S-Fassung) (aus OSRAM GmbH, S. 4)	58
Abb. 19: Gemessene spektrale Bestrahlungsstärken einer Philips PAR38, 100 W Infrarotlampe in einem Abstand von 20 cm, sowie 66 cm (500 lux Distanz) (aus Weber, Schulmeister, Kitz, & Brusl, S. C270)	59
Abb. 20: Temperaturverlauf (orange Linien) und Abkühlkurve (blaue Linie) der Elstein IOT Keramikstrahler bei 4 verschiedenen Leistungen (aus Elstein GmbH & Co. KG, S. 32, 33) ..	59
Abb. 21: Transmissionsgrad von Polyethylen-Folie verschiedener Schichtstärken, 6 μm (grün), 27 μm (blau), 70 μm (rot) (mit freundlicher Unterstützung von Dr. Heinz Krenn, 2019)	60
Abb. 22: Versuchsaufbau: Reflexionsvermögen der Erdoberfläche (eigene Aufnahme)	61
Abb. 23: Temperaturverlauf direkt über einer weißen bzw. einer schwarzen Oberfläche während einer Bestrahlungszeit von 10 Minuten	62
Abb. 24: Versuchsaufbau: spezifische Wärmekapazität Erde vs. Wasser (eigene Aufnahme)	63
Abb. 25: Gemessene Temperaturen in Wasser und Erde nach einer Bestrahlung von 8 Minuten mit einer Halogenlampe	64
Abb. 26: Versuchsanordnung für die Beobachtung der Winkelabhängigkeit der Strahlungsintensität (eigene Aufnahme)	67
Abb. 28: Optische Anordnung zum Nachweis eines Infrarotanteils im Spektrum einer Glühlampe (eigene Aufnahme)	69
Abb. 27: Schematische Darstellung des Strahlengangs (eigene Darstellung)	69
Abb. 29: IR-Diode einer Fernbedienung (eigene Aufnahme)	72
Abb. 30: Emission von Infrarotstrahlung eines Keramikstrahlers (eigene Aufnahme)	73
Abb. 31: Versuchsanordnung für einen Vergleich zwischen Strahlung und Konvektion (eigene Aufnahmen)	74
Abb. 32: Temperaturverläufe eines Absorbers während der Energiezufuhr einmal durch Strahlung und Konvektion und einmal nur durch Strahlung	75
Abb. 33: Versuchsaufbau zum Glashauseffekt (eigene Aufnahme)	76
Abb. 34: Temperaturverlauf unter Bestrahlung innerhalb und außerhalb eines Modellgewächshauses	77
Abb. 35: Versuchsaufbau des Experiments „Erwärmung der Atmosphäre“ (eigene Aufnahme)	78
Abb. 36: Temperaturverlauf zum Experiment „Erwärmung der Atmosphäre“	78
Abb. 37: Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen Boden und PE-Folie, mit unisolierter Flasche (blau), mit isolierter Flasche (grau)	79
Abb. 38: Versuchsanordnung zur Beobachtung der Temperaturänderung zweier Gasgemische bei Absorption derselben Strahlungsenergie (eigene Aufnahme)	80
Abb. 39: Temperaturverlauf von Luft (blaue Linien) und CO_2 (orange Linien) bei Bestrahlung durch eine Infrarot-Lampe und durch einen Dunkelstrahler	81
Abb. 40: Temperaturdifferenz zwischen Luft und CO_2 (orange Linie) sowie zwischen Luft und N_2O (dunkelrote Linie)	81

Abb. 41: Detailaufnahme des Absorberrohrs und der Thermosäule im Vordergrund (eigene Aufnahme)	83
Abb. 42: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung zur Beobachtung der Strahlungsabsorption von Gasen (eigene Darstellung).....	83
Abb. 43: Zeitlicher Verlauf der Thermospannung und der Temperaturänderung dreier Gase	85
Abb. 44: Versuchsaufbau zur Strahlungsabsorption von Gasen in Ballons (eigene Aufnahme)	87
Abb. 45: Transmissionsgrad in Prozent im Wellenlängenbereich von 700 - 2 800 nm zweier transparenter Acrylglasplatten mit den Schichtstärken 24 mm (0,944") bzw. 3 mm (0,118") (aus Acrylic Sheet - Optical & Transmission Characteristics, 2000, S. 5).....	90
Abb. 46: Versuchsanordnung zur Remission von Strahlung anhand einer Acrylglasplatte (eigene Aufnahme).....	91
Abb. 47: Verlauf der Temperaturen einer Acrylplatte sowie der Thermospannung während einer zweiminütigen Bestrahlung durch einen Dunkelstrahler (150 W) und in den darauffolgenden 10 Minuten.....	92
Abb. 48: Versuchsanordnung für den Nachweis der Remission von Wärmestrahlung infrarotaktiver Gase (eigene Darstellung).....	94
Abb. 49: 2 räumlich durch PE-Folie getrennte Gasvolumina aus einer Mineralwasserflasche (eigene Aufnahme).....	95
Abb. 50: Versuchsaufbau zur Remission infrarotaktiver Gase (eigene Aufnahme).....	95
Abb. 51: Temperaturverläufe der Remission-Messungen der Gase: Luft (blau), CO ₂ (orange), N ₂ O (grün), R-134a (rot).....	96
Abb. 52: Versuchsanordnung zur Absorption der remittierten Wärmestrahlung an der Erdoberfläche (eigene Aufnahme)	98
Abb. 53: Temperaturverläufe unter Bestrahlung eines Keramikstrahlers zweier Aluminiumplatten und zweier T-Shirts, jeweils schwarz bzw. weiß.....	99
Abb. 54: Eine Variante der Versuchsanordnung zur Absorption der remittierten Wärmestrahlung an der Erdoberfläche (eigene Aufnahme)	99
Abb. 55: Versuchsaufbau zur Demonstration der thermischen Ausdehnung von Wasser (eigene Aufnahme)	101
Abb. 56: Versuchsanordnung zum Schmelzvorgang von Packeis und Schelfeis (eigene Aufnahme)	103
Abb. 57: Versuchsanordnung zum Antrieb des Golfstroms nach einer Versuchsdauer von 4 Minuten (eigene Aufnahme).....	105