

Der Klimawandel: verstehen und handeln

Ein Bildungsprogramm für Schulen
der Fakultät für Physik der LMU München

Mit Experimenten im Klimakoffer

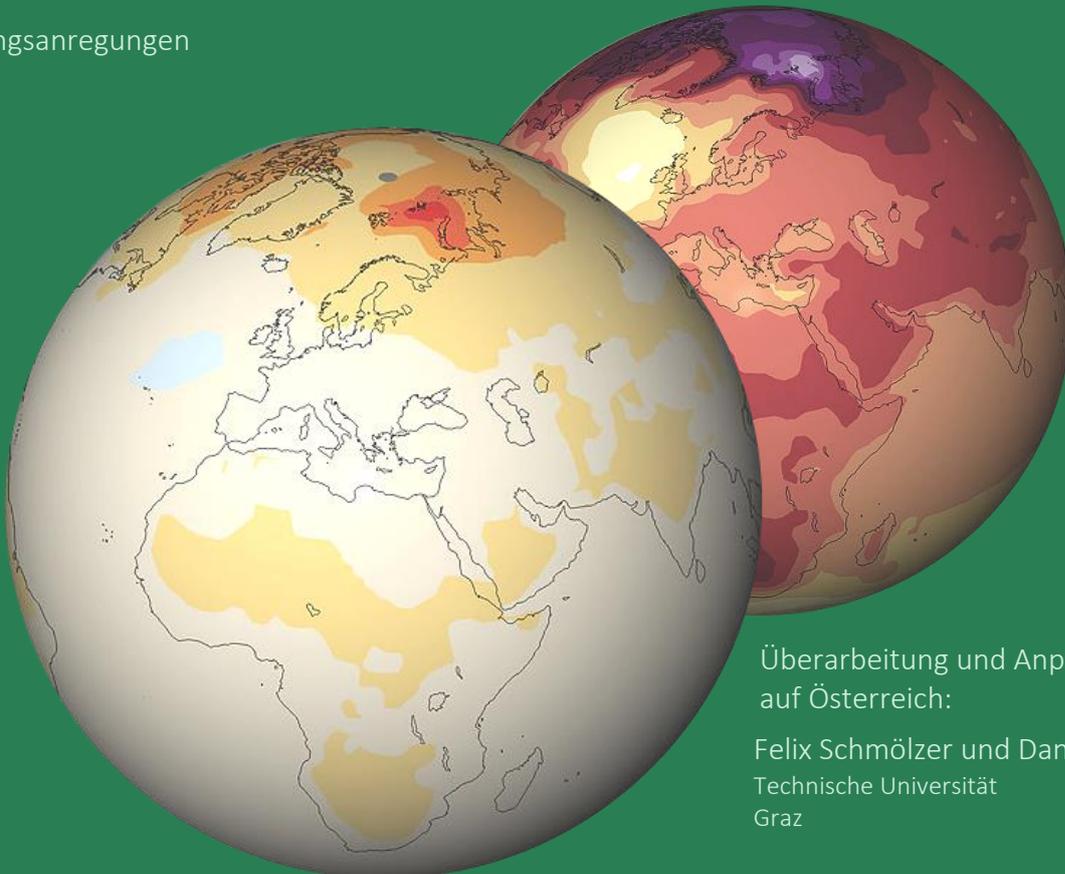
Handbuch

www.klimawandel-schule.de

Wissenschaftliche Hintergründe

Experimentieranleitungen

Handlungsanregungen



Überarbeitung und Anpassung
auf Österreich:

Felix Schmörlzer und Daniel Brunner
Technische Universität
Graz

Dr. Cecilia Scorza
LMU Fakultät Physik
München

Prof. Dr. Harald Lesch
LMU Fakultät Physik
München

Moritz Strähle
Asam-Gymnasium
München

Dr. Dominika Sörgel
PIK
Potsdam

Mit Beiträgen von Dr. Markus Nielbock, Gabriel Appl Scorza, Friederike Strähle, Rudolf Pausenberger, Dr. Pascal Eitner, Thomas Hensel, Dr. Uwe Scheithauer, Clemens Bröll, Markus Vogelpohl und Stefan Krühler.

HERAUSGEGEBEN VON:

Fakultät für Physik, Ludwig-Maximilians-Universität
Schellingstraße 4, 80799 München
www.physik.uni-muenchen.de

Dr. Cecilia Scorza LMU Physik
E-Mail: c.scorza@lmu.de

© Fakultät für Physik LMU, alle Rechte vorbehalten

KONTAKT:

kontakt@lehrernetzwerk-klimawandel.de
www.klimawandel-schule.de

GRAFISCHE GESTALTUNG:

Moritz Strähle

FOTOS UND DRUCK:

Christoph Hohmann

BILDNACHWEIS:

Dr. Cecilia Scorza

STAND:

August 2022

Klimaneutraler Druck



Die Grafik auf der Titelseite zeigt zwei Simulationsszenarien des DKRZ (Deutsches Klimarechenzentrum) und die damit verbundenen Temperaturerhöhungen (siehe Skala) auf der Erde im Jahr 2090 im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter.

Im positiveren Szenario (Erdkugel im Vordergrund, RCP2.6) bleibt der mittlere globale Temperaturanstieg unter 2 °C. Im anderen Szenario ist, unter erheblichen regionalen Schwankungen, mit einer mittleren globalen Temperaturerhöhung von 4,8 °C zu rechnen.

Die Anstrengungen der Menschheit in den nächsten Jahren werden darüber entscheiden, welches Szenario realisiert wird.

Vorwort

Der Klimawandel ist die größte globale Herausforderung der Menschheit im 21. Jahrhundert. Obwohl es in der Geschichte unseres 4,6 Milliarden Jahre alten Planeten immer wieder zu Klimaschwankungen kam, steht ohne Zweifel fest, dass der Mensch durch den Ausstoß von Treibhausgasen für die aktuelle Erderwärmung verantwortlich ist. Gerade die hohe Geschwindigkeit, mit der der Klimawandel voranschreitet, stellt ein enormes Problem dar. Weder Flora und Fauna noch die Menschen können sich so schnell an die veränderten Umweltbedingungen anpassen. Die Vernichtung von Tier- und Pflanzenarten, Kriege um Wasser und andere Ressourcen, Hungersnöte und Migrationsströme sind Konfliktfelder, die vom Klimawandel allesamt mitverursacht werden. Trotz vieler anderer Krisen ist der Klimawandel *das Thema* dieses Jahrhunderts und damit auch entscheidender Gegenstand der Zukunft heutiger Schülerinnen und Schüler.

Die Prozesse, die zum Klimawandel führen und auch die daraus resultierenden Folgen, werden in diesem *Handbuch* aufbereitet und unterstützt durch die Experimente im *Klimakoffer* veranschaulicht. Die wichtigsten Stichwörter sind hier: Treibhauseffekt, Energieströme und Energiebilanz, Strahlungsgleichgewicht und Gleichgewichtstemperatur, Wärmestrahlung, Rückkopplungseffekte sowie Wetter und Klima. Querbezüge zwischen diesen Themen unterstützen das Verständnis der verflochtenen Inhalte. Die Erarbeitung der wissenschaftlichen Hintergründe und Folgen des Klimawandels eignet sich daher ideal als Thema eines fächerübergreifenden bzw. fächerverbindenden MINT-Projektes an der Schule.

Mindestens so wichtig wie das grundlegende Verständnis der Zusammenhänge ist konkretes *Handeln*. Auf dem wissenschaftlichen Verständnis der Hintergründe und Folgen aufbauend, kann zu begründetem, argumentationssicherem und verantwortlichem Handeln motiviert werden. Wie Handeln individuell und in Gruppen sowie auf gesellschaftlicher Ebene gestaltet werden kann, ist ein Thema, das weit aus den MINT-Fächern in die den gesellschafts- und sozialwissenschaftlichen Unterricht hinausreicht.

Der Klimawandel ist eine enorme Herausforderung und bietet zugleich eine Chance für interdisziplinäres Unterrichten in einem der relevantesten Kontexte unserer Zeit.

Die Autoren

Aufruf zur Mitwirkung!

Dieses Handbuch und der dazugehörige Klimakoffer sind Teil des von der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München initiierten und vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz geförderten Bildungsprogrammes *Der Klimawandel: verstehen und handeln*.

Dessen Ziel ist es, die wissenschaftlichen Hintergründe und Folgen des Klimawandels für Schülergruppen experimentell greifbar zu machen und ihnen so ein begründetes und effektives Handeln zu ermöglichen.

Wir laden Sie herzlich ein, daran mitzuwirken!

Wenn Sie Interesse daran haben, sich mit uns für dieses Ziel zu engagieren, nehmen Sie Kontakt mit uns auf! Wir freuen uns auf Sie: kontakt@lehrernetzwerk-klimawandel.de

Alle Informationen zum Projekt finden Sie auf unserer Website:

www.klimawandel-schule.de

„Wenn wir den jungen Generationen die Möglichkeit erhalten wollen, sich in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts an den Klimawandel anzupassen, dann müssen wir den Temperaturanstieg auf unter 2 °C begrenzen. Forschung, Innovation und Kreativität sind essenziell, um den Weg zu einer kohlenstoffarmen Gesellschaft zu gehen. Dieser Übergang wird enorme öffentliche und private Anstrengungen erfordern.“

Jean Jouzel, Mitglied des IPCC und damit Träger des Friedensnobelpreises. Frei übersetzt aus dem Eröffnungsvortrag der Klimakonferenz "Climate Change & Water 2018" in Tours, Frankreich, am 5. Februar 2018.

Inhalt

Kapitel 1 Die Erde: Ein ganz besonderer Planet	1
1.1. Ein ruhiger Ort in der Galaxis.....	1
1.2. Die Lebenszone des Sonnensystems	1
1.3. Die Entstehung des Sonnensystems und der Erde	2
1.4. Nur die Erde behielt ihr Wasser	2
1.5. Wie der Mond die Erde lebensfreundlich machte	3
Exkurs: Der Ursprung des Wassers.....	3
.....	3
1.6. Ein Magnetfeld als Schutzschild der Erde.....	4
Kapitel 2 Den Treibhauseffekt verstehen.....	5
2.1. Die Sonne als Energiequelle	5
Exkurs: Abschätzung der gesamten Strahlungsleistung der Sonne aus dem Massendefekt:	5
Exkurs: Die gesamte Strahlungsleistung (Leuchtkraft L_{\odot}) der Sonne	7
2.2. Die Erde im Strahlungsgleichgewicht	8
2.3. Abschätzung der Temperatur auf einer Erde ohne Atmosphäre	9
2.4. Die Rolle der Atmosphäre und der Treibhauseffekt.....	11
Exkurs: Über die Rolle von Wolken für den Strahlungshaushalt der Erde	16
2.5. Was ein Treibhausgas zum Treibhausgas macht.....	17
Quantenphysikalischer Exkurs: Wie machen die Moleküle das?	18
Kapitel 3 Das Klimasystem der Erde	20
3.1. Unterschied zwischen Wetter und Klima	20
3.2. Das Klimasystem der Erde und seine Komponenten	20
Exkurs: Atmosphärische Zirkulationssysteme und Klimawandel	24
3.3. Entstehung der Klimazonen.....	26
Exkurs: Wetter- und Klimamodelle	28
Kapitel 4 Der anthropogene Klimawandel	30
4.1. Der anthropogene Treibhauseffekt.....	30
4.2. Rückkopplungsprozesse	33
4.3. Kippunkte	35
Kapitel 5 Auswirkungen des Klimawandels	36
5.1. Weltweite Auswirkungen des Klimawandels	36
5.2. Die Versauerung der Ozeane.....	39
5.3. Der Klimawandel in Österreich.....	40
5.4. Regionale Auswirkungen des Klimawandels in Österreich.....	47
Exkurs: Wald und Klima	51
Kapitel 6 Handeln	53

6.1. Notwendigkeit zum Handeln	53
6.2. Die Energiewende.....	55
6.3. Sozialpsychologie und Klimaschutz	<i>Beitrag von Gabriel Appl Scorza</i> 57
6.4. Konkretes Handeln für Schülerinnen und Schüler	<i>Beitrag von Thomas Hensel und Moritz Strähle</i> 61

Kapitel 7 Den Klimawandel mit dem Klimakoffer erforschen 74

Aktivität 1 – Die Erde im Sonnensystem	75
Aktivität 2 – Die Erde wird bestrahlt	77
Aktivität 3 – Die Erde, ein strahlender Planet	80
Aktivität 4 – Stellschraube für die Erdtemperatur	82
Aktivität 5 – Die Wirkung von Treibhausgasen	85
Aktivität 6 – Der Anstieg des Meeresspiegels	88
Aktivität 7 – Die Klimazonen und der Klimawandel	89
Aktivität 8 – Die Ozeane als Klimapuffer	91
Aktivität 9 – Die Versauerung der Ozeane	92
Aktivität 10 – Freisetzung von CO ₂ durch die Ozeane	93
Aktivität 11 – Kippunkte: Wenn das Klima kippt...	94
Aktivität 12 – Kippunkte: Achillesferse im Klimasystem	96

Kapitel 1

Die Erde: Ein ganz besonderer Planet

Die Erde ist der einzige Planet im Sonnensystem, auf dem sich komplexes Leben über Milliarden von Jahren hinweg entwickelt und erhalten hat. Seit der ersten Entdeckung von Planeten außerhalb des Sonnensystems im Jahr 1995, wurden über 4000 Exoplaneten entdeckt. Jedoch gilt nur etwa ein Dutzend von ihnen als potenziell lebensfreundlich. Daraus folgt, dass Planeten, auf denen Leben möglich erscheint, selten sind und ganz besondere Eigenschaften aufweisen müssen. Die Erkenntnis wie viele scheinbar zufällige Ereignisse zusammenkommen müssen, damit ein Planet wie die Erde entsteht, zeigt wie besonders unser Heimatplanet wirklich ist! Deshalb beginnt unser Handbuch mit der Beschreibung der astronomischen Besonderheiten der Erde.

1.1. Ein ruhiger Ort in der Galaxis

Unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße, ist eine Spiralgalaxie, die ca. 200 Milliarden Sterne beherbergt. Der für die Erde wichtigste Stern, die Sonne, befindet sich in einer ruhigen Region der Milchstraße, außerhalb eines Spiralarmes und weit weg vom galaktischen Zentrum (siehe Abbildung 1). Sie liegt damit auch weit entfernt von Gebieten mit hoher Sternendichte und damit außer Reichweite von Sternen, die als Supernova explodieren und mit ihrer Gammastrahlung das Leben auf der Erde vernichten könnten. Diese Zone wird „Habitable Zone der Galaxis“ genannt.

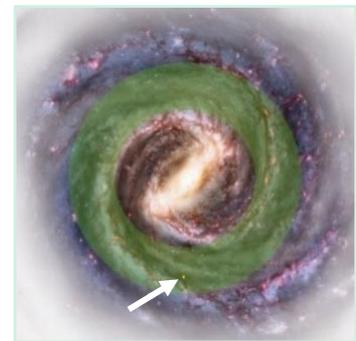


Abbildung 1 – Illustration der Lage des Sonnensystems in der Galaxis
(Credits: Mandaro/Anpassung Scorza)

1.2. Die Lebenszone des Sonnensystems

Aktivität 1

Unser Sonnensystem besteht aus einem Stern (Sonne), vier Gesteinsplaneten (Merkur, Venus, Erde und Mars), vier Gasplaneten (Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun), einigen Zwergplaneten (z.B. Pluto), den Monden der Planeten, Asteroiden und Kometen. Ein Maß für die Lebensfreundlichkeit eines Planeten ist seine Entfernung zum Mutterstern: Befindet sich der Planet in der Lebenszone des Sterns, also dort wo Wasser in flüssiger Form bestehen kann, steigert dies die Chance, dass sich Leben entwickelt. Im Sonnensystem liegt die Venus gerade außerhalb der Lebenszone, der Mars gerade noch darin [1] (siehe Abbildung 2). Die Erde befindet sich mittendrin.

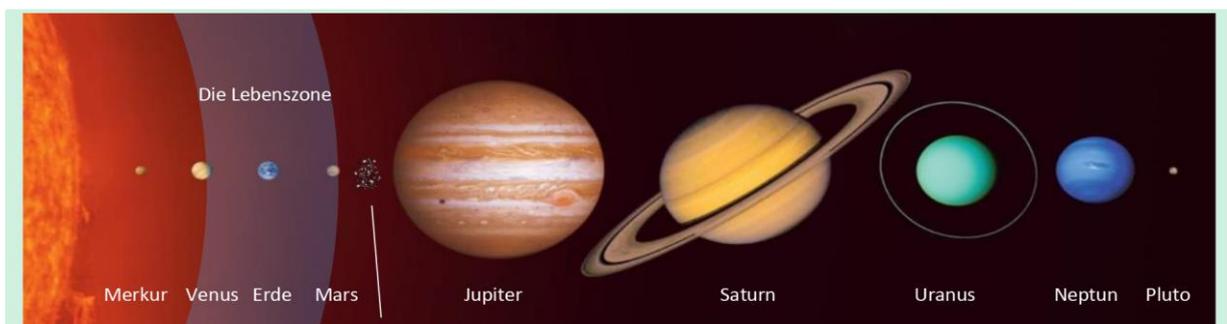


Abbildung 2 – Die Erde liegt inmitten der Lebenszone des Sonnensystems. Achtung: Im Gegensatz zu den Planetengrößen sind die Entfernungen nicht maßstabsgerecht! (Credits: NASA/verändert Scorza)

1.3. Die Entstehung des Sonnensystems und der Erde

Trotz aller Unterschiede zwischen ihnen sind die Planeten des Sonnensystems zusammen mit der Sonne vor etwa viereinhalb Milliarden Jahren alle aus einer protoplanetaren Gas- und Staubscheibe (siehe Abbildung 3) entstanden. Diese formte sich aus Restmaterie einer Supernova-Explosion, in der alle Elemente, die im Kern des Sterns durch Kernfusion und während der Supernova-Explosion erzeugt wurden, vorhanden waren: von Helium über Kohlenstoff bis Eisen, Gold und Uran. Diese Elemente und auch feiner Staub (bestehend aus Silikaten und Graphit) mischten sich nach der Supernova-Explosion mit wasserstoffhaltigen Gaswolken in der Umgebung.

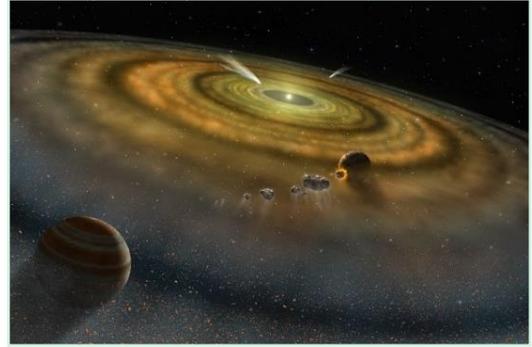


Abbildung 3 - Die Entstehung des Sonnensystems
(Credits: NASA)

Zuerst entstanden in dieser protoplanetaren Scheibe die Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Da dies weit entfernt von der Sonne geschah, konnten sie aufgrund der niedrigen Temperaturen mithilfe der Kraft der Gravitation relativ schnell große Mengen an Gas um ihre großen Gesteinskerne binden. Später formten sich aus feinem Staub die Kerne der Gesteinsplaneten Merkur, Venus, Erde und Mars, die in der Folgezeit über zahllose Einschläge anderer Himmelskörper Material ansammelten und auf Planetengröße anwuchsen. Dieser Entstehungsprozess dauerte ca. 100 Millionen Jahre.

1.4. Nur die Erde behielt ihr Wasser

Aufgrund der vielen heftigen Kollisionen in der frühen Entstehungsphase des Sonnensystems sind alle Gesteinsplaneten als sehr heiße, glühende Kugeln entstanden. Einmal abgekühlt waren sie deshalb trocken. Aber woher kam dann das Wasser?

Wasser kam bereits in der protoplanetaren Scheibe vor. Das kostbare Element sammelte sich in entlegenen Gebieten jenseits der Marsbahn (näher an der Sonne wäre es schnell verdunstet) in Form von Eis unter anderem in porösen Asteroiden und Kometen an.

Aufgrund von Wanderbewegungen der Gasriesen Jupiter und Saturn wurden viele wasserhaltige Asteroiden aus ihren Bahnen herauskatapultiert. Einige wurden von der Sonne angezogen, schlugen auf der Oberfläche der inneren Gesteinsplaneten ein und brachten ihnen so das Wasser.

Dieses sammelte sich auf den drei Planeten in der Lebenszone (Venus, Erde und Mars) in Form von Wasserdampf an. Bedingt durch ihre Nähe zur Sonne wurde der Wasserdampf in der Venusatmosphäre von der UV-Strahlung der Sonne gespalten und die flüchtige Wasserstoffkomponente entwich ins All. Der Mars hingegen konnte den Wasserdampf aufgrund seiner zu kleinen Masse nicht halten. Nur auf der Erde sammelte sich im Laufe der Zeit immer mehr Wasserdampf in der Atmosphäre an. Dadurch erhöhte sich der atmosphärische Druck und als die Erdoberfläche abkühlte, fiel das Wasser als Regen auf die Oberfläche. Auf der Erde entstanden auf diese Weise die Meere und Ozeane. Große Mengen an CO₂ wurden aus der Luft vom Regen ausgespült und auf dem Meeresboden in Form von Kalkgestein gelagert. So hat der Regen die Atmosphäre der Erde lebensfreundlicher gemacht. Als viel später die

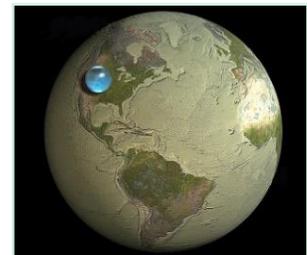


Abbildung 4 – Der maßstabsgetreue kugelförmige Wassertropfen enthält das komplette Wasser der Erde (Credits: Perlman&Cook)

Pflanzen begannen, weiteres CO₂ aufzunehmen und über Fotosynthese in Sauerstoff umzuwandeln, bildete sich eine Ozonschicht, welche die Erdoberfläche vor UV-Strahlung schützte – eine wichtige Voraussetzung für die biologische Vielfalt auf der Erde.

1.5. Wie der Mond die Erde lebensfreundlich machte

Unser Mond formte sich vor etwa 4,5 Milliarden Jahren aus der Kollision der Erde mit dem Protoplaneten Theia, der doppelt so schwer war wie der Mars. Nach dem Zusammenprall sammelte sich ein großer Teil der abgeschlagenen Materie und ballte sich in einer Umlaufbahn um die Erde zusammen – der Mond war geboren.



Abbildung 5 – Zusammenprall von Theia mit der Erde - die Entstehung des Mondes (Credits: NASA)

Zuvor benötigte die Erde nur drei bis vier Stunden für eine Umdrehung und ihre Drehachse taumelte hin und her. Auf einer Erde, die so schnell rotiert, würde die Atmosphäre mit bis zu 500 Kilometern pro Stunde über die Oberfläche hinwegfegen. Erst die Anwesenheit unseres Trabanten verlangsamte die Drehbewegung der Erde auf die heutigen 24 Stunden pro Umdrehung. Auch die Drehachse wurde durch den Mond stabilisiert und liegt heute leicht geneigt bei 23,4° im Bezug zur Ekliptik. Diese Neigung verursacht die Jahreszeiten und schwächt die Wetterschwankungen der Erde ab.

Exkurs: Der Ursprung des Wassers

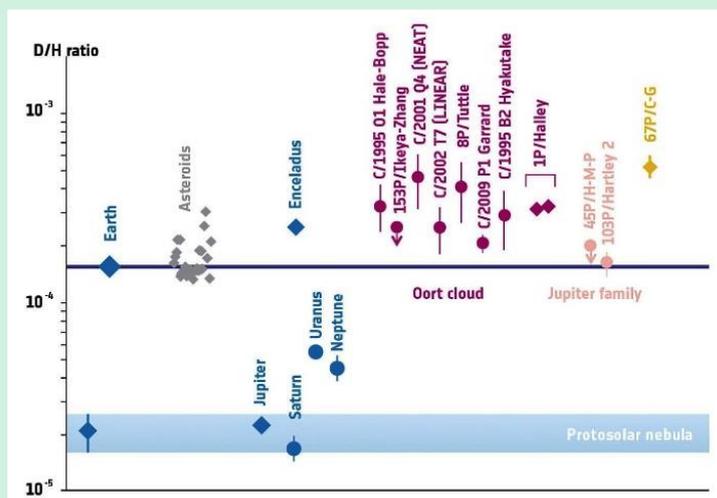


Abbildung 6 – Deuterium zu Wasserstoff (H/D) im Sonnensystem (Credits: ESA, nach: Altwegg, K. et al., Science 10.1126/science.1261952, 2014, fig. 3)

Ein Indiz für den Ursprung des Wassers auf der Erde liefert seine chemische Analyse: Unser H₂O weist ein charakteristisches Massenverhältnis von normalem Wasserstoff zu Deuterium (schwerer Wasserstoff) von $H:D = 1:1,5 \cdot 10^{-4}$ auf, das man auch im Wasser von (kohlenstoffhaltigen chondritartigen) Asteroiden findet.

1.6. Ein Magnetfeld als Schutzschild der Erde

Viele Planeten haben ein schwaches permanentes Magnetfeld. Die Erde dagegen besitzt ein dynamisches Magnetfeld, welches durch Prozesse im Erdinneren aufrechterhalten wird. Bei diesen wird, ähnlich wie bei einem Dynamo, Bewegungsenergie in elektromagnetische Energie umgewandelt. Die zugrundeliegende Physik ist nicht einfach nachvollziehbar. Grob erklärt lässt die Hitze im Erdinneren mehrere tausend Grad heißen und eisenhaltigen Gesteinsbrei in Richtung Erdoberfläche aufsteigen. Dieser kühlt dabei ab, sinkt teilweise wieder, wird von der Corioliskraft auf Schraubenbahnen gezwungen und erzeugt so das Magnetfeld. Warum besitzt ausgerechnet die Erde ein so starkes und dynamisches Magnetfeld?

Höchstwahrscheinlich spielt die Einschlagsenergie des Protoplaneten Theia eine wichtige Rolle. Sein Eisenkern versank beim Zusammenprall praktisch komplett im Zentrum der Erde. Damit ist er mitverantwortlich für die Hitze im Erdinneren und ermöglicht den Aufbau eines magnetischen Feldes.

Ohne diesen Schutzschild wäre die Erdoberfläche dem sogenannten Sonnenwind schutzlos ausgeliefert. Dieser besteht aus hochenergetischen geladenen Teilchen, die Moleküle zerstören können und den Aufbau von komplexeren Lebewesen unmöglich machen. Unser Erdmagnetfeld schützt uns vor dieser kosmischen Gefahr, denn die geladenen Teilchen des Sonnenwindes werden von ihm abgelenkt. Manchmal kann man im hohen Norden und auch in der Antarktis den Himmel leuchten sehen, das sind die Nord- und Südlichter. Sie entstehen bei Stürmen des Sonnenwindes. Man sieht dann praktisch das Erdmagnetfeld bei seiner Arbeit als Schutzschild. Die Bewegungsenergie der Sonnenwindteilchen wird von den magnetischen Feldlinien der Erde aufgenommen. Als elektrische Ströme in der Hochatmosphäre bringen sie die Luft zum Leuchten, wie bei einer Leuchtstoffröhre. Kleine Anmerkung: Sollte jemand vorhaben, den Mars zu besuchen – er hat kein Magnetfeld. Gefährliche Sache so ein Marsaufenthalt.

Alle oben beschriebenen astronomischen Ereignisse und geologischen Prozesse führten dazu, dass aus einem trockenen Gesteinsplaneten eine bewohnbare Welt wurde.

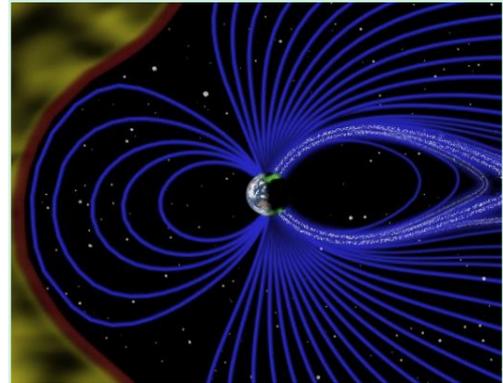


Abbildung 7 – Das Magnetfeld der Erde (Credits: NASA)

Kapitel 2

Den Treibhauseffekt verstehen

2.1. Die Sonne als Energiequelle

Wie alle Sterne ist auch unsere Sonne ein massereicher, selbstleuchtender Himmelskörper aus sehr heißem ionisiertem Gas, einem sogenannten Plasma. Bedingt durch den starken Druck, der durch die Gasmasse auf das Zentrum des Sterns ausgeübt wird, beträgt die Temperatur im inneren Kern unserer Sonne ca. 15 Millionen Grad Celsius. Bei diesen hohen Temperaturen findet Kernfusion statt: Dabei verschmelzen pro Sekunde 567 Millionen Tonnen Wasserstoff zu 562,8 Millionen Tonnen Helium. Die Sonne verliert also pro Sekunde in etwa eine Masse von 4,2 Millionen Tonnen, welche nach der Einsteinschen Gleichung $E = \Delta m \cdot c^2$ in eine immense Menge an Energie, in Form von elektromagnetischer Strahlung, umgewandelt wird [2].

Exkurs: Abschätzung der gesamten Strahlungsleistung der Sonne aus dem Massendefekt:

Aus dem Massendefekt von ca. 4280 Millionen Kilogramm lässt sich mithilfe von Einsteins Gleichung die gesamte Strahlungsleistung L_{\odot} der Sonne berechnen:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

$$\Delta m = 4,28 \cdot 10^9 \text{ kg}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta E = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ J}$$

Dies entspricht der Energiemenge, die von der Sonne pro Sekunde in alle Richtungen gleichmäßig abgestrahlt wird. Die Sonne besitzt also eine Strahlungsleistung von rund:

$$L_{\odot} = 3,85 \cdot 10^{23} \text{ kW}$$

Als Vergleich: Der weltweite Verbrauch an Primärenergie (jene Energiemenge die uns aus natürlichen Quellen zu Verfügung steht z.B. Erdöl und Erdgas, aber auch erneuerbare Energien) belief sich im Jahr 2020 auf rund $557 \cdot 10^{18}$ Joule.

Die Sonnenstrahlung besteht aus elektromagnetischen Wellen und außerdem aus einem Strom von Teilchen (u.a. Protonen, Elektronen und Heliumatomkernen), dem sogenannten Sonnenwind. Die elektromagnetische Strahlung kann man nach ihrer Wellenlänge in Gammastrahlung, Röntgenstrahlung, Ultraviolettstrahlung, sichtbares Licht, Infrarotstrahlung und Radiowellen einteilen.

Wie in Abbildung 8 ersichtlich kann die Ausstrahlung der Sonne, welche eine Oberflächentemperatur von rund 5500°C aufweist, mit jener eines schwarzen Körpers mit derselben Temperatur angenähert werden. Gemäß des Planck'schen Strahlungsgesetzes liegt das Strahlungsmaximum der Sonne im sichtbaren Spektralbereich. Das bedeutet, dass hauptsächlich elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge zwischen 400 (Violett) und 780 Nanometern (Rot) von der Sonne emittiert wird [3].

Plancksches Strahlungsspektrum

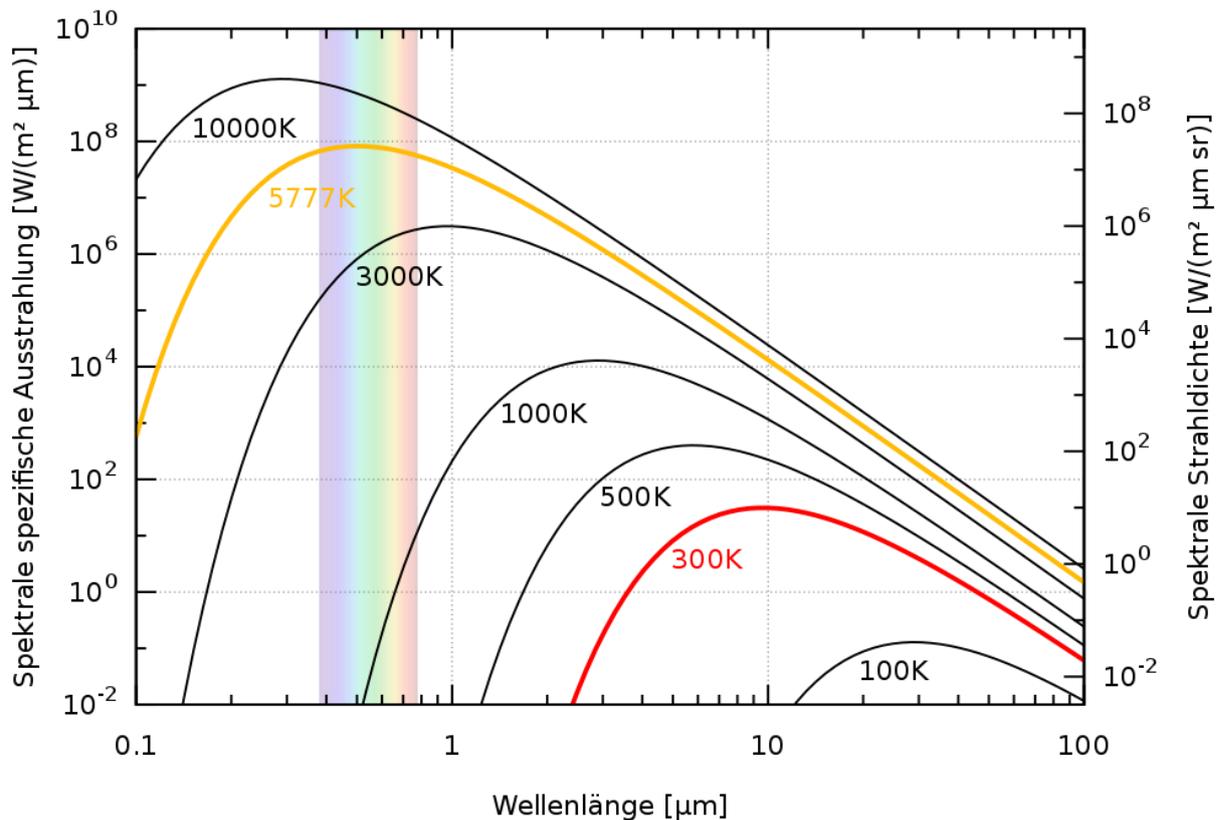


Abbildung 8 - Planck'sches Strahlungsspektrum für verschiedene Temperaturen in doppelt logarithmischer Skalierung (Credits: Wikipedia)

Der größte Anteil der Strahlung wird im gelben bis grünen Spektralbereich emittiert. Das menschliche Auge hat sich im Laufe der Evolution an diesen Teil des Spektrums angepasst und besitzt in diesem Spektralbereich die größte Empfindlichkeit. Kurzwelligere UV- Strahlung (ca. 100- 400 nm) wird Großteils von der Ozonschicht in der unteren Stratosphäre ausgefiltert [4].

Physikalischer Einschub: Die Strahlungsmaxima verschieben sich gemäß dem Wien'schen Verschiebungsgesetz mit steigender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen. Außerdem nimmt die spezifische Ausstrahlung proportional zur vierten Potenz der Temperatur zu (vgl. Kapitel 2.3).

WIE VIEL ENERGIE BEKOMMT DIE ERDE VON DER SONNE?

Die Energie der Sonne wird in alle Richtungen gleichmäßig abgestrahlt. Wie viel davon bei einem bestimmten Planeten ankommt, hängt von dessen Entfernung zur Sonne ab.

Als *Solarkonstante* S_0 bezeichnet man die Strahlungsintensität, die auf der Erde bei mittlerem Abstand zur Sonne und ohne den Einfluss der Erdatmosphäre senkrecht zur Strahlungsrichtung auf der Erde ankommt. Messungen ergeben, dass auf einer Fläche von 1 m^2 , oberhalb der Erdatmosphäre, im Mittel eine Strahlungsleistung von 1361 W [5] auftritt (siehe Abbildung 9, $1 \text{ AE} = 1 \text{ Astronomische Einheit} = \text{Mittlere Entfernung Erde-Sonne} = 149,6 \cdot 10^6 \text{ km}$).

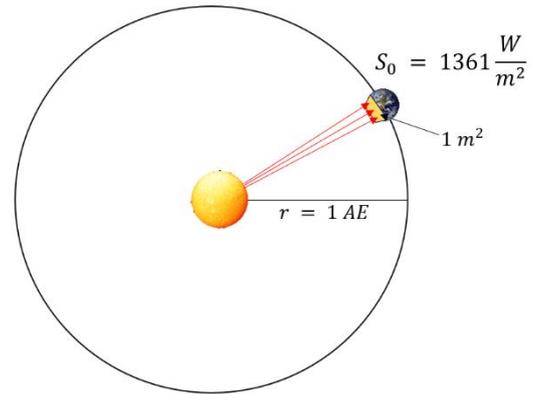


Abbildung 9 – Zur Messung der Solarkonstante bestimmt man die Leistung, die im Abstand Sonne-Erde auf 1 m^2 Fläche auftritt. (Credits: Scorza, Strähle)

Exkurs: Die gesamte Strahlungsleistung (Leuchtkraft L_0) der Sonne

Wenn sich die Strahlung der Sonne ins Weltall ausbreitet, wird die Gesamtstrahlungsleistung der Sonne zunehmend auf eine größere Fläche ($\sim r^2$, siehe Abbildung 10) verteilt. Zur Berechnung der gesamten Strahlungsleistung der Sonne, der Leuchtkraft L_0 , stellt man sich eine Kugel vor, in deren Mittelpunkt die Sonne liegt und deren Radius der Entfernung zwischen Erde und Sonne entspricht. Auf die Oberfläche dieser gedachten Kugel verteilt sich die gesamte Strahlung der Sonne.

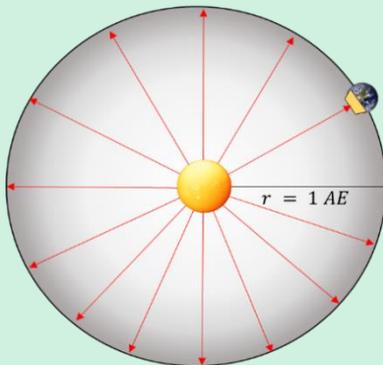


Abbildung 10 – Die gesamte Sonnenstrahlung L_0 verteilt sich auf der gedachten Kugeloberfläche (Credits: Scorza, Strähle)

$$S_0 = 1361 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$r = 1 \text{ AE} = 149,6 \cdot 10^6 \text{ km} = 149,6 \cdot 10^9 \text{ m}$$

$$A = 4 \pi r^2$$

$$L_0 = A \cdot S_0$$

$$L_0 = 4 \pi r^2 \cdot S_0$$

$$L_0 = 4 \pi (149,6 \cdot 10^9)^2 \text{ m}^2 \cdot 1361 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$= 3,83 \cdot 10^{26} \text{ W} = 3,83 \cdot 10^{23} \text{ kW}$$

Der Radius r dieser Kugel ist gleich der Distanz der Erde zur Sonne (1 AE) und so kann die Fläche A der Kugel berechnet werden. Die Leuchtkraft der Sonne L_0 wird dann bestimmt, indem diese Fläche A mit der Solarkonstante S_0 multipliziert wird. Mit der so berechneten Leuchtkraft L_0 und den bekannten Entfernungen der anderen Planeten zur Sonne, kann die Solarkonstante auf Merkur, Venus, Mars usw. bestimmt werden. Dies kann dann beispielsweise zur Abschätzung der Möglichkeit außerirdischen Lebens herangezogen werden. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Erde in einer näherungsweise elliptischen Bahn um die Sonne bewegt, verändert sich damit je nach Jahreszeit auch der Abstand zwischen Sonne und Erde. Anfang Jänner (rund $147 \cdot 10^6 \text{ km}$ – Perihel) beträgt dadurch die Solarkonstante circa $1440 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, wobei sie im Aphel Anfang Juli (rund $152 \cdot 10^6 \text{ km}$) nur einen Wert von circa $1350 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ erreicht [6].

2.2. Die Erde im Strahlungsgleichgewicht

Aktivität 2

Aktivität 3

Der thermische Energietransport von der Sonne zur Erde findet über elektromagnetische Wellen statt. Im sichtbaren Spektralbereich, also im Wellenlängenbereich von 400 bis 750 nm absorbieren die Gase in der Atmosphäre die Sonnenstrahlung kaum. Dieser relativ kurzwellige, sichtbare Teil der Sonnenstrahlung erreicht daher fast ungehindert den Erdboden, wird dort zum Teil absorbiert und trägt so zur Erwärmung der Erdoberfläche bei. Die warme Erde strahlt diese aufgenommene Energie als langwellige, nicht sichtbare Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) in Richtung Weltall zurück.

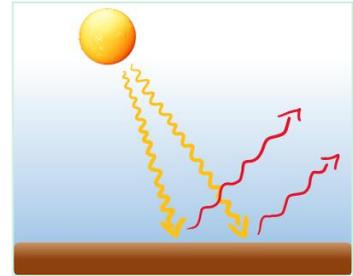


Abbildung 11 – Kurzwellige Sonnenstrahlung (gelb) wird vom Erdboden absorbiert, langwellige Infrarotstrahlung (rot) abgestrahlt

Im Langzeitmittel muss die Energie der thermischen Strahlung, die von der Erde ins All abgestrahlt wird, exakt der von der Erde aufgenommenen Strahlungsenergie der Sonne entsprechen. Die Erde befindet sich mit ihrer Umgebung daher im so genannten *Strahlungsgleichgewicht*. Wäre dies nicht der Fall und würde die Erde z. B. mehr Energie aufnehmen als sie abstrahlt, würde sie sich mit der Zeit immer weiter erwärmen. Da ein Körper aber umso mehr Energie abstrahlt, umso wärmer er ist, würde diese Erwärmung nur so lange stattfinden, bis eingestrahlt und abgestrahlt Energie wieder gleichauf sind und die Erde sich letztendlich bei einer entsprechenden *Gleichgewichtstemperatur* doch im Strahlungsgleichgewicht befindet.

Im Strahlungsgleichgewicht muss die von der Erdoberfläche absorbierte Sonnenstrahlung wieder vollständig als langwellige Wärmestrahlung ins All abgestrahlt werden.

Die von der Sonne senkrecht eingestrahelte Leistung pro Quadratmeter (Intensität) beträgt auf der Erde $S_0 = 1361 \frac{W}{m^2}$ (Solarkonstante, siehe Seite 7). Allerdings wird ja nicht die komplette Erdkugel senkrecht, sondern zu den Polen hin zunehmend flacher bestrahlt. Außerdem wird ja immer nur eine Halbkugel der Erde bestrahlt. Die andere Halbkugel liegt derweil im Dunkeln. Im Mittel verteilt sich die Intensität der Sonnenstrahlung auf die gesamte Erdoberfläche $O = 4\pi \cdot r_{Erde}^2$. Die Intensität der Solarkonstante wirkt jedoch nur auf die Querschnittsfläche der Erde



Abbildung 12 – Die von der Erde empfangene Strahlungsleistung entspricht der Leistung, die senkrecht auf die Querschnittsfläche der Erde fällt. (Credits: Scorza)

$A = \pi \cdot r_{Erde}^2$, was genau einem Viertel der Erdoberfläche entspricht. Somit ergibt sich für die *mittlere Intensität der Sonnenstrahlung auf die Erde* $I_{Sonne \rightarrow} = \frac{1361}{4} \frac{W}{m^2} = 340 \frac{W}{m^2}$.

2.3. Abschätzung der Temperatur auf einer Erde ohne Atmosphäre¹

Aktivität 4

Wir haben gesehen, dass sich die Erde im thermischen Gleichgewicht mit ihrer Umgebung befindet. Die mittlere Temperatur auf der Erdoberfläche lässt sich mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz abschätzen:

$$I = \sigma \cdot T^4$$

Dieses Gesetz beschreibt, welche Strahlungsintensität I (in Watt pro m^2) ein Körper bei einer bestimmten Temperatur T abstrahlt. In Abbildung 13 ist diese Abhängigkeit dargestellt. Je heißer ein Körper ist, desto mehr thermische Strahlung gibt er ab. Diese Abhängigkeit ist proportional zur vierten Potenz seiner Temperatur. Bei doppelter Temperatur (in Kelvin gemessen) strahlt ein Körper also z.B. pro Sekunde 16-mal mehr Energie ab ($2^4 = 16$).

Mit der Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ kann man bei bekannter Temperatur die Strahlungsintensität berechnen oder umgekehrt von einer bekannten Strahlungsintensität auf die Temperatur eines Körpers schließen. Das möchten wir ausnutzen, um die Temperatur der Erdoberfläche abzuschätzen.

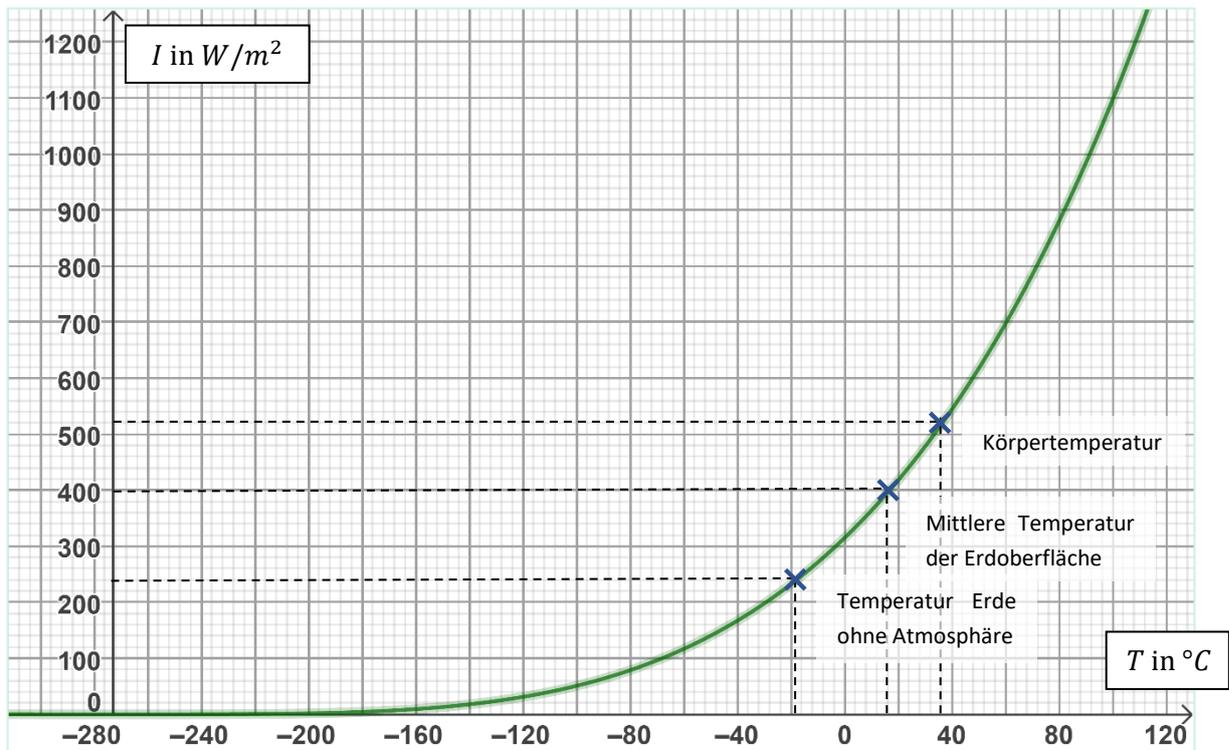


Abbildung 13 – In dieser Abbildung ist das Stefan-Boltzmann-Gesetz dargestellt, also der Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Intensität der thermischen Strahlung eines Körpers (Credits: Strähle, erstellt mit Geogebra)

Von den auf die Erde eingestrahlten $340 \frac{W}{m^2}$ werden im Mittel ca. 30 % [7] direkt ins All reflektiert. Dieses Rückstrahlvermögen von Oberflächen nennt man *Albedo* α . Diese ist z. B. bei Eis besonders hoch. Die Erdoberfläche absorbiert also die geringere Intensität

$$I_{\text{Sonne} \rightarrow \text{Erdob.}} = (1 - \alpha) \cdot I_{\text{Sonne} \rightarrow} = 0,7 \cdot 340 \frac{W}{m^2} = 238 \frac{W}{m^2}.$$

¹ In den folgenden beiden Abschnitten haben wir uns die Darstellung im sehr empfehlenswerten Buch „Klima – Die Erde und ihre Atmosphäre im Wandel der Zeiten“ von Christoph Buchal und Christian-Dietrich Schönwiese [3] zum Vorbild genommen.

Stellen wir uns nun für einen Moment vor, die Erde hätte keine Atmosphäre. Da sich diese fiktive Felsenerde im Strahlungsgleichgewicht befindet, wird die von der Sonne eingestrahlte Intensität auch wieder abgestrahlt und es gilt $I_{\text{Sonne} \rightarrow \text{Erdoberf.}} = I_{\text{Erdoberf.} \rightarrow}$. Diese Strahlungsbilanz ist in Abbildung 14 dargestellt.

Die Intensität der thermischen Strahlung der Erdoberfläche hängt, wie oben beschrieben, mit deren Temperatur zusammen:

$$I_{\text{Sonne} \rightarrow \text{Erdoberf.}} = I_{\text{Erdoberf.} \rightarrow} = 238 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = \sigma \cdot T^4$$

Diese Gleichung wird nach der Temperatur T aufgelöst:

$$T = \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha) \cdot I_{\text{Sonne} \rightarrow}}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{238 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}}} = 255 \text{K} = -18 \text{ } ^\circ\text{C}^2$$

Auf unserer fiktiven Felsenerde, bei der die thermische Strahlung des Erdbodens ungehindert ins All entweichen kann, würde also eine mittlere Temperatur von $-18 \text{ } ^\circ\text{C}$ herrschen!

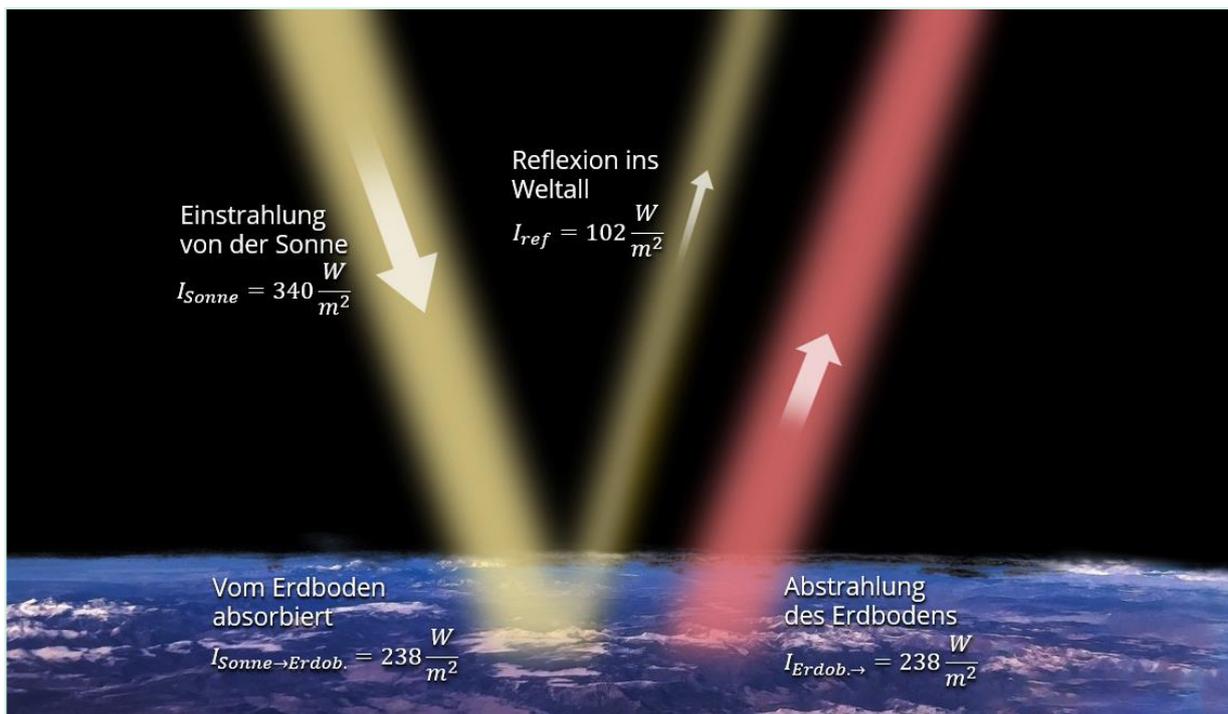


Abbildung 14 - Strahlungsbilanz einer Felsenerde ohne Atmosphäre (Credits: Strähle, Hohmann)

Änderungen in der Intensität der Sonneneinstrahlung $I_{\text{Sonne} \rightarrow}$ oder Änderungen in der Albedo α wirken sich also immer direkt auf die Temperatur der Erde aus. Verringert sich die Albedo der Erde, beispielsweise durch das Abschmelzen von Eisflächen, so erhöht sich die Temperatur der Erde so lange, bis das Strahlungsgleichgewicht bei einer neuen, höheren Gleichgewichtstemperatur wiederhergestellt ist.

² Zur Erinnerung: 0 K entsprechen einer Temperatur $-273,15 \text{ } ^\circ\text{C}$.

2.4. Die Rolle der Atmosphäre und der Treibhauseffekt

Aktivität 4

Wie im letzten Abschnitt gezeigt, hätte unsere Erde im Modell Felsenerde ohne Atmosphäre eine Temperatur von -18 °C und es hätte sich kein Leben entwickelt. Glücklicherweise absorbiert die Erdatmosphäre die thermische Strahlung des Erdbodens zum Teil und strahlt diese in alle Richtungen, also auch in Richtung Erdoberfläche, zurück. Die zugrundeliegenden Prozesse wollen wir im Folgenden betrachten:

Die einfallende solare Strahlung beträgt nach wie vor $I_{\text{Sonne} \rightarrow} = 340\text{ W/m}^2$. Wir nehmen auch wieder an, dass der Anteil $\alpha = 0,3$ wieder zurück ins All reflektiert wird³. Dies entspricht einer reflektierten Strahlung von $I_{\text{ref}} = 102\text{ W/m}^2$. Nicht reflektiert, und in unserem Modell von der Erdoberfläche absorbiert, werden also ca. 70% der einfallenden Strahlung:

$$I_{\text{Sonne} \rightarrow \text{Erdoberf.}} = (1 - \alpha) \cdot I_{\text{Sonne}} = 238\text{ W/m}^2.$$

Aktivität 5

Da sich auch in diesem Fall die Erde in einem Strahlungsgleichgewicht befindet, muss diese eingestrahlte Energie, wie auch im Fall der Felsenerde, in Form von infraroter Wärmestrahlung wieder abgegeben werden. Treibhausgase wie CO_2 , Methan und Wasserdampf besitzen nun die Eigenschaft, einen Teil dieser, von der Erdoberfläche ausgehenden, Wärmestrahlung zu absorbieren. Dies kann mit einem relativ einfachen Experiment, wie in Aktivität 5 auf Seite 85 dargestellt, demonstriert werden: Die Gleichgewichtstemperatur, in der vorerst luftgefüllten und mit einer Infrarotlampe bestrahlten Dose, steigt nach Zugabe von CO_2 deutlich an.



Abbildung 15 - Aufbau des Experiments aus Aktivität 5 des Klimakoffers

Zurück zu unserem einfachen Strahlungsmodell: Wir gehen davon aus, dass die Atmosphäre die gesamte Sonnenstrahlung durchlässt (da relativ kurzwellig), aber einen großen Teil der Wärmestrahlung der Erdoberfläche $I_{\text{Erdoberf.} \rightarrow}$ absorbiert. Wir wollen für diese einfache Abschätzung vorerst hierfür einen Anteil von 80 % ansetzen⁴. Es folgt also:

$$I_{\text{Erdoberf.} \rightarrow \text{Atm.}} = 0,8 \cdot I_{\text{Erdoberf.} \rightarrow} \quad (1)$$

³ Diese Reflexion findet in der Realität an Wolken, Aerosolen, der Atmosphäre und der Oberfläche statt.

⁴ In der Realität sind die Prozesse komplexer (s. Abbildung 18) und werden in diesem Modell didaktisch reduziert dargestellt, um das Grundprinzip des Treibhauseffektes zu verdeutlichen.

Abbildung 16 sind die Schritte bis hierhin dargestellt.

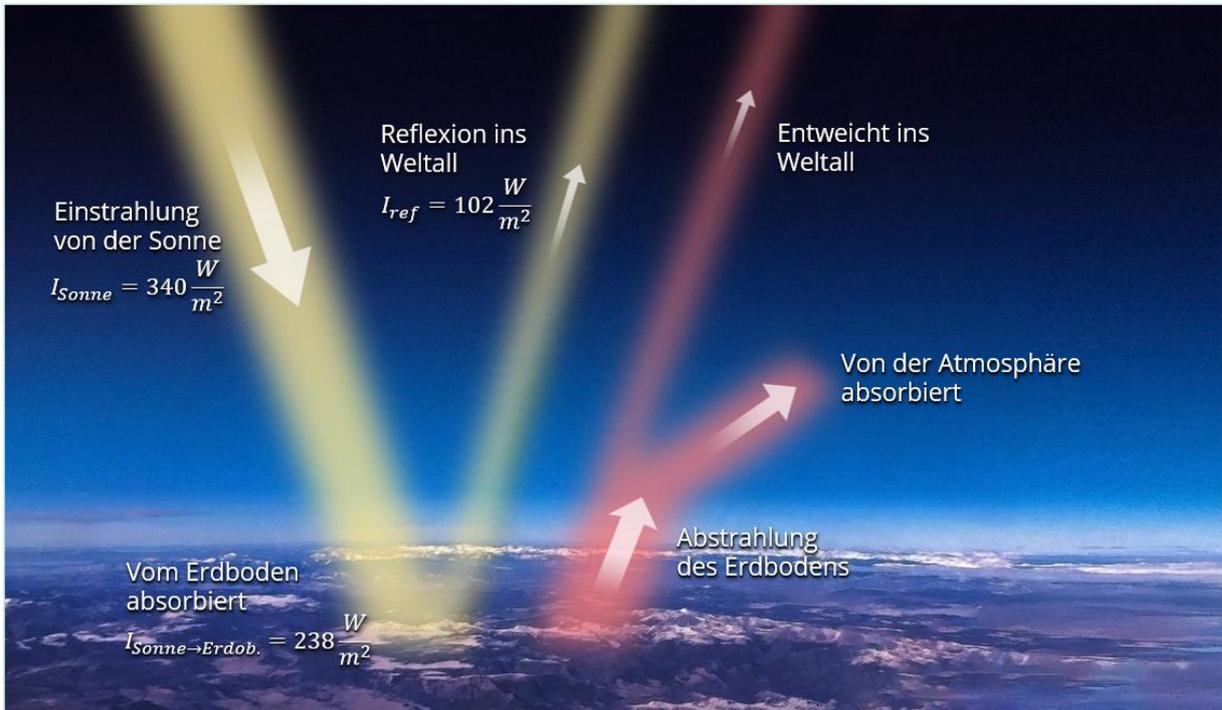


Abbildung 16 – Zwischenschritt zu einer Strahlungsbilanz mit Atmosphäre. (Credits: Strähle und Hohmann)

Durch die Absorption der thermischen Strahlung der Erdoberfläche steigt die Temperatur der Atmosphäre und sie beginnt nun ihrerseits in Richtung Erdoberfläche ($I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Erdob.}}$) und in Richtung Weltall ($I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Weltall}}$) abzustrahlen. Da die Atmosphäre in keine Richtung bevorzugt abstrahlt, gilt in diesem einfachen Modell:

$$I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Erdob.}} = I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Weltall}} \quad (2)$$

Da sich die Atmosphäre auch im Strahlungsgleichgewicht befindet, muss die eingestrahlte Leistung der absorbierten entsprechen, also:

$$I_{\text{Erdob.} \rightarrow \text{Atm.}} = I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Erdob.}} + I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Weltall}} \quad (3)$$

Mit den Erkenntnissen (1), (2) und (3) folgt insgesamt:

$$\frac{I_{\text{Erdob.} \rightarrow \text{Atm.}}}{\text{von der Atmosphäre aufgenommene Energie}} = 0,8 \cdot I_{\text{Erdob.} \rightarrow} = \frac{I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Erdob.}} + I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Weltall}}}{\text{von der Atmosphäre abgestrahlte Energie}} = 2 \cdot I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Erdob.}}$$

Und damit:

$$I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Erdob.}} = 0,4 \cdot I_{\text{Erdob.} \rightarrow} \quad (4)$$

40 % der von der Erde emittierten Strahlung werden also von der Atmosphäre wieder in Richtung Erde zurückgeschickt. Und hier liegt der grundlegende Unterschied zwischen einer Erde mit Atmosphäre und der Felsenerde:

Die Erdoberfläche wird von der Atmosphäre als weitere Strahlungsquelle bestrahlt!

Doch hier wird sich ein Strahlungsgleichgewicht einstellen und so muss die Erdoberfläche diese zusätzlich eingestrahlte Energie auch wieder abstrahlen. Es gilt also:

$$\underbrace{I_{\text{Erdoberf.} \rightarrow}}_{\text{von der Erde abgestrahlte Energie}} = \underbrace{I_{\text{Sonne} \rightarrow \text{Erdoberf.}} + I_{\text{Atm.} \rightarrow \text{Erdoberf.}}}_{\text{von der Erde aufgenommene Energie}} = \underbrace{I_{\text{Sonne} \rightarrow \text{Erdoberf.}} + 0,4 \cdot I_{\text{Erdoberf.} \rightarrow}}_{\text{mit Gleichung (4)}}$$

Aufgelöst nach $I_{\text{Erdoberf.} \rightarrow}$ ergibt sich:

$$I_{\text{Erdoberf.} \rightarrow} = \frac{1}{1 - 0,4} \cdot I_{\text{Sonne} \rightarrow \text{Erdoberf.}} = \frac{1}{1 - 0,4} \cdot 238 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 397 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Die Strahlungsbilanzen passen nun wieder – die Erdoberfläche befindet sich im Strahlungsgleichgewicht und absorbiert die gleiche Intensität, wie sie auch abstrahlt. Gleiches gilt oberhalb der Atmosphäre – wer will, kann dies mit Abbildung 17 gerne überprüfen!

Trotzdem mag das Ergebnis überraschen, denn die Erdoberfläche strahlt damit mehr Energie ab ($397 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$), als sie direkt von der Sonne aufnimmt ($238 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$). Das hängt mit der Wirkung der Atmosphäre zusammen: Die Sonnenenergie wird auf Umwegen über die Erdoberfläche in ihr gespeichert und dann, ebenfalls von der Sonne angetrieben, hin und her geschickt. Die Atmosphäre wird also solange mit Energie aufgeladen (und hierbei das System Erde–Atmosphäre immer weiter aufgeheizt), bis sich ein Strahlungsgleichgewicht einstellt. Dies ist vergleichbar mit dem Anschieben eines Güterwagens auf einem kreisförmigen Gleis: Solange die Reibungsverluste die Antriebsleistung nicht gänzlich aufzehren,

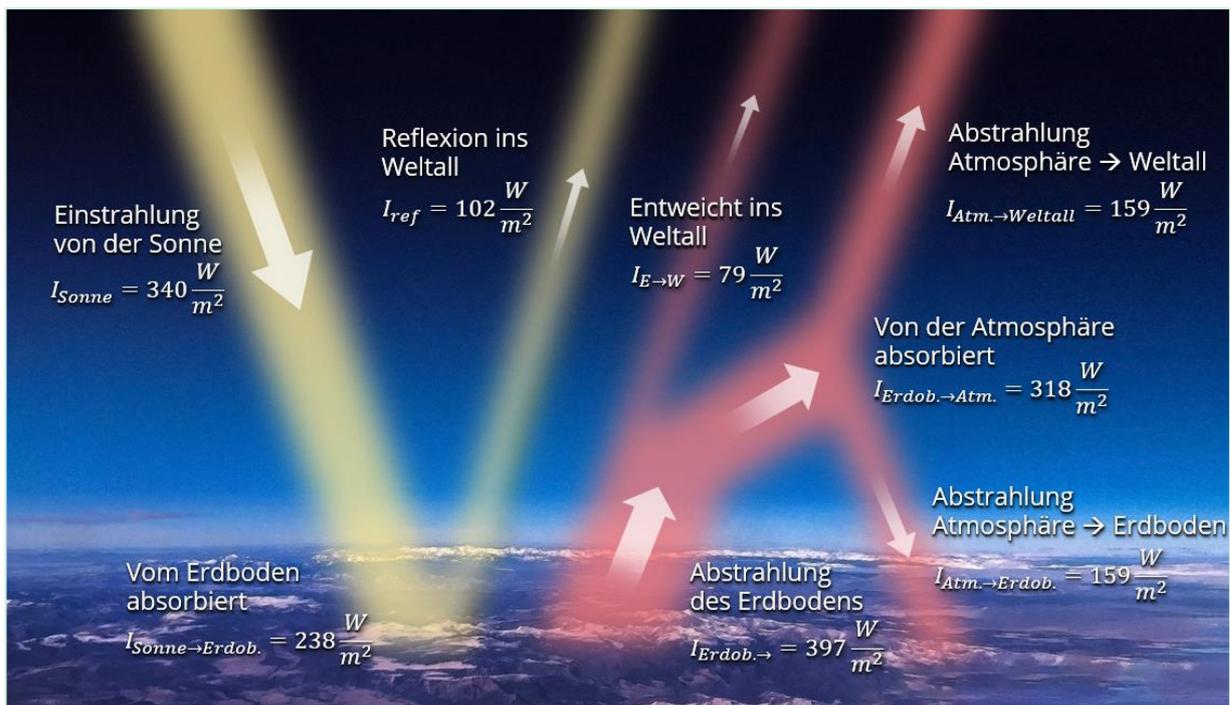


Abbildung 17 – Strahlungsmodell mit Atmosphäre (Credits: Strähle und Hohmann)

werden die Wagen immer schneller, d.h. ihre kinetische Energie nimmt ständig zu.

Um nun mit erhöhter Intensität abzustrahlen, bleibt der Erdoberfläche nur eine Möglichkeit: eine Erhöhung der Temperatur! Mit dem Stephan-Boltzmann-Gesetz (s. S. 9) folgt die Temperatur der Erdoberfläche nun:

$$T = \sqrt[4]{\frac{397 \frac{W}{m^2}}{5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}}} = 289K = 16 \text{ } ^\circ C$$

Im Vergleich zur Felsenerde bewirkt also eine Atmosphäre, welche die thermische Strahlung der Erde zu 80 % absorbiert, eine Rückstrahlung, die die Erde in unserem einfachen Strahlungsmodell um 34 °C⁵ erwärmt. Dieser Prozess ist der sogenannte *Treibhauseffekt*, der das Klima maßgeblich beeinflusst und ohne dem wohl kein Leben auf der Erde möglich wäre.

Und nun kommt der Mensch ins Spiel: Die Temperatur auf der Erde hängt von der Fähigkeit der Atmosphäre ab, die im Infrarotbereich liegende thermische Strahlung der Erdoberfläche zu absorbieren (und damit auch zurückzustrahlen). Was passiert nun, wenn der Mensch diese Absorptionsfähigkeit erhöht?

Gehen wir einmal davon aus, dass durch die Deponierung von Abgasen die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre angestiegen ist und diese nunmehr 85 % (statt der oben angenommenen 80 %) der thermischen Strahlung der Erde absorbiert. Nach obiger Argumentation werden nun $\frac{85\%}{2} = 42,5\%$ der von der Atmosphäre absorbierten Wärmestrahlung zur Erde zurückgeschickt. Wir erhalten:

$$I_{Erdob. \rightarrow} = \frac{1}{1 - 0,425} I_{Sonne \rightarrow Erdob.} = \frac{1}{1 - 0,425} \cdot 238 \frac{W}{m^2} = 414 \frac{W}{m^2}$$

und damit folgt für die Temperatur der Erdoberfläche:

$$T = \sqrt[4]{\frac{414 \frac{W}{m^2}}{5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}}} = 292K = 19 \text{ } ^\circ C$$

Eine Erhöhung der Temperatur um 3 °C!

Man kann dieses sehr einfache Strahlungsmodell nun schrittweise verbessern und beispielsweise die Absorption der Sonnenstrahlung von der Atmosphäre berücksichtigen, so wie es z. B. mit der Ozonschicht in unserer Atmosphäre ja tatsächlich geschieht. Außerdem könnte man den Einfluss der Wolken, des Wasserdampfes und der Aerosole (z.B. Schmutzpartikel) in der Luft berücksichtigen, den Einfluss von Verdunstung und Konvektion miteinbeziehen und ein Temperaturprofil simulieren (d.h. die Strahlung wird dann in unterschiedlichen Höhen unterschiedlich stark absorbiert). All dies beziehen Klimaforscher in ihre komplexen Klimamodelle mit ein, um dann in groß angelegten Simulationen die Dynamik des Luftmeeres über unseren Köpfen richtig darzustellen. Doch wie weit wir unser Modell auch verbessern, die oben dargestellten Zusammenhänge behalten ihre unanfechtbare Gültigkeit:

Je mehr thermische Strahlung der Erdoberfläche unsere Atmosphäre absorbiert, desto wärmer wird es auf der Erde!

Die Absorptionsfähigkeit der Atmosphäre ist also *die* Stellschraube, in der die ganze Problematik des Klimawandels verborgen liegt. Und die Menschheit dreht momentan an dieser Stellschraube in rasantem Tempo!

⁵ Entgegen der wissenschaftlichen Vereinbarung, Temperaturdifferenzen in Kelvin anzugeben, werden diese hier, wie in diesem Kontext üblich, in °C angegeben.

Abbildung 18 zeigt die tatsächlichen Energieströme in der komplexen Atmosphäre, die sich aus langjährigen globalen Messwerten und einem relativ komplexen Atmosphärenmodell ergeben⁶.

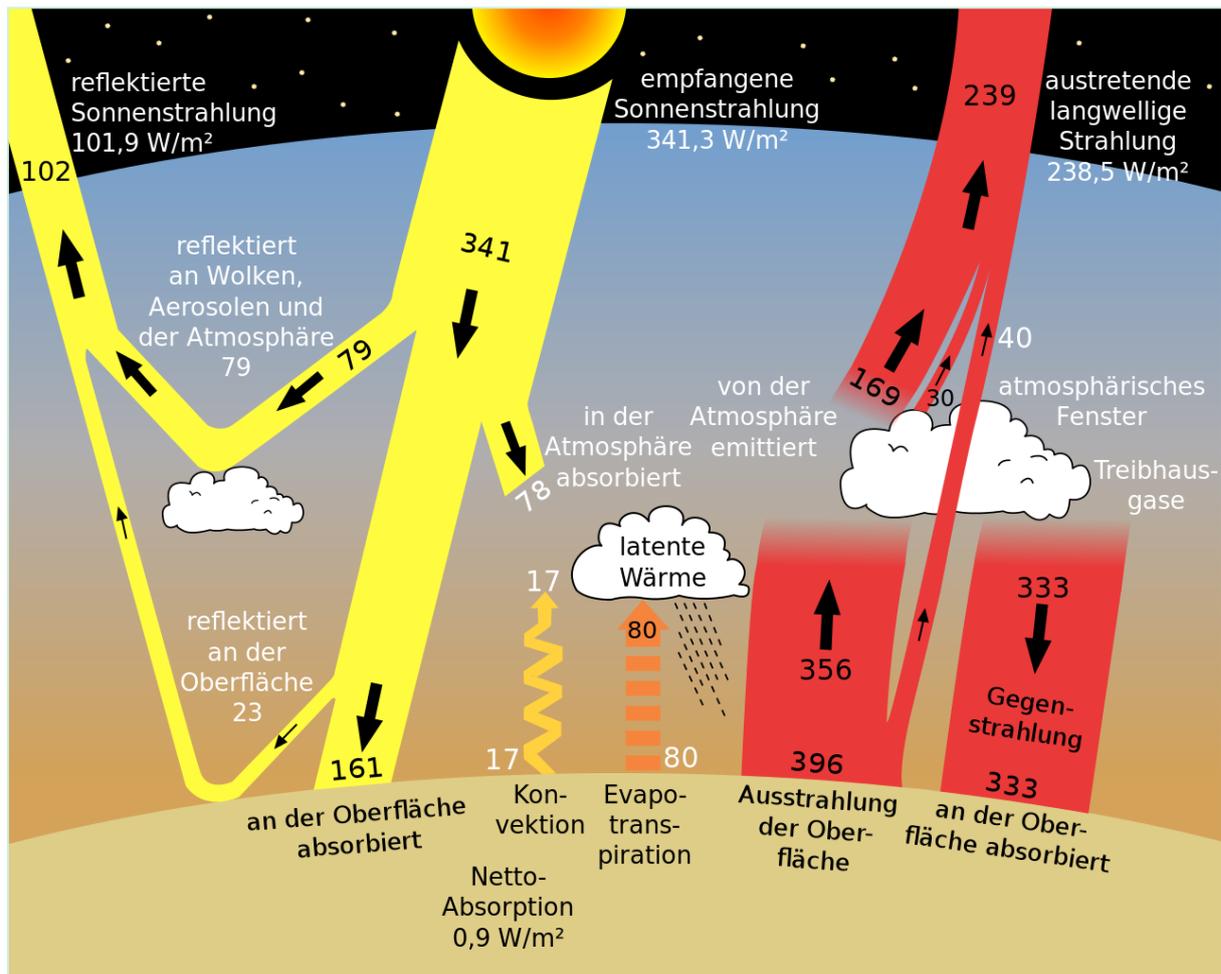


Abbildung 18 – Energieströme in der komplexen Atmosphäre. Die Bilanzen oberhalb der Atmosphäre und oberhalb des Bodens sind ausgeglichen (Credits: Kiehl und Trenberth)

Die Erdoberfläche strahlt hier $I_{\text{Erdoberfläche}} = 396 \text{ W/m}^2$ ab, was einer mittleren Temperatur von $16 \text{ }^\circ\text{C}$ entspricht. Im Gegensatz zum oben verwendeten Modell, absorbiert die Atmosphäre direkt ca. 20 % der einfallenden Sonnenstrahlung. Zudem gibt die Erdoberfläche Energie nicht nur in Form von Wärmestrahlung ab, sondern auch über Verdunstung von Wasser (latente Wärme) und Luftströmungen (Konvektion). Knapp 90 % der Wärmestrahlung der Erdoberfläche werden von der Atmosphäre absorbiert. Zudem wurde in diesem Modell berücksichtigt, dass die reale Lufttemperatur mit zunehmender Höhe stark abnimmt, die untere Atmosphäre also stärker strahlt. Tatsächlich kommen 66 % der Gegenstrahlung aus Höhen um 100 Meter. Tiefe Wolken bilden eine besonders gute Wärmedecke.

⁶ Trenberth, Fasullo and Kiehl (2009): Earth's global energy budget. In: Bulletin of the American Meteorological Society, basiert auf Kiehl and Trenberth 1997

Exkurs: Über die Rolle von Wolken für den Strahlungshaushalt der Erde

PROF. BERNHARD MAYER – METEOROLOGISCHES INSTITUT DER LMU MÜNCHEN

Wolken spielen eine ganz besondere Rolle im Klima. Aus Satellitenbeobachtungen weiß man, dass Wolken einen Teil der einfallenden Solarstrahlung ($50 \frac{W}{m^2}$) ins Weltall zurück reflektieren und dadurch die Erde und die Atmosphäre kühlen. Andererseits tragen sie – genauso wie CO_2 – zum natürlichen Treibhauseffekt bei, indem sie einen Teil der infraroten Strahlung im System zurückhalten ($30 \frac{W}{m^2}$). Der kühlende Effekt dominiert, allerdings hängt das stark vom Wolkentyp ab: Bei niedrigen Stratus-Wolken beispielsweise überwiegt der kühlende Anteil bei weitem, während sich bei hohen Cirrus-Wolken der kühlende und wärmende Anteil weitgehend kompensieren. Das macht die Frage nach der Rolle der Wolken umso spannender, denn ob Wolken den anthropogenen Klimawandel verstärken oder abschwächen – ob sie also eine positive oder negative Rückkopplung darstellen – hängt ganz stark davon ab, wie die Bewölkung auf eine Temperaturzunahme reagiert: Wird es mehr oder weniger hohe oder niedrige Wolken geben? Ändert sich der Bedeckungsgrad oder der Wassergehalt der Wolken? Wie sieht es mit den Tröpfchengrößen und der Niederschlagsbildung aus, die wiederum durch die ebenfalls variablen Partikelzahlen (Aerosol) in der Atmosphäre beeinflusst werden? Zu allem Überfluss sind Wolken extrem variabel. Anders als ein CO_2 -Molekül, das – einmal in die Atmosphäre emittiert – dort hunderte von Jahren verweilt und



Abbildung 19 - Wolken im tropischen Atlantik, vom Forschungsflugzeug HALO aus.
(Credits: Prof. Bernhard Mayer)

zur Erhöhung der Konzentration beiträgt, entstehen und vergehen Wolken im Minutentakt und ändern sich innerhalb weniger Meter. In Klimamodellen fallen sie daher buchstäblich durch das Raster. Das heißt, die räumliche und zeitliche Auflösung von Klimamodellen reicht bei weitem nicht aus, Wolken und ihre Wechselwirkung mit Strahlung abzubilden. Dies ist nur in Form von Parametrisierungen möglich: Ähnlich wie die allgemeine Gasgleichung eine Parametrisierung von 10^{23} Molekülen darstellt, deren komplexe Eigenschaften durch nur drei makroskopische Variablen Druck, Volumen und Temperatur perfekt wiedergegeben werden, müssen auch Wolken durch einige wenige Parameter näherungsweise beschrieben werden, was aufgrund der Vielfalt der Wolken leider nicht so richtig klappen mag. Während also für quantitative Beschreibung des CO_2 aufgrund seiner hohen Lebensdauer im wesentlichen eine einzige Zahl ausreicht (die global gemittelte Konzentration), sind Wolken ungleich vielfältiger und spannender. Es verwundert daher nicht, dass die Klimawirkung von Wolken die größte Unsicherheit in Klimaprognosen darstellen.

Tatsächlich ist im Moment noch nicht klar, ob Wolken den anthropogenen Treibhauseffekt verstärken oder abschwächen. Klar ist, dass sie ihn nicht vollständig kompensieren können, denn sonst hätten wir in den vergangenen Jahrzehnten keine Temperaturzunahme beobachtet.

Die Erforschung von Wolken ist eines der zentralen Themen am Meteorologischen Institut der LMU. Experimentell kombinieren wir auf dem Dach der Universität verschiedene Sensoren zur Fernerkundung von Wolken: Mit einem Wolkenradar, einem Mikrowellenradiometer und einem Lidar ist die LMU Teil des Europäischen Messverbundes ACTRIS. Wir sind regelmäßig bei internationalen Flugzeugmesskampagnen wie zum Beispiel EUREC4A (Elucidating the role of clouds-circulation coupling in climate) im Januar 2020 im tropischen Atlantik dabei, wo Beobachtungen von vier Forschungsflugzeugen, vier hochseetauglichen Forschungsschiffen und bodengestützter Fernerkundung am Barbados-Wolkenobservatorium des Hamburger MPI mit modernen hochauflösenden Klimamodellen kombiniert werden. Bei solchen Meßkampagnen wird zum Beispiel untersucht, wie die Wolken auf eine sich ändernde Ozeanoberflächentemperatur reagieren, oder wie sie auf die Dynamik der Atmosphäre rückwirken. Ein Teil der Instrumentierung des Forschungsflugzeugs HALO ist der an der LMU entwickelte „specMACS“-Sensor – eine Art Highend-Kamera, die räumlich und spektral hochaufgelöste Bilder von der Struktur der Wolken macht und so Aufschluss über Geometrie, Mikrophysik und zeitlichen Verlauf der Wolkenbildung liefert. Zur Interpretation der Daten entwickeln wir dreidimensionale Strahlungstransportmodelle, die die Wechselwirkung von Strahlung und Wolken präziser berechnen und die Interpretation der neuen hochaufgelösten Fernerkundungsmethoden überhaupt ermöglicht. Auch auf der theoretischen Seite arbeiten wir an der verbesserten Berücksichtigung von Wolken in Wetter- und Klimamodellen und der Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Aerosol-Partikeln und Wolken.

2.5. Was ein Treibhausgas zum Treibhausgas macht

In der Realität sorgt der oben beschriebene natürliche Treibhauseffekt dafür, dass die globale Mitteltemperatur der Erde von -18 °C auf ca. 14 °C erhöht wird [8]. Bei dieser Temperatur ist Wasser flüssig und somit Leben auf der Erde möglich.

Die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre spielt für den Treibhauseffekt eine große Rolle. Im Fall der Erde sind die Hauptbestandteile Stickstoff (78,1 Vol.-%⁷), Sauerstoff (20,9 Vol.-%) und Argon (0,93 Vol.-%) dafür nicht relevant, da sie die Wärmestrahlung des Erdbodens nicht absorbieren. Die in geringen Mengen vorkommenden Spurengase Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Methan und Distickstoffoxid haben hingegen diese Fähigkeit und können Energie aus Wärmestrahlung aufnehmen.

Wie in Abbildung 20 beispielhaft und stark vereinfacht dargestellt, werden diese Moleküle durch die eintreffende Strahlung in Schwingungen versetzt und wandeln Strahlungsenergie in Schwingungsenergie um. Die Moleküle emittieren diese Schwingungsenergie nach einiger Zeit wieder, und zwar in zufälliger Richtung. Die Infrarotstrahlung wird also einerseits in den Weltraum und andererseits in Richtung Erdoberfläche wieder abgegeben.

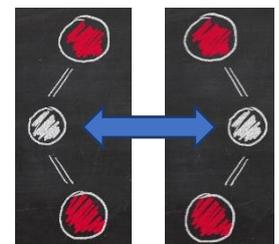


Abbildung 20 – Biegeschwingung eines CO_2 -Moleküls
(Credits: Prof. B. Mayer)

⁷ In Volumenprozent (Vol.-%) werden Anteile am Volumen angegeben, im Unterschied zu z.B. Massenprozent.

Quantenphysikalischer Exkurs: Wie machen die Moleküle das?

Atome und Moleküle können durch eine Änderung ihres quantenmechanischen Zustands Energie aufnehmen. Bei Atomen passiert diese Energieaufnahme durch eine Anregung der Elektronen in der Atomhülle, bei Molekülen kann dies zusätzlich durch eine Änderung des Schwingungs- oder Rotationszustands geschehen. Elektromagnetische Wellen im sichtbaren Wellenlängenbereich regen Elektronen in der Atomhülle an, Licht im oberen Mikrowellenbereich regt Moleküle zu Rotationen an. Die etwas weniger langwellige Infrarotstrahlung im Wellenlängenbereich dazwischen regt Schwingungsübergänge von Molekülen an.

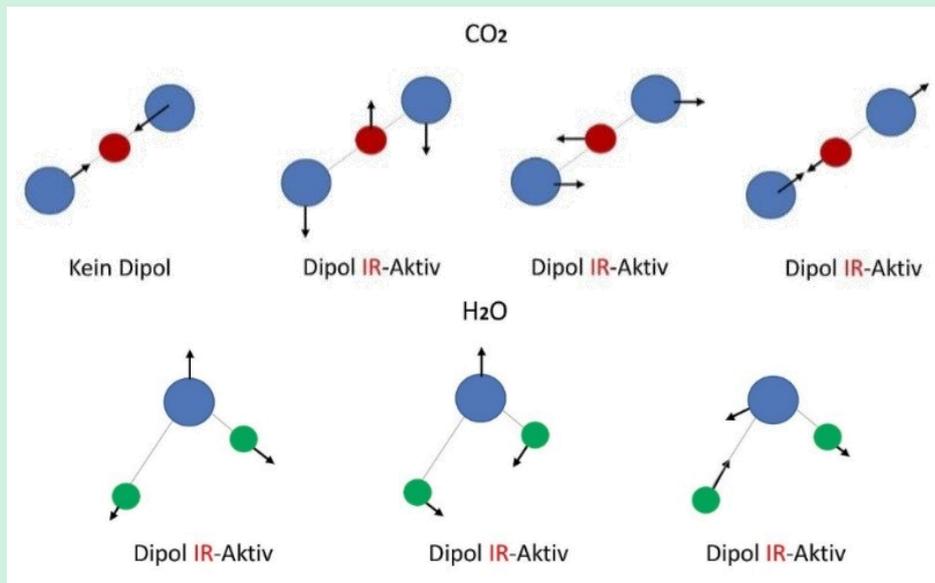


Abbildung 21 – IR-aktive Dipol-Moleküle (Credits: Scorza)

Diese Absorption von Infrarotstrahlung kann allerdings nur dann passieren, wenn sich bei der Schwingung das elektrische Dipolmoment⁸, das als „Hebel“ für die ankommende Strahlung wirkt, ändert. Molekülschwingungen mit dieser Eigenschaft werden als IR-aktiv bezeichnet. Alle symmetrischen Molekülschwingungen, bei denen sich der Ladungsschwerpunkt nicht verschiebt, sind demzufolge IR-inaktiv.

Dipol-Moleküle besitzen ein ständiges Dipolmoment, da die Elektronen nicht symmetrisch verteilt sind. Ein Beispiel hierfür ist das Wassermolekül (siehe Abbildung 21, untere Reihe). Hier verstärken zusätzlich zu den polaren H-O-Bindungen zwei freie Elektronenpaare das permanente Dipolmoment und alle Schwingungs- und Rotationsübergänge sind IR-aktiv.

Im Gegensatz dazu hat das symmetrische CO₂-Molekül kein ständiges Dipolmoment, da die Atome linear angeordnet sind und die Ladungsschwerpunkte für positive und negative Ladungen zusammenfallen. Allerdings führen Biegeschwingungen des Kohlenstoffdioxidmoleküls dazu, dass diese Symmetrie aufgebrochen wird (siehe Abbildung 21, obere Reihe). Die so entstehenden Dipolmomente führen dazu, dass CO₂ Infrarotstrahlung absorbiert und als Treibhausgas wirken kann.

⁸ Ein Molekül besitzt ein elektrisches Dipolmoment, wenn die Ladungsschwerpunkte der positiven und negativen Ladungen nicht zusammenfallen.

Kapitel 3

Das Klimasystem der Erde

3.1. Unterschied zwischen Wetter und Klima

Um zu verstehen, wie die Handlungen des Menschen das Klima beeinflussen, verschaffen wir uns zunächst einen grundlegenden Überblick über das Klimasystem der Erde. Eine klare Unterscheidung der Begriffe Klima und Wetter ist dabei essenziell:

Der aktuelle Zustand der Erdatmosphäre zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort wird als *Wetter* bezeichnet. Das Wetter spielt sich auf Zeitskalen von Stunden bis Tagen – also in relativ kurzen Zeiträumen (siehe Tabelle 1) ab und wird beispielsweise von der Sonnenstrahlung, Hoch- und Tiefdruckgebieten, Konvektion und Niederschlag bestimmt. Als *Witterung* wird das über mehrere Wochen bestehende Wettergeschehen bezeichnet.

Das *Klima* hingegen bezeichnet das langjährige gemittelte Wettergeschehen an einem Ort (“average weather”), üblicherweise über einen Zeitraum von mindestens 30 bis hin zu mehreren tausend Jahren. Kurzzeitige Ausschläge oder Anomalien sind somit nicht entscheidend.

Phänomen	Zeitskala	Beispiele
Mikroturbulenz	Sekunden - Minuten	Staubteufel, Windbö, Hitzeflimmern
Wetter	Stunden - Tage	Tiefdruckgebiet, Tropischer Sturm, Schönwetterwolken
Witterung	Wochen – Monate	Kalter Winter
Klima	Jahre 12.500 Jahre 200 Jahre 100 Jahre	Holozänes Klimaoptimum Kleine Eiszeit (Beginn des Holozäns) Gletscherrückzug im 20. Jahrhundert

Tabelle 1 – Unterscheidung von Wetter, Witterung und Klima (Credits: Scorza)

3.2. Das Klimasystem der Erde und seine Komponenten

Das Klima der Erde wird vor allem durch die Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche und durch die Wechselwirkungen zwischen den *Hauptbestandteilen des Klimasystems* bestimmt. Diese sind:

- Hydrosphäre (Ozean, Seen, Flüsse)
- Atmosphäre (Luft)
- Kryosphäre (Eis und Schnee)
- Pedosphäre und Lithosphäre (Böden und festes Gestein)
- Biosphäre (Lebewesen auf dem Land und im Ozean)

Diese Komponenten haben unterschiedliche Reaktionsgeschwindigkeiten auf Änderungen und bestimmen so maßgeblich die Dynamik des Klimasystems. Wir betrachten sie nun jeweils kurz:

DIE ROLLE DER OZEANE (HYDROSPHÄRE) BEI DER MÄßIGUNG DES KLIMAS

Aktivität 8

Im Klimasystem der Erde spielen die Ozeane eine wesentliche Rolle. Sie bedecken etwa 2/3 der Erdoberfläche und nehmen einen Großteil der einfallenden Sonnenstrahlung auf.

Physikalisch betrachtet ist Wasser ein sehr effektiver Wärmespeicher. Eine bestimmte Masse an Wasser kann bei gleicher Temperaturerhöhung deutlich mehr Wärmeenergie aufnehmen als z. B. die gleiche Masse an Luft. Der zentrale physikalische Begriff in diesem Zusammenhang ist die *Wärmekapazität*. Sie ist für jeden Stoff verschieden und gibt an, wie viel Energie notwendig ist, um ein Kilogramm eines Stoffes um ein Kelvin zu erwärmen. Für Wasser werden so beispielsweise 4,182 kJ Wärmeenergie benötigt; es hat demnach eine spezifische Wärmekapazität von $c_{Wasser} = 4,183 \frac{kJ}{kg \cdot K}$. Luft hingegen hat eine deutlich geringere spezifische Wärmekapazität von $c_{Luft} = 1,005 \frac{kJ}{kg \cdot K}$.⁹

Für den Zusammenhang von eingebrachter Energie ΔQ , Masse m und Temperaturerhöhung ΔT gilt:

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

Die unterschiedliche Wärmekapazität führt dazu, dass unsere Ozeane die durch den anthropogenen Treibhauseffekt eingebrachte Energie erheblich puffern. Dies wird im folgendem einfachen Modell deutlich:

Zwei Quader, die mit jeweils 1 kg Luft gefüllt sind, sollen durch Zufuhr von Energie um $\Delta T = 1K$ erwärmt werden. Hierzu ist nach obiger Formel eine Energiemenge von

$$\Delta Q = c_{Luft} \cdot 2kg \cdot 1K = 2,01kJ$$

nötig.

Ersetzt man einen der Quader durch einen mit Wasser gefüllten Quader (ebenfalls 1 kg), erhalten wir ein sehr einfaches Modell des Systems Atmosphäre–Ozean. Zur Erwärmung dieses Systems um 1 K wird deutlich mehr Energie benötigt:

$$\Delta Q = c_{Luft} \cdot 1kg \cdot 1K + c_{Wasser} \cdot 1kg \cdot 1K = 5,19kJ$$

Anders betrachtet: Führt man diesem System die Energiemenge von 2,01 kJ aus dem ersten Modell zu, erwärmen sich Atmosphäre und Wasser nur um ca. 0,4 K!

Insgesamt werden rund 93% der durch den anthropogenen Treibhauseffekt zusätzlich im Klimasystem der Erde eingebrachten Energie in unseren Ozeanen gespeichert! Die Ozeane entziehen der Atmosphäre aber nicht nur Wärmeenergie, sondern auch CO_2 , welches sich im Wasser löst. Die Ozeane puffern so den anthropogenen Treibhauseffekt doppelt ab – allerdings nicht ohne Folgen, wie wir später noch sehen werden.

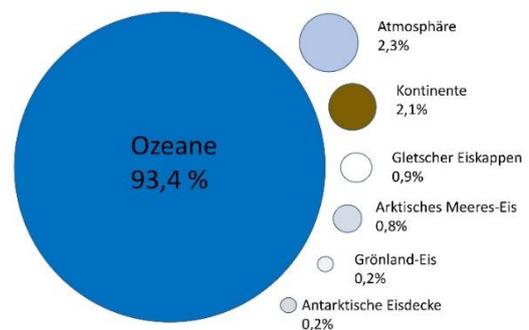


Abbildung 22 – Wärmespeicher im Erdsystem (Credits: Scorza)

⁹ Die Werte sind unter Standardbedingungen angegeben, im Fall von Luft mit 0% Luftfeuchte.

DIE WECHSELHAFTE ATMOSPHÄRE

Die Atmosphäre ist die instabilste Komponente des Klimasystems. Vor allem ihre unterste Schicht, die Troposphäre, ist ein Ort sehr wechselhaften Wettergeschehens. Hier werden Temperaturunterschiede schnell ausgeglichen und aufeinandertreffende Luftmassen können zu heftigen Wetterreaktionen führen, wie z. B. Stürme, Gewitter und Starkniederschläge.

Mit ihrer Fähigkeit zur Absorption von langwelliger Wärmestrahlung sorgt die Atmosphäre für angenehme Temperaturen auf der Erde (siehe „Die Rolle der Atmosphäre und der Treibhauseffekt“ auf Seite 11). Leider wird sie seit der Industrialisierung vermehrt als Mülldeponie für gasförmige Abfallstoffe benutzt, was zum Treibhauseffekt und anderen Problemen führt (z. B. Ozonloch, Feinstaubbelastung etc.).

Ebenso bilden sich in der Atmosphäre bei der Abkühlung von Wasserdampf Wolken. Diese können die Durchlässigkeit für die Strahlung der Sonne und die Wärmestrahlung des Erdbodens lokal stark beeinflussen. Sie sind daher ein entscheidender Faktor im Klimasystem. Man unterscheidet verschiedene Typen: Hohe Zirruswolken sind fast komplett durchlässig für die Sonnenstrahlung, wohingegen tiefe und dichte Stratuswolken während des Tages die Strahlung der Sonne reflektieren und abkühlend wirken. Bei Nacht wiederum werfen sie die Wärmestrahlung des Erdbodens zurück und wirken aufheizend. So verhindert z. B. eine tiefe Wolkendecke in einer Winternacht, dass die Wärmestrahlung in den Weltraum entweicht. Im Vergleich zu einer sternklaren wolkenlosen Winternacht bleibt es deutlich wärmer.

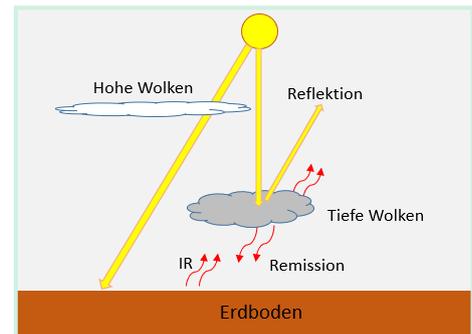


Abbildung 23 – Wirkung hoher und niedriger Wolken
(Credits: Scorza)

DIE ROLLE DER KRYOSPHÄRE BEI DER STRAHLUNGSBILANZ

In der Strahlungsbilanz der Erde spielen Eis- und Schneeflächen eine bedeutende Rolle, da beide ein viel höheres Reflexionsvermögen (Albedo) aufweisen als Boden und Wasser. Während die Ozeane und der Erdboden eine Albedo von 10–20 % haben und entsprechend bis zu 90 % der einfallenden Sonnenstrahlen absorbieren und in Wärmestrahlung umwandeln, liegt die Albedo bei Eis und Schnee bei 50–90 %.

Aktivität 2

Bei einer wachsenden Eis- und Schneedecke auf der Erde erhöht sich die globale Albedo. Aufgrund der stärkeren Reflexion wird dann weniger Energie von der Erde aufgenommen. Die dadurch bedingte Abkühlung verstärkt die Eis- und Schneebildung weiter, wodurch sich wiederum die Albedo erhöht. Geologen und Klimaforscher diskutieren aktuell, ob unser Planet sogar Phasen der vollständigen Vereisung im Laufe seiner Geschichte erfahren hat, wie es nach der Hypothese der „Schneeball-Erde“ in einer Zeit vor ca. 750 bis 600 Millionen Jahren der Fall gewesen sein soll. Es wird vermutet, dass Vulkanismus auf der Erde, mit massenweise ausgestoßenem CO_2 und der damit verbundenen Verstärkung des Treibhauseffekts, die Erde wieder von ihrem Eispanzer befreite.

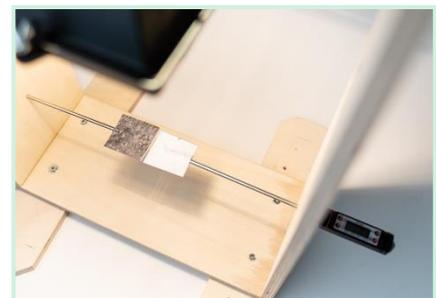


Abbildung 24 – Modellexperiment zur Albedo aus dem Klimakoffer. Bei gleicher Beleuchtung erwärmt sich der dunkle Körper stärker.

Dieser Rückkopplungseffekt kann natürlich auch in umgekehrter Richtung ablaufen: Abschmelzende Eis- und Schneeflächen vermindern die Reflexion und verstärken damit die Erwärmung des Erdbodens,

der Luft und des Wassers, wodurch der Schmelzvorgang weiter beschleunigt wird. Die Größe der Eis- und Schneeflächen auf einem Planeten hat also eine große Auswirkung auf sein Klima.

DIE PEDOSPHERE UND LITHOSPHERE IM KLIMASYSTEM

Es wurde bereits dargelegt, dass der Energieaustausch zwischen Boden und Atmosphäre über die Abgabe von Wärmestrahlung stattfindet. Eine andere Form der Energieabgabe, die latente Wärme, geschieht über die Verdunstung von Wasser in Bodennähe: Dem umgebenden Boden und der Luft wird Energie bei Verdunstung von Wasser entzogen, die im Wasserdampf in die Atmosphäre gelangt und dort beim Kondensieren wieder frei wird. Ist der Erdboden relativ trocken, kann weniger latente Wärme an die Atmosphäre abgegeben werden. Durch die geringere Verdunstung kann weniger Energie entweichen, was zu einer erhöhten Temperatur des Erdbodens führt. Da auch weniger Wasserdampf in die Atmosphäre gelangt, bilden sich weniger Wolken und die Einstrahlung auf den Erdboden wird verstärkt – der Boden wird noch wärmer und trockener und eine positive Rückkopplung beginnt.

DIE ROLLE DER BIOSPHÄRE

Der Einfluss der Biosphäre auf das Klima ist durch den Gasaustausch mit der Atmosphäre, vor allem vom Kohlenstoffdioxidkreislauf, bestimmt. Ursprünglich bestand die Atmosphäre der Erde überwiegend aus Kohlenstoffdioxid, Stickstoff, Methan und Wasserdampf. Durch die primitiven Algen der Urmeere kam über Fotosynthese Sauerstoff hinzu, wodurch höher entwickeltes Leben ermöglicht wurde.

Noch heute liegt die klimatische Bedeutung der Biosphäre vor allem in ihrem Einfluss auf die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre und damit auf die Stärke des Treibhauseffekts: Mittels Fotosynthese entziehen die Pflanzen der Atmosphäre ständig Kohlenstoffdioxid. Die Konzentration von Methan und Distickstoffoxid, die in der Atmosphäre ebenfalls als Treibhausgase wirken, wird ebenfalls teilweise durch Prozesse in der Biosphäre gesteuert. Das Treibhausgas Methan entsteht auf natürliche Weise vor allem durch anaerobe Zersetzung von organischem Material (z. B. im Magen einer Kuh) und die Entstehung von Distickstoffoxid wird stark durch die Aktivität von Bakterien im Boden und in Gewässern beeinflusst. Des Weiteren erhöht eine Pflanzendecke auf der Erdoberfläche die Albedo.

Die globale Erwärmung ist in erster Linie eine Konsequenz des veränderten Energiehaushalts der Erdatmosphäre als Ganzes, hervorgerufen durch erhöhte Konzentrationen von Treibhausgasen (s. Abschnitt 2.4). Entscheidend für den regionalen Klimawandel ist allerdings auch, inwiefern sich die Umverteilung der zur Verfügung stehenden Energie der Erdatmosphäre ändert. Diese Umverteilung hängt unmittelbar mit atmosphärischen Zirkulationssystemen – z.B. Tief- und Hochdruckgebieten – zusammen und ist in manchen Regionen stark variabel. Zudem gibt es nach wie vor Lücken in unserem grundlegenden Verständnis solcher durch Zirkulation angetriebenen Klimaänderungen. Dies motiviert nicht nur eine Verbesserung der Computer-Klimamodelle für bessere Langzeitprognosen, sondern auch weitere Grundlagenforschung. Unsere Gruppe am Meteorologischen Institut der Fakultät für Physik an der LMU beschäftigt sich mit „Stratosphären-Troposphären-Dynamik und Klima“ und arbeitet daran, das grundlegende Verständnis der Variabilität und des Langzeitwandels von großräumigen Zirkulationssystemen zu verbessern.

Wieso kommt es überhaupt zu großräumigen Zirkulationssystemen?

Zwischen den Tropen und höheren Breiten besteht generell ein Energieungleichgewicht: in den Tropen wird mehr Sonnenenergie aufgenommen, als vom Erdsystem wieder in den Weltraum abgestrahlt wird – ein Energieüberschuss; in hohen Breiten wird mehr Energie in den Weltraum abgestrahlt, als von der Erde aufgenommen wird – ein Energiedefizit. Dieses Energieungleichgewicht zwischen den Tropen und höheren Breiten erzeugt Wärmetransport, welcher sich in Form von großräumigen Zirkulationssystemen äußert. In diesem Sinne stellt die Atmosphäre eine riesige Wärmekraftmaschine dar, wobei die Zirkulationssysteme beständig dazu neigen den Temperaturunterschied zwischen Tropen und höheren Breiten abzubauen und somit das Energiegleichgewicht auszugleichen.

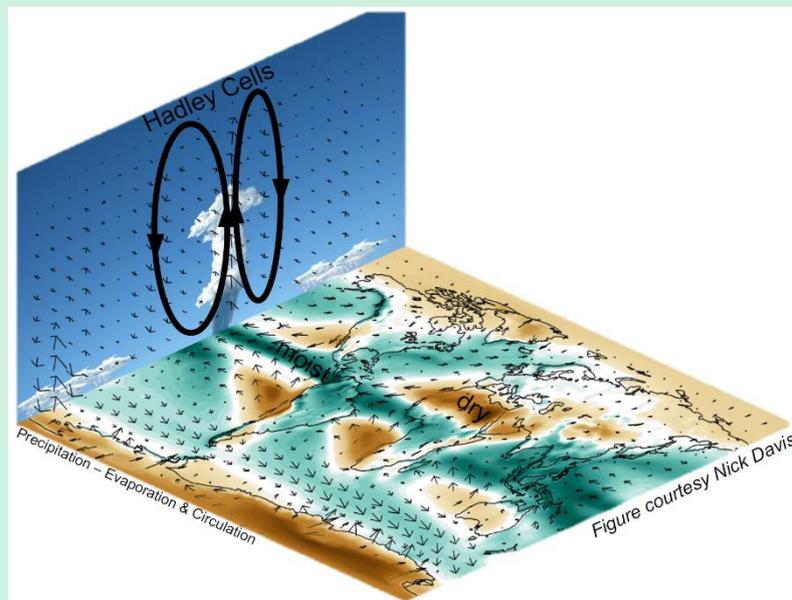


Abbildung 25 – Darstellung der Hadley Zirkulation (Credits: Nick Davis)

In den Tropen und Subtropen erfolgt diese Umverteilung der Energie in Form der sogenannten Hadley Zirkulation. In dieser Hadley Zirkulation steigt feucht-warme Luft in Äquatornähe innerhalb von hochreichenden Gewitterstürmen auf, strömt in ~15 km Höhe langsam polwärts, sinkt in den Subtropen als trockene Luft ab und strömt in Bodennähe zurück Richtung Äquator. Dabei wird die

Höhenströmung durch den Corioliseffekt nach Osten abgelenkt und erzeugt so subtropischen Strahlströme (Jetstreams). In ähnlicher Weise wird die bodennahe Strömung nach Westen abgelenkt und erzeugt so die Passatwinde. Die trockene, absinkende Luft in den Subtropen verhindert Wolkenbildung und Regen und ist deshalb u.a. verantwortlich für die für diese Klimazone typischen Trockenzone. Ein in den letzten Jahren mehr und mehr dokumentiertes Signal des Klimawandels ist eine polwärts gerichtete Ausdehnung der Hadley Zirkulation und somit eine Verschiebung der subtropischen Trockenzone hin zu mittleren Breiten. Für Regionen, die bisher geradeso genug Regen hatten, um z.B. Landwirtschaft zu betreiben, hat ein damit verbundener Wandel hin zu vorwiegend trockenem Klima dramatische Konsequenzen.

In unserer Gruppe untersuchen wir u.a., inwiefern die Ausdehnung der Hadley Zirkulation von Jahr zu Jahr variiert und welche Prozesse für diese Variabilität verantwortlich sind. Auf diese Weise lassen sich Rückschlüsse über die Mechanismen ziehen, die die typische Lage der subtropischen Trockenzone bestimmen. Für diese Untersuchungen verwenden wir v.a. Daten von globalen Berechnungen mit modernen Computer-Wettervorhersagemodellen, die mit Beobachtungsdaten kombiniert werden. Solche sogenannte Reanalysen stellen derzeit die beste Informationsquelle des tatsächlichen Zustands der Atmosphäre und darin enthaltenen Strömungen mit globaler Abdeckung dar und beinhalten Informationen über Temperatur, Windkomponenten, Luftfeuchte und andere meteorologische Größen und stehen inzwischen in hoher Qualität und globaler Abdeckung für die sogenannte Satellitenära (seit 1979) zur Verfügung. Für die Auswertung dieser Daten verwenden wir moderne statistische Methoden, z.B. um dominante Muster der Variabilität zu finden.

Außerdem untersuchen wir Mechanismen der Ausdehnung der Hadley Zirkulation über klimatische Zeiträume anhand von vereinfachten globalen Computer-Klimamodellen. Dabei werden gezielt bestimmte Prozesse vernachlässigt, um so mögliche Mechanismen isoliert betrachten zu können. Anhand solcher Computermodellsimulationen haben wir z.B. festgestellt, dass die Wechselwirkung von Hoch- und Tiefdruckgebieten, die manchmal aus den mittleren Breiten in die Subtropen ziehen, mit der Hadley Zirkulation eine entscheidende Rolle für die durch den Klimawandel hervorgerufene polwärts gerichtete Ausdehnung der Hadley Zirkulation spielt.

Die angesprochenen Hochs und Tiefs sind in höheren Breiten für den polwärts gerichteten Wärmetransport verantwortlich (z.B. strömt bei einem Tiefdruckgebiet auf der Nordhalbkugel – vom Weltall aus betrachtet eine rotierende Zirkulation gegen den Uhrzeigersinn – kalte Polarluft auf dessen Westseite nach Süden und warme subtropische Luft auf dessen Ostseite nach Norden). Diese Tiefs und Hochs wandern meist entlang des Strahlstroms der mittleren und polaren Breiten (~Polarfrontjet), beeinflussen aber gleichzeitig diesen Strahlstrom durch ihren induzierten Wärmetransport. Ein robustes projiziertes Signal des Klimawandels ist eine polwärts gerichtete Verschiebung dieses Strahlstroms, welche aber bisher unzureichend verstanden ist. Unsere Forschungsergebnisse haben dazu beigetragen, die Kopplung beider polwärts gerichteter Verschiebungssignaturen (Hadley Zirkulation und Strahlstrom) des Klimawandels besser zu verstehen.

Eine in den letzten Jahren mehr und mehr beschriebene weitere Kopplung besteht mit der Zirkulation der Stratosphäre (Höhenbereich ~10-50 km) im Winter und Frühjahr. Hier bildet sich durch die starke Abkühlung der Polarkappe im Winter der sogenannte Polarwirbel. Die Stärke dieses Polarwirbel variiert mitunter heftig. Durch bestimmte dynamische Prozesse kann dieser

Wirbel manchmal schlagartig zusammenbrechen. Obwohl die Stratosphäre weniger als 20% der Masse der Atmosphäre besitzt, haben Analysen von Beobachtungsdaten ergeben, dass diese Variationen des stratosphärischen Polarwirbels die Zirkulation bis hinunter zum Erdboden beeinflussen kann. Dies geschieht sowohl auf kürzeren Wetterzeiträumen, als auch auf längeren Klimazeiträumen. Die durch den Klimawandel hervorgerufene zukünftige Veränderung des Polarwirbels ist allerdings eher ungewiss, v.a. auf der stark variablen Nordhalbkugel. Unsere Gruppe erforscht deshalb die Mechanismen der Variabilität des Polarwirbels und der Kopplung zur Zirkulation der Troposphäre bis zum Erdboden. Dabei verwenden wir wiederum Reanalysedaten und Simulationen mit vereinfachten Computer-Klimamodellen.

3.3. Entstehung der Klimazonen

Aktivität 7

Der Begriff „Klima“ wird von „klinein“, dem griechischen Wort für „neigen“, abgeleitet. Denn die Jahreszeiten sind eine Folge der Neigung der Erdachse relativ zur Bahnebene der Erde um die Sonne. Diese Neigung bewirkt, dass während des Nordsommers die Nordhalbkugel eher senkrecht und dadurch intensiver von der Sonne bestrahlt wird (Position a in Abbildung 26), während die Sonnenstrahlen auf der Südhalbkugel relativ schräg einfallen. Sechs Monate später wird die Südhalbkugel intensiver bestrahlt (Position b in Abbildung 26) und auf der Nordhalbkugel herrscht Winter.

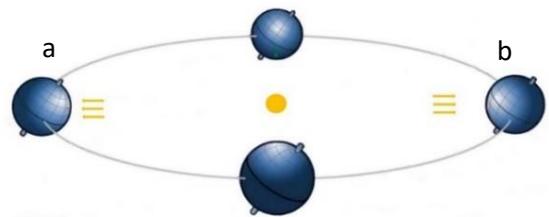


Abbildung 26 – Die Jahreszeiten (Credits: Scorza)

Eine zweite Konsequenz der Neigung der Erdachse ist, dass die mittlere Temperatur im Jahresverlauf im Bereich um den Äquator am höchsten ist und zu den Polen hin abnimmt. So ist der unterschiedliche Einfallswinkel, mit dem die Sonnenstrahlung auf die Erdkugel trifft, letztlich auch der Grund dafür, dass es verschiedene Klimazonen auf der Erde gibt.

Als Klimazone fasst man in Ostwestrichtung um die Erde erstreckende Gebiete zusammen, die aufgrund der klimatischen Verhältnisse Gemeinsamkeiten (z. B. in Bezug auf die Vegetation) aufweisen.

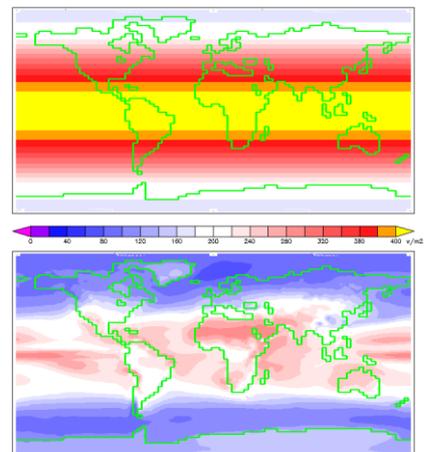


Abbildung 27 – Jährlicher Mittelwert der Sonneneinstrahlung außerhalb der Erdatmosphäre (oben) und am Erdboden (unten) in W/m^2 (Credits: William M. Connolley, Wikipedia)

In den Tropen ist es beispielsweise ganzjährig warm und feucht. Abhängig von der Lage findet man sowohl tropische Regenwälder, als auch tropische Steppen und Wüsten. Es gibt keine Jahreszeiten, lediglich eine Trocken- und eine Regenzeit. Die Temperaturschwankungen innerhalb eines Tages sind größer als die jährlichen. In der gemäßigten Zone hingegen, in welcher auch Österreich liegt, sind die verschiedenen Jahreszeiten deutlich ausgeprägt. Im Inneren der Kontinente ist es trocken und es wachsen Nadel-, Laub- und Mischwälder. In den Polargebieten fällt die Sonne ganzjährig nur relativ flach bis überhaupt nicht ein und es ist daher im Jahresmittel sehr viel kälter. Die Vegetation ist mit Gräsern und niedrigen Sträuchern weit weniger üppig. Bezeichnend für diese Zone sind der dreimonatige Polartag im Sommer und die ebenfalls dreimonatige Polarnacht im Winter.

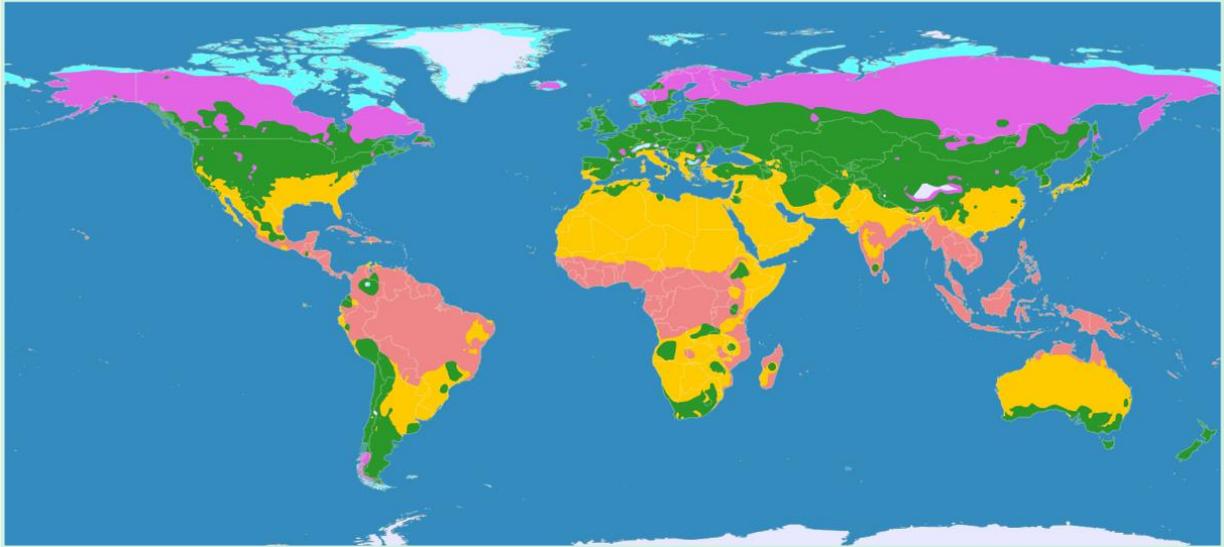


Abbildung 28 – Die Klimazonen der Erde

(Quelle: LordToran - Selbst erstellt auf Basis dieser Geodaten: CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2301350>)

Mit den Klimazonen wird sichtbar, welche Auswirkungen es hat, wenn der Erdoberfläche unterschiedlich viel Energie zugeführt wird. Somit beeinflusst der durchschnittliche Winkel der Sonnenstrahlung im Jahresmittel beispielsweise die Vegetation ganz wesentlich. *Der durch den anthropogenen Treibhauseffekt verursachte zusätzliche Energiefluss in Richtung Erdoberfläche, wird die Lage dieser Klimazonen verändern und vom Äquator aus in Richtung der Pole verschieben – eine Bewegung, welche die meisten der auf ihr jeweiliges Ökosystem spezialisierten Arten nicht mitgehen können.*

Exkurs: Wetter- und Klimamodelle

Meteorologen leiten die Wetterprognose aus den Rechenergebnissen von Computersimulationen (sogenannte *Wettermodelle*) ab. Dabei wird von einem Hochleistungscomputer, aus einem gegebenen Anfangszustand der Atmosphäre mit Hilfe von auf physikalischen Zusammenhängen beruhenden Gleichungen, der Zustand zu einem späteren Zeitpunkt berechnet. Der Anfangszustand ergibt sich aus zahlreichen Stationsbeobachtungen, wie Messungen mit Bojen, Schiffen, Flugzeugen und Wetterballons, sowie aus Satelliten- und Radardaten (siehe Abbildung 29). Ziel ist es, eine möglichst genaue Prognose des lokalen Wetters angeben zu können.

Die Schwierigkeit bei der Wetterberechnung liegt darin, dass die Atmosphäre ein komplexes System mit teilweise chaotischem Verhalten ist. In einem nicht-chaotischen System führen kleine Veränderungen in den Anfangsbedingungen zu ähnlichen Endzuständen. In einem vollständig chaotischen System hingegen, kann schon eine kleine Änderung in den Anfangsbedingungen zu völlig verschiedenen Endzuständen führen. Modellrechnungen, z.B. zum Wetter, werden deshalb mit zunehmender Vorhersagezeit immer unsicherer, da chaotischer. Aus diesem Grund gilt im Allgemeinen, dass das Wetter im Mittel etwa sieben Tage vorhersagbar ist.

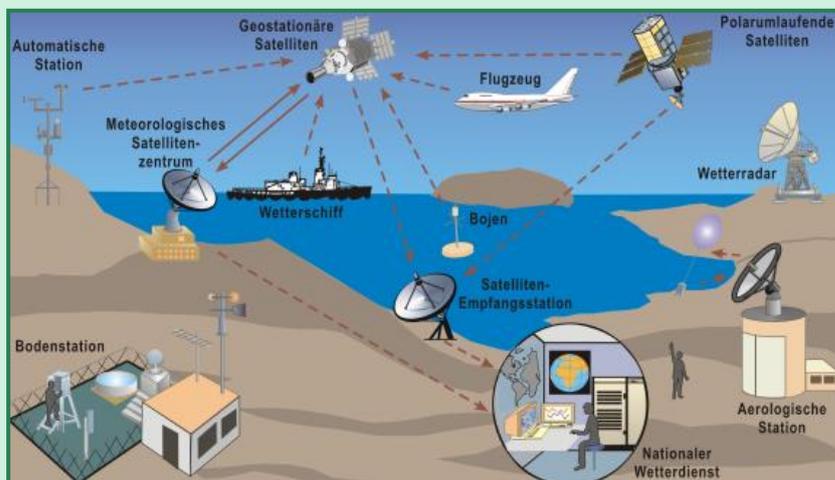


Abbildung 29 – Das weltweite meteorologische Beobachtungssystem
(Quelle: Wetterdienst.de DWD)

Globale *Klimamodelle* sind ebenso komplexe physikalische Modelle, sie bilden das Klimasystem der Erde in vereinfachter Form ab. Die Klimasimulationen berechnen als gekoppelte Atmosphäre-Ozeane-Modelle die Reaktion des Systems auf veränderte Antriebe, wie z. B. Änderungen der Sonneneinstrahlung oder veränderte Energieflüsse im Klimasystem. Hierzu werden Atmosphäre und Ozeane in ein dreidimensionales Gitter geteilt. Der Austausch an Masse und Energie zwischen benachbarten Gitterpunkten wird durch grundlegende physikalische Differentialgleichungen aus der Fluidynamik, Hydrologie und Chemie Zeitschritt für Zeitschritt gelöst. Auf diese Weise kann beispielsweise untersucht werden, wie sich erhöhte Treibhausgasemissionen auf das zukünftige Klima auswirken.

Während die Prognose eines Wettermodells direkt durch Beobachtung überprüft werden kann, können die Ergebnisse von Klimasimulationen jeweils nur mit gemittelten Wetterwerten verglichen werden. Um zu prüfen, ob ein Klimamodell plausible Ergebnisse liefert, wird es mit Messdaten und plausiblen Annahmen gefüttert und anschließend getestet, ob es das gegenwärtige Klima, aber auch beispielsweise das während vergangener Eiszeiten, korrekt simulieren kann. Um nun eine *Klimaprognose* zu erstellen, werden verschiedene Klimamodelle mit jeweils einer Bandbreite von verfügbaren Daten und Annahmen gespeist, um so die Spannbreite zukünftiger Entwicklungen vorhersagen zu können.

Kapitel 4

Der anthropogene Klimawandel

4.1. Der anthropogene Treibhauseffekt

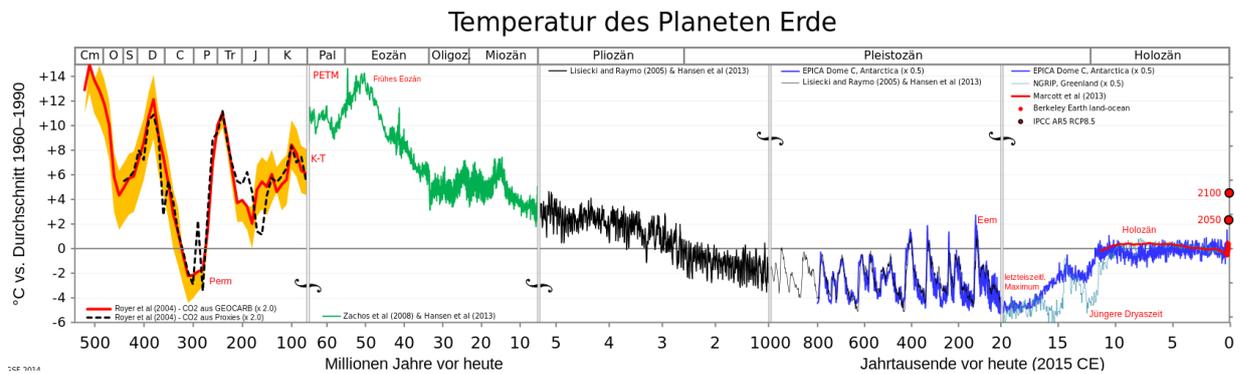


Abbildung 30 – Die globalen Oberflächentemperaturen der letzten 540 Mio. Jahre, ermittelt durch zugrunde liegende Messungen und errechnete Temperaturen für 2050 und 2100 aus dem 5. Sachstandsbericht des IPCC (Quelle: Glen Forgas, palaeotemps G2)

Die Erde ist vor rund 4,6 Milliarden Jahren entstanden. In dieser langen Zeit gab es immer wieder Klimaschwankungen und große Veränderungen auf dem Planeten. Seit dem Beginn des Holozäns vor rund 12.000 Jahren und damit seit der letzten Eiszeit, ist unser Klima, verglichen mit früheren Zeitabschnitten, relativ stabil (siehe Abbildung 30). Seit 1980 aber ist ein signifikanter Anstieg der mittleren Atmosphärentemperatur zu beobachten.

Heute herrscht in der Klimaforschung der Konsens, dass der aktuelle Klimawandel ohne die Aktivitäten des Menschen nicht zu erklären ist:

„Unter denen, die die Nuancen und die wissenschaftlichen Grundlagen von langjährigen Klimaprozessen verstehen, gibt es anscheinend so gut wie keine Debatte über die Tatsache der Erderwärmung und die Rolle der menschlichen Aktivitäten dabei. Die Herausforderung scheint eher zu sein, wie diese Tatsache wirksam an Politiker und die Allgemeinheit vermittelt werden kann, die fälschlicherweise von einer Debatte unter Wissenschaftlern ausgehen.“

Zitat aus einer Studie in der die Übereinstimmung unter Geowissenschaftlern zur Frage „Meinen Sie, dass menschliche Aktivitäten einen entscheidenden Einfluss auf die Veränderung der durchschnittlichen globalen Temperaturen haben?“ untersucht wurde. [9]

Dabei spielt insbesondere Kohlenstoffdioxid eine ausschlaggebende Rolle für den anthropogenen (vom Menschen verursachten) Treibhauseffekt [10]. Über Jahrtausende war der CO₂-Gehalt in der Erdatmosphäre stets unterhalb der 300 ppm¹⁰ Marke (siehe Abbildung 31). Seit der industriellen Revolution um 1800 jedoch nimmt die Konzentration von etwa 280 ppm um mehr als 40 %, auf heute über 400 ppm, schnell zu und liegt heute höher als zu irgendeinem Zeitpunkt in den letzten 400.000 Jahren¹¹.

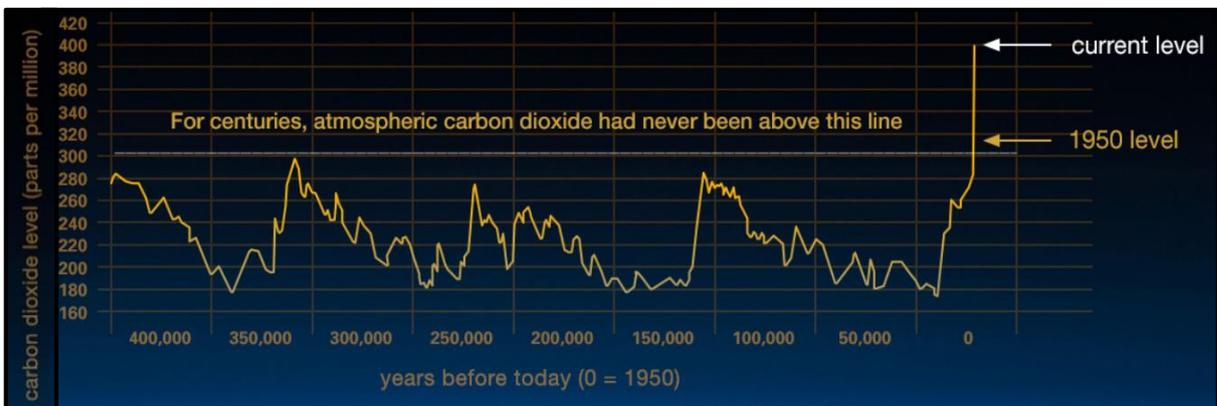


Abbildung 31 – Diagramm zur CO₂-Konzentration in der Atmosphäre mit Daten aus aktuellen Messwerten und Rekonstruktionen mittels Eisbohrkernen (Quelle: NASA – Global Climate Change; climate.nasa.gov/evidence/ aufgerufen am 20.01.2019)

Der Hauptgrund hierfür ist, dass der Mensch zur Erzeugung nutzbarer Energie kohlenstoffhaltige fossile Brennstoffe verbrennt und dabei unter Sauerstoffzufuhr Kohlenstoffdioxid freisetzt. Zunächst geschah dies hauptsächlich in Europa und Nordamerika, später auch in Russland, China, Indien und Brasilien. In den letzten vier Generationen stieg der jährliche Ausstoß von CO₂ von 2 Gigatonnen (1900) auf den mit 37,1 Gigatonnen im Jahr 2017 bis dahin größten jemals gemessenen Wert [11].

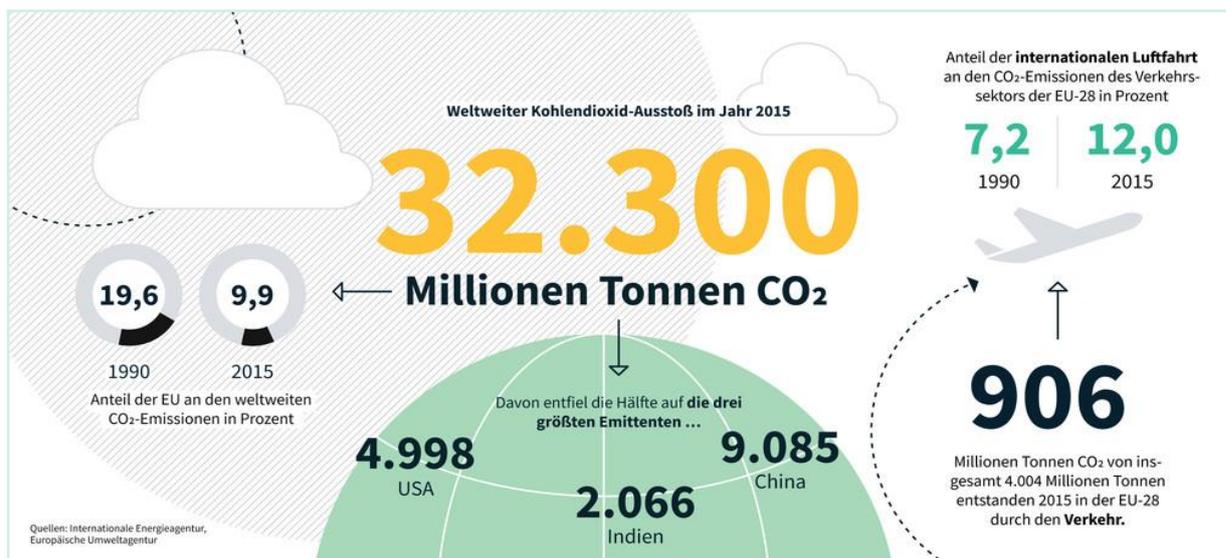


Abbildung 32 – Weltweiter Kohlenstoffdioxid-Ausstoß im Jahr 2015 (Credits: Internationale Energieagentur, Europäische Umweltagentur)

¹⁰ ppm steht für parts per million, also die Anzahl an CO₂-Molekülen pro eine Million Moleküle trockener Luft.

¹¹ Woher kann man das wissen? Aus dem hunderttausende Jahre alten Eis der Antarktis wurden Bohrkern aus einer Tiefe von mehr als 3 km entnommen. Aus den darin enthaltenen Luftblasen lassen sich Rückschlüsse über die Zusammensetzung der Atmosphäre in verschiedenen Zeitaltern der Erdgeschichte ziehen.

Abbildung 33 zeigt den globalen Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration in den letzten rund 150 Jahren. Dem von Skeptikern des anthropogenen Klimawandels oft vorgebrachten Einwand, die Schwankungen der Sonnenflecken, mit ihren erhöhten Strahlungswerten, wären für den messbaren Tempera-

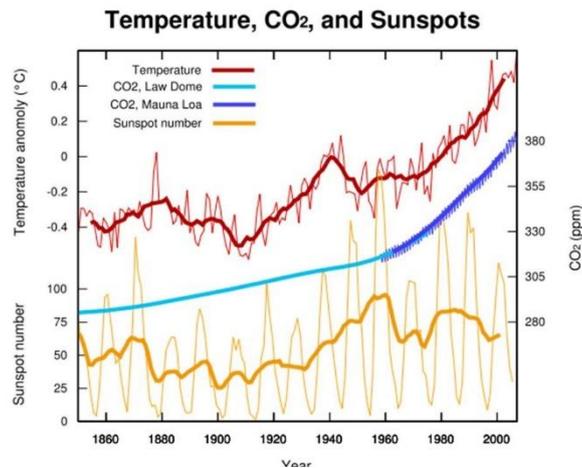


Abbildung 33 - Temperatur und CO₂-Anstieg

turanstieg der letzten vier Jahrzehnte verantwortlich, kann eindeutig widersprochen werden. Die Sonnenaktivität sinkt, während die Temperatur und der Kohlenstoffdidgehalt der Atmosphäre steigen. Sonnenaktivität und globale Erwärmung sind entkoppelt, sie entwickeln sich sogar gegenteilig.

Eine entscheidende Rolle für den verstärkten Treibhauseffekt spielt auch *Methan* (CH₄), welches im Vergleich zu CO₂ als Treibhausgas um einen Faktor von ca. 28 bis 72 wirksamer ist, wenn man die Wirkung für die nächsten 100 bzw. 20 Jahre betrachtet.¹² Seit der industriellen Revolution steigerte sich die Methankonzentration in der Erdatmosphäre von rund 700 ppb¹³ auf heute über 1800 ppb [12]. Die weltweite Emission von Methan ist zu 37 % direkt oder indirekt auf Viehhaltung zurückzuführen [13] und heute trägt Methan mit etwa 16 % zum anthropogenen Treibhauseffekt bei [14]. Dieser Wert könnte durch das Auftauen des Permafrostbodens in Sibirien und Kanada (siehe „Wasserdampf und Rückkopplungseffekte“ unten) bald stark ansteigen. Methan ist ein kurzlebiges Treibhausgas. Der größte Teil davon oxidiert in der Atmosphäre innerhalb eines Jahrzehnts zu Kohlenstoffdioxid, welches dann die Atmosphäre über einen Zeitraum von Jahrtausenden zusätzlich erwärmt.

Ein weiteres Treibhausgas ist *Distickstoffmonoxid* (N₂O, Lachgas), welches ein ca. 265-mal höheres Treibhauspotential hat als Kohlenstoffdioxid. In der Erdatmosphäre ist die Konzentration dieses Gases seit der industriellen Revolution um ca. 20 % angestiegen und trägt heute mit ca. 6 % zum anthropogenen Treibhauseffekt bei [14]. Die Emission von N₂O erfolgt sowohl auf natürlichem, wie auch auf vom Menschen beeinflusstem Wege: In der Natur wird N₂O von Bakterien im Boden und in Gewässern und Urwäldern freigesetzt. Der Mensch trägt allerdings mit dem Einsatz von Düngemitteln auf Stickstoffbasis, der Industrieproduktion von Chemikalien und dem Verbrennen fossiler Brennstoffe zur erhöhten Freisetzung dieses Treibhausgases bei.

Des Weiteren spielen *fluorierte Treibhausgase* eine Rolle. Anders als die oben genannten Gase entstehen sie nicht bei natürlichen Vorgängen, sondern wurden eigens für die Industrie entwickelt. Obwohl

12 Um die Klimaschädlichkeit ausgestoßener Treibhausgase über eine gewisse Zeitdauer vergleichen zu können, ordnet man ihnen jeweils ein CO₂-Äquivalent (CO₂e), auch Treibhausgaspotential genannt, zu. Normalerweise geht man von einem Zeitraum von 100 Jahren aus, dann beträgt dieser Faktor für Methan 28. Geht man hingegen von einem Zeitraum von 20 Jahren aus, also einem Zeitraum, in dem wir das Klima noch vor dem Kippen bewahren können, hat Methan das 72-fache Wirkungspotenzial verglichen mit CO₂ [45].

13 ppb steht für parts per billion, also Teile pro eine Milliarde Moleküle trockener Luft.

ihr Anteil am gesamten Ausstoß von Treibhausgasen der Industrienationen sehr gering ist, sind ihre Auswirkungen durch die lange Verweildauer in der Atmosphäre (u. U. einige tausend Jahre) und ihrer Effektivität als Treibhausgas pro Molekül (12.000 bis 25.000-mal stärker als die von CO₂) nicht zu unterschätzen.

4.2. Rückkopplungsprozesse

Aktivität 12

Aus der Erhöhung der globalen Temperatur und der Veränderung des Klimas resultieren Effekte, die selbst wiederum zur Verstärkung ihrer Ursache beitragen, also zu einer weiteren Erhöhung der Temperatur führen können. Man spricht von Rückkopplungsprozessen. Diese stellen den eigentlichen „Knackpunkt“ des Klimawandels dar. Es geschieht etwas und das Klimasystem reagiert darauf mit Veränderungen. Die natürlichen Vorgänge im Wechselspiel der Atmosphäre, der Meere und Ozeane, der Eismassen und der Biosphäre vollzogen sich schon immer, auch in Zeiten als es noch keine Menschen gab. In Abhängigkeit von der Landmassenverteilung, Vulkanismus und verschiedener astronomischer Parameter, änderte sich das Klima ständig – der Wandel des Klimas ist also völlig natürlich. In den letzten Jahrzehnten wurde allerdings die Konzentration an Molekülen mit der Fähigkeit Wärmestrahlung zu absorbieren durch anthropogene Einflüsse drastisch erhöht. Mitten hinein in ein vernetztes, vielschichtiges und deshalb komplexes natürliches Geschehen verändert der Mensch die Rand- und Anfangsbedingungen der Atmosphäre durch den Abbau fossiler Ressourcen. Kohlenstoff, der vor hunderten von Millionen Jahren tief im Boden gebunden war, wird durch Kohleabbau, Öl- und Gasförderung zunächst an die Erdoberfläche und durch Verbrennungsprozesse schließlich in die Atmosphäre gebracht. Auf diese allmähliche Veränderung reagieren alle natürlichen Systeme durch Rückkopplungen, und zwar ganz natürlich.

Beispiele für solche Rückkopplungen sind:

WASSERDAMPF IN DER ATMOSPHÄRE

Wasserdampf ist das stärkste natürliche Treibhausgas. Er hat jedoch nur eine sehr kurze Verweildauer in der Erdatmosphäre, hält sich dort meist nur einige Tage und kehrt dann als Regen zurück auf die Erde. Im Gegensatz zu CO₂ stellt Wasserdampf keine direkte Ursache für die vom Menschen verursachte Verstärkung des Treibhauseffekts dar - der anthropogene Treibhauseffekt kommt schließlich nicht durch den vermehrten Ausstoß von Wasserdampf zustande. Allerdings verdunstet aufgrund der globalen Erwärmung mehr Wasser und je heißer es wird, desto höher ist die Aufnahmefähigkeit von Wasserdampf in der Luft.¹⁴ Eine erhöhte Konzentration von Wasserdampf in der Atmosphäre verstärkt den Treibhauseffekt, was wiederum zu höherer Erderwärmung führt und so weiter [10].

VERRINGERTE ALBEDO

Die globale Erwärmung führt zum Abschmelzen von Eisflächen auf der Erdoberfläche, zum Beispiel im arktischen Ozean. Das Sonnenlicht wird nicht mehr vom glitzernden Schnee ins Weltall zurückgeworfen, sondern verliert sich in den Tiefen des Polarmeers bzw. erwärmt den freigelegten dunklen Untergrund. Die Energie heizt das Wasser bzw. den Boden auf und bleibt im Erdsystem, wodurch die globale Erwärmung weiter vorangetrieben wird [15].

¹⁴ Dieser Effekt ist z.B. im Winter an schlecht isolierten Fensterscheiben zu beobachten. Da die warme und relativ feuchte Raumluft in Fensternähe abkühlt, sinkt ihre Aufnahmefähigkeit für Wasserdampf und das Wasser kondensiert an der Glasscheibe.

ABSCHMELZEN DES GRÖNLÄNDISCHEN EISPANZERS

In den letzten Jahren hat der Eisverlust in Grönland durch ins Meer fließende Gletscher und verstärktes Abschmelzen im Sommer stark zugenommen. Der stellenweise drei Kilometer starke Eisschild verliert dadurch langfristig an Höhe. Seine Oberfläche, die sich jetzt noch in hohen und damit kalten Luftschichten befindet, sinkt und wird somit wärmeren Temperaturen ausgesetzt. Das wiederum verstärkt das Abschmelzen weiter. Außerdem beschleunigt das vermehrte Schmelzwasser an der Gletschersohle wie ein Schmierfilm das Abgleiten der Eismassen ins Meer. Der völlige Kollaps des Grönländischen Eisschildes würde über Jahrhunderte bis Jahrtausende einen Meeresspiegelanstieg von 7 Metern verursachen und natürlich auch zu einer Verringerung der Albedo beitragen [16].

VERSTEPPUNG DES AMAZONAS-REGENWALDES

Der Regenwald ist auf riesige Mengen Wasser angewiesen, die verdunsten. Ein Großteil der Niederschläge im Amazonasbecken stammt aus über dem Wald wieder kondensierendem Wasser. Der Rückgang der Niederschläge in einem wärmeren Erdklima einerseits oder die Rodung des Waldes andererseits könnten diesen Kreislauf an eine kritische Grenze bringen: Je weniger Waldflächen Wasser verdunsten, desto trockener wird die Region und desto weniger Wasser steht dem Wald zur Verfügung. Eine Umwandlung des Amazonas-Regenwaldes in einem an die Trockenheit angepassten, saisonalen Wald oder eine Graslandschaft hätte außerdem grundlegende Auswirkungen auf das Erdklima: Immerhin etwa ein Viertel des weltweiten Kohlenstoff-Austausches zwischen Atmosphäre und Biosphäre findet hier statt. Bei einem Verlust würden gigantische Mengen an bisher gebundenem Kohlenstoff als CO₂ freigesetzt, das als Treibhausgas die Klimaerwärmung weiter antreiben würde [17].

RÜCKGANG DER NORDISCHEN NADELWÄLDER

Die nordischen Nadelwälder umfassen fast ein Drittel der weltweiten Waldfläche. Mit dem Klimawandel erhöht sich bereits jetzt der auf sie wirkende Stress durch Pflanzenschädlinge, Feuer und Stürme deutlich. Zugleich beeinträchtigen Wassermangel, erhöhte Verdunstung und menschliche Nutzung die Regeneration der Wälder. Wenn die Belastung charakteristische Schwellenwerte überschreitet, könnten sie von Busch- und Graslandschaften verdrängt werden. Das Verschwinden der Wälder würde nicht nur den Lebensraum vieler Tiere und Pflanzen vernichten, sondern auch eine massive Freisetzung von Kohlenstoffdioxid bedeuten, welche zur beschleunigten Erderwärmung beitragen kann [15].

TAUENDER PERMAFROST

Im sibirischen und kanadischen Permafrostboden sind in Tiefen von mehr als drei Metern vermutlich mehrere hundert Milliarden Tonnen Kohlenstoff gespeichert. Sie stammen aus organischem Material, das während und seit der letzten Eiszeit hier eingelagert wurde. Erwärmt sich der Permafrost, so setzt er riesige Mengen an Kohlenstoffdioxid und Methan, also Treibhausgase, in die Atmosphäre frei [15].

ABSCHWÄCHUNG DER MARINEN BIOLOGISCHE KOHLENSTOFFPUMPE

Die Weltmeere nehmen riesige Mengen an Kohlenstoff auf – rund 40 % der bisherigen anthropogenen CO₂ Emissionen wurden so der Atmosphäre wieder entzogen. Einen großen Teil davon nützen Algen zum Wachstum. Sie sinken nach dem Absterben in die Tiefsee und speichern auf diese Weise den Kohlenstoff. Diese Funktion könnte durch Erwärmung und Versauerung des Wassers sowie häufiger auftretende Sauerstoffarmut eingeschränkt werden, sodass mehr CO₂ in der Atmosphäre verbleibt [18].

ABNAHME DER AUFNAHMEFÄHIGKEIT VON CO₂ IM MEERWASSER

Aktivität 10

Die Temperatur der Ozeane steigt durch die globale Erwärmung. Da aber die Aufnahmefähigkeit des Wassers für Kohlenstoffdioxid mit zunehmender Wassertemperatur sinkt, erhöht sich die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre [19].

4.3. Kippunkte

Aktivität 11

Der Klimawandel hat also Prozesse zur Folge, die selbstverstärkend wirken. Diese Rückkopplungsprozesse treten ein, wenn bestimmte Temperaturen überschritten werden. An diesen Schwellen können kleine Veränderungen das Erdsystem in einen qualitativ neuen Zustand übergehen lassen. Man spricht von einem Kippunkt. „Kippen“ bedeutet, dass diese Veränderungen eine Dynamik entwickeln, die nicht mehr aufzuhalten also irreversibel ist. Das Phänomen solcher Kippprozesse spielt auch für manche Rückkopplungseffekte eine Rolle, wenn man diese isoliert betrachtet. Das bedeutet, dass eine fortschreitende Temperaturerhöhung zu einer Kaskade sich gegenseitig auslösender Kippunkte führen kann („Dominoeffekt“). Abbildung 34 zeigt einige dieser Kippunkte.

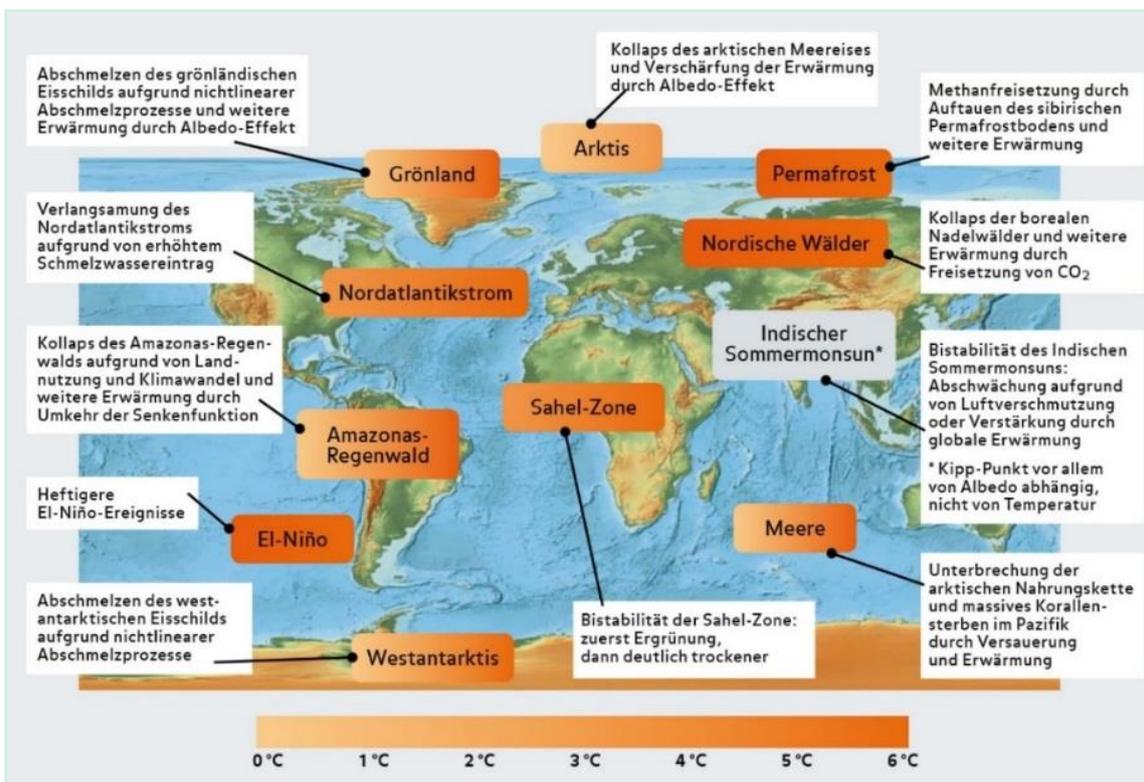


Abbildung 34 – Kippelemente des Klimasystems (Credits: Globaler Klimawandel, Germanwatch verändert nach Lenton et al.)

Kapitel 5

Auswirkungen des Klimawandels

5.1. Weltweite Auswirkungen des Klimawandels

Im vorangegangenen Kapitel wurde dargelegt, dass wir als Menschen, also unser Handeln und unsere Lebensweise einen Anstieg der Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid, Methan, Stickoxiden und anderen Treibhausgasen bewirken. Der dadurch verstärkte Treibhauseffekt führt zu Veränderungen von Temperatur, Niederschlag, Bewölkung, Schneebedeckung und des Meeresspiegels, sowie zu einem deutlich häufigeren Auftreten von Wetterextremen aller Art, wie z. B. langen Dürreperioden und Extremniederschlägen sowie zu erhöhter atmosphärischer Aktivität (Gewitter, Stürme). Einige dieser Auswirkungen beruhen auf einfachen physikalischen Zusammenhängen, wie etwa der Anstieg des Meeresspiegels, die Versauerung der Ozeane oder die Verringerung der Albedo. Andere stellen nichtlineare, rückgekoppelte, komplexe Folgen dar, wie z. B. die Veränderung der Meeresströmungen mit ihren Auswirkungen auf Ökosysteme, Bewohnbarkeit von Erdregionen und Landwirtschaft, mit dem damit verbundenen Verlust an Nutzflächen. Im Folgenden wird auf Auswirkungen rund um das Wasser auf der Erde eingegangen, weitere Folgen sind unten in einer Tabelle dargestellt.

Wasser verdunstet umso schneller, je höher seine Temperatur ist. Dies führt zur im letzten Kapitel erwähnten Rückkopplung. Durch die erhöhte Luftfeuchtigkeit und die der Atmosphäre durch Kondensation vermehrt zugeführte Energie wird zudem die Wahrscheinlichkeit und Stärke von Extremwetterereignissen wie Gewitter, Hagel und Sturm bis hin zu Hurrikans gesteigert [20].

Aktivität 6

Eines der Risiken, das eine direkte Bedrohung für den Menschen darstellt, ist der steigende Meeresspiegel. In den Jahren von 1993 bis 2010 führten die Folgen des Treibhauseffekts dazu, dass der Meeresspiegel pro Jahr um 3,2 Millimeter anstieg [12]. In seinem 5. Klimareport aus dem Jahr 2013 rechnet der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, kurz IPCC) damit, dass der Meeresspiegel bis zum Jahr 2100 insgesamt um 52 bis 98 Zentimeter steigen wird, falls die Emission von Treibhausgasen ungebremst fortgesetzt wird [12]. Der Grund für diesen Anstieg ist zum einen, dass Wasser (wie alle Flüssigkeiten, Festkörper und Gase) bei höherer Temperatur ein größeres Volumen einnimmt¹⁵. Der Anteil dieser thermischen Ausdehnung am steigenden Meeresspiegel wird auf 30 bis 55 % geschätzt [21]. Der Rest kommt vor allem durch schmelzendes Festlandeis, wie das des antarktischen Eisschildes oder der Gletscher auf Grönland, zustande¹⁶. Aktuelle Messungen kommen zu dem Ergebnis, dass sich das Festlandeis sehr viel schneller abbaut als bisher vermutet: Durch das Abschmelzen des Eises bildet sich eine Gleitschicht zwischen Eis und Boden. Das führt dazu, dass riesige Eisflächen ins Meer rutschen [22].

¹⁵ Ausgenommen hiervon ist natürlich die Dichteanomalie um 4 °C, die für unsere Überlegungen aber keine Rolle spielt.

¹⁶ Schmelzendes Meereis führt hingegen nicht zu einer Erhöhung des Meeresspiegels, siehe auch das Experiment im Klimakoffer hierzu.

Die Prognosen bis zum Jahr 2100 sind erst der Anfang; dies zeigt der Vergleich von Temperatur und Meeresspiegel in der neueren Erdgeschichte in Abbildung 35. Das Grönlandeis bindet eine Wassermenge, bei deren komplettem Abschmelzen mit einem weltweiten Meeresspiegelanstieg von sieben Metern zu rechnen wäre. Mit einem Abschmelzen des Westantarktischen Eisschild würde der Meeresspiegel um 3,5 Meter steigen, mit einem Abschmelzen des Ostantarktischen Eisschildes (das bislang als weitgehend stabil gilt) sogar über 55 Meter [10]!

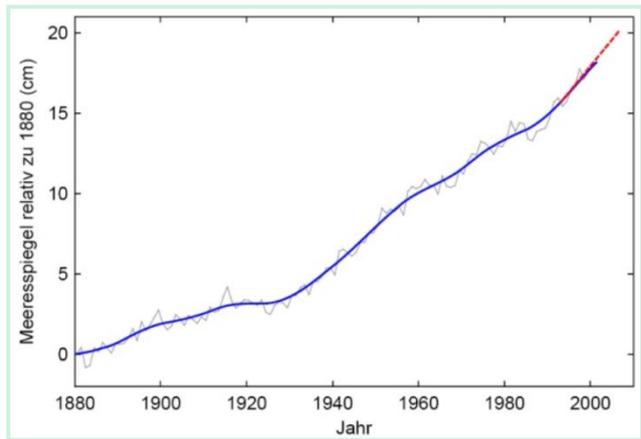


Abbildung 35 – Anstieg des Meeresspiegels relativ zu 1880
(Credits: Rahmstorf)

Dies hätte insbesondere für niedrig liegende Küstenregionen und -städte katastrophale Überflutungen zur Folge. Darunter befinden sich auch die am dichtesten besiedelten Gebiete der Erde: 22 der 50 weltweit größten Städte liegen an einer Küste, unter anderem Tokio, Shanghai, Hongkong, New York und Mumbai. In Bangladesch ragen 17 % der Landesfläche mit ca. 35 Millionen Einwohnern momentan weniger als einen Meter aus dem Wasser. Andere Länder wie der Inselstaat Kiribati werden voraussichtlich ab 2050 nicht mehr bewohnbar und ab 2070 gänzlich überschwemmt sein. Die Regierung Kiribatis unternimmt bereits Schritte zur Umsiedelung der über 100.000 Einwohner.

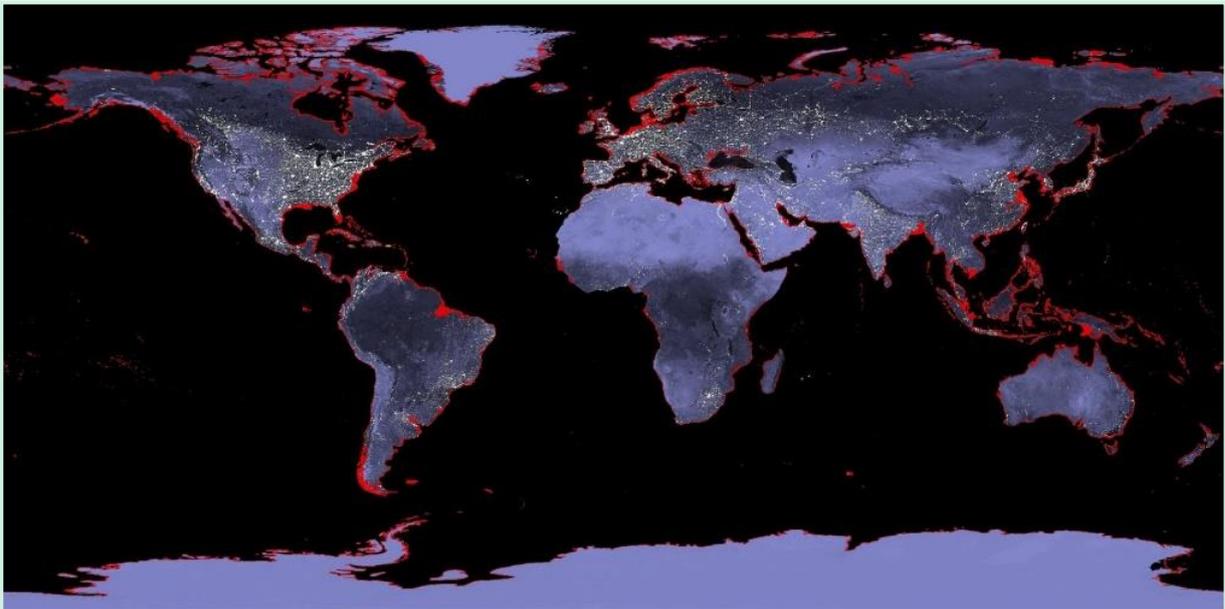


Abbildung 36 – Betroffene Küstengebiete bei einem Anstieg des Meeresspiegels um einen Meter
(Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:6m_Sea_Level_Rise.jpg aufgerufen am 27.05.2020)

Eine Erderwärmung hat auch weitreichende Konsequenzen auf die Wasserversorgung vieler Menschen. Bei einer Temperaturzunahme von 4 °C wäre durch das Abschmelzen der riesigen Gletscher im Himalaya rund ein Viertel der Einwohner Chinas und rund 300 Millionen Menschen in Indien betroffen. Im Mittelmeerraum und in den südlichen Gebieten Afrikas wäre die Trinkwasserversorgung stark eingeschränkt. Unter den Folgen von wiederkehrenden Dürren und Trockenheit hätten weltweit rund zwei Milliarden Menschen zu leiden [23].

In der folgenden Tabelle sind weitere Auswirkungen auf die verschiedenen Bestandteile des Klimasystems der Erde dargestellt:

Teil des Klimasystems	Veränderungen	Auswirkungen
Hydrosphäre	Die globale Erwärmung führt zur thermischen Ausdehnung der Meere, schmelzendes Festlandeis fließt ins Meer ab. Der Meeresspiegel steigt.	Überflutung von Küstengebieten Küstenstädten, Massensterben von Fischen, Algen und anderen Meerestieren u. a. aufgrund des Temperaturanstieges des Wassers.
Atmosphäre	Heiße trockene Luft verstärkt die Erosion in einigen Regionen, in anderen Regionen verstärkt ein höherer Wasserdampfgehalt die Wolkenbildung und den Niederschlag.	Wetterextreme, Hitzewellen mit erheblichen Schäden an Flora und Fauna sowie Auswirkungen auf die Menschen, Starkregen mit plötzlichen Überflutungen.
Kryosphäre	Eis- und Schneeschmelze verringert die Albedo (Rückstrahlvermögen).	Mehr Sonnenstrahlung wird vom Boden aufgenommen und führt zu einer stärkeren Erwärmung der Erde.
Biosphäre	Mit der globalen Erwärmung sterben Pflanzen- und Tierarten aus (u. a. durch Verschiebung der Klimazonen, Veränderung von Ökosystemen, Trockenheit, Waldbrände).	Verschwinden von CO ₂ -Senken. Es wird weniger CO ₂ durch Photosynthese absorbiert und in O ₂ verwandelt.
Pedosphäre und Lithosphäre	Freisetzung dunkler Flächen durch das Schmelzen von Eis und Schnee.	Verringerung der Albedo, stärkere Erderwärmung.

Tabelle 2 – Veränderungen der Komponenten des Klimasystems durch die globale Erwärmung (Credits: Scorza)

Insgesamt sind die beschriebenen Folgen katastrophal: Die Umweltschutzorganisation Greenpeace geht davon aus, dass bereits im Jahr 2040 mindestens 200 Millionen Menschen ihre Heimat verlassen müssen, um zu überleben und damit zu Klimaflüchtlingen werden [24].

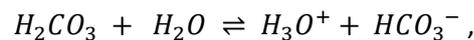
5.2. Die Versauerung der Ozeane

Vielleicht sollte in diesem etwas „apokalyptischen“ Kapitel noch erwähnt werden, dass die Kapazität des Wassers für die Aufnahme von Gasen mit der Temperatur abnimmt. Heute puffern die Ozeane noch über 90 % der globalen Erwärmung durch Wärmeaufnahme (siehe Hydrosphäre auf Seite 21) und Lösung von Kohlenstoffdioxid ab [25]. In Zukunft wird das weniger werden. Ob das Meerwasser CO_2 aus der Atmosphäre aufnimmt oder an diese abgibt, hängt von der Differenz im CO_2 -Partialdruck ab: Der Partialdruck entspricht dem Anteil von CO_2 am Gesamtdruck innerhalb eines Gasgemisches. Ist der Druck des Kohlenstoffdioxids in der Erdatmosphäre höher als der CO_2 -Partialdruck im Ozean, so bindet das Oberflächenwasser des Ozeans Kohlenstoffdioxid. Allerdings ist der Partialdruck des CO_2 im Meerwasser stark abhängig von der Temperatur: je wärmer das Wasser, desto höher ist er. Dies bedeutet, dass ein wärmerer Ozean weniger Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre aufnehmen kann als ein Ozean mit niedrigerer Temperatur. Also führt eine Temperaturerhöhung der Ozeane zu einer höheren Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre.

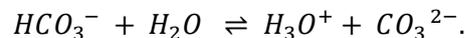
In der Erdatmosphäre reagiert CO_2 nicht mit anderen Gasen. Im Meerwasser ist das anders: Das gelöste Kohlenstoffdioxid geht Verbindungen ein und so entsteht beispielsweise Kohlensäure (H_2CO_3):



Diese spaltet sich über die folgende Reaktion in Oxoniumionen (H_3O^+) und Hydrogencarbonationen (HCO_3^-) auf,

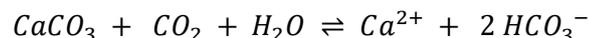


welche ihrerseits unter Energiezufuhr zu Oxoniumionen und Carbonationen (CO_3^{2-}) weiterreagieren können:



Wir sehen: Je mehr CO_2 im Wasser gelöst ist, desto mehr Oxonium bildet sich, d.h. desto saurer werden die Meere.

Das gelöste Kohlenstoffdioxid ist an einem weiteren Gleichgewicht beteiligt. Es beeinflusst die Bildung bzw. Lösung von Kalk (CaCO_3):



Erhöht sich die Konzentration des Kohlenstoffdioxids, so wird das Gleichgewicht auf die rechte Seite verschoben, sodass weniger Kalk gebildet wird, bzw. bestehender Kalk gar aufgelöst wird. Damit steht weniger Kalk als Baustoff für die Skelette und Schalen von Muscheln, Schnecken, Seeigeln, Korallen usw. zur Verfügung.

5.3. Der Klimawandel in Österreich

Doch welche Auswirkungen des Klimawandels lassen sich konkret für Österreich ableiten? Im weltweiten Vergleich zeigt sich, dass Österreich besonders stark betroffen ist.

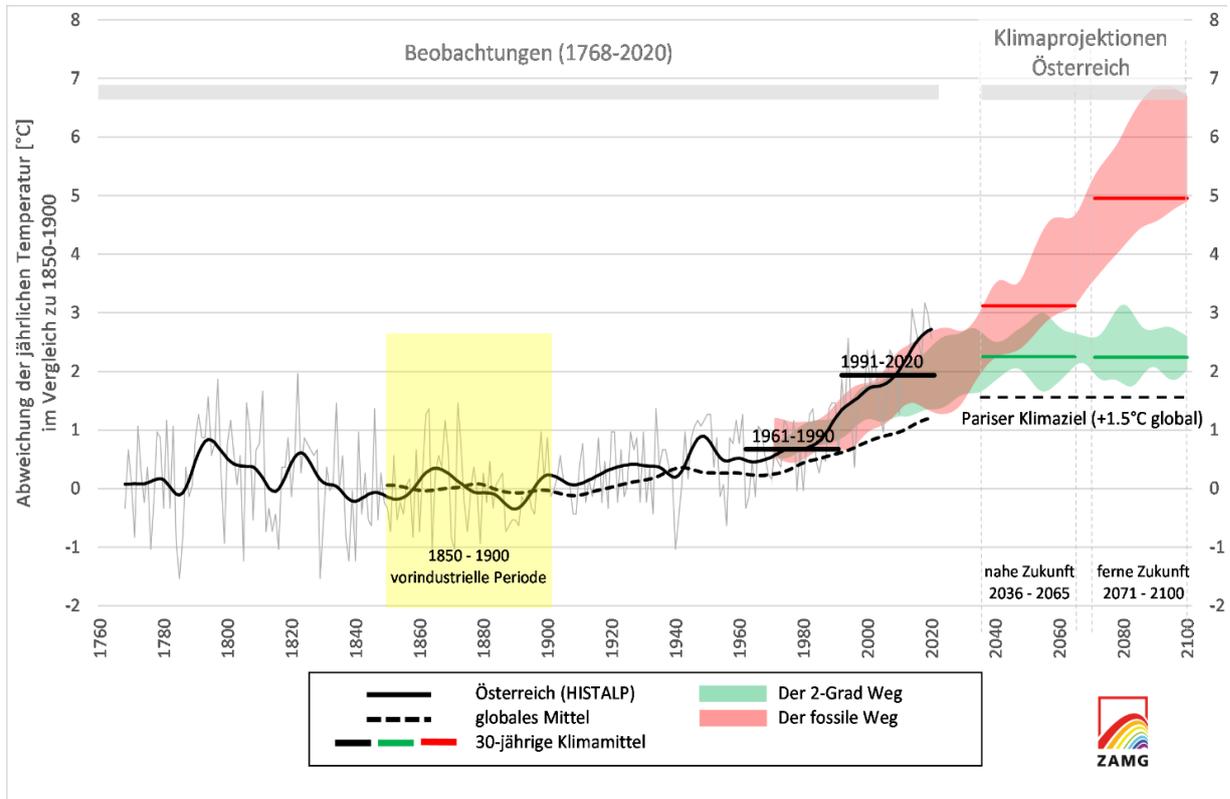


Abbildung 37 - Vergangene Entwicklung der Jahresmitteltemperatur im Vergleich zur Referenzperiode (1850-1900) und mögliche Entwicklungen in der Zukunft. (Credits: ZAMG/ÖKS15/Morice et al. 2021)

Während die Oberflächentemperatur im globalen Durchschnitt von 1901 bis 2020 um rund 1 °C angestiegen ist, lässt sich für Österreich in diesem Zeitraum eine Erwärmung von rund 2 °C beobachten. Bei weiterhin weltweit ungebremstem Ausstoß von Treibhausgasen würde sich die jährliche Durchschnittstemperatur in Österreich bis 2100 um 5 °C erhöhen (vgl. Abbildung 37 rot markierte Fläche). Bei Einhaltung des Pariser Klimaziels würde sich die Erwärmung bis 2100 knapp über dem aktuellen Niveau einpendeln (vgl. Abbildung 37 grün markierte Flächen).

Global gesehen ist die Dekade von 2011 bis 2020 die wärmste seit 1861 und wie Abbildung 37 zeigt, ist auch hierzulande eine starke Beschleunigung des Temperaturanstiegs seit den achtziger Jahren festzustellen. In der untenstehenden Abbildung 38 wurden die Temperaturmittel der letzten 30 Jahre mit jenen der Klimaperiode von 1961-1990 verglichen. Klar ersichtlich ist, dass es in allen Regionen und Höhenlagen Österreichs wärmer wurde. Die Erwärmung belief sich dabei auf 1 bis 1,5 °C. Dies ist ein Trend, der sich Klimamodellen zufolge weiter fortsetzen wird.

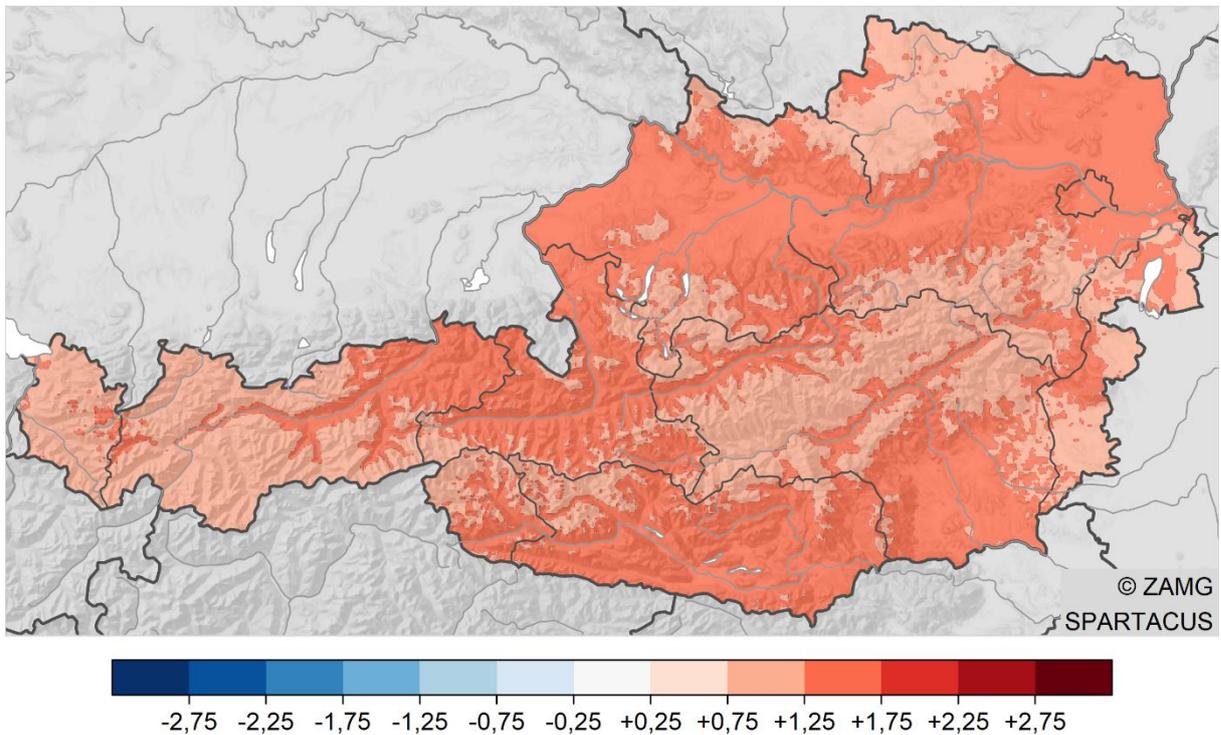


Abbildung 38 - Erwärmung der letzten 30 Jahre in Österreich: Vergleich der Klimaperiode 1991-2020 mit der Klimaperiode von 1961-1990 (Credits: ZAMG)

Eine weitere Folge der Erwärmung ist die Anzahl an Hitzetagen, also jenen Tagen an denen die Maximaltemperatur mindestens 30 °C überschreitet. In der Klimaperiode von 1961-1990 lag der Durchschnitt in den meisten Landeshauptstädten Österreichs bei 5 bis 11 Hitzetagen pro Jahr. Rekordjahre wiesen circa 20 Hitzetage pro Jahr auf. Solche Rekorde sind in den letzten 30 Jahren zur Normalität geworden. Zwischen 1991 und 2020 wurden in den Landeshauptstädten durchschnittlich etwa 16 bis 22 Hitzetage pro Jahr erreicht. In Rekordjahren wurden bereits über 40 Hitzetage festgestellt.

Bei weiterer, global ungebremster, Emission von Treibhausgasen könnten 40 Hitzetage pro Jahr bis zum Ende des Jahrhunderts in Österreich zur Normalität werden und in Rekordjahren könnte die Anzahl an Hitzetagen in einem derzeit noch völlig unvorstellbaren Bereich von 60 bis 80 Tagen mit einer Maximaltemperatur über 30 °C liegen. Diese extremen Hitzewellen stellen für den menschlichen Körper ein ernstzunehmendes Gesundheitsrisiko dar, zumal das Kreislaufsystem unseres Körpers durch enorme Hitzewellen stark beansprucht wird und es dadurch vermehrt zu Kreislaufversagen kommen kann. Laut zahlreichen Studien sterben in Europa mehr Leute an den Folgen von Hitzewellen als durch andere Wetterextreme wie Stürme oder Hochwasser. Durch Umsetzung der Pariser Klimaziele könnten diese Zahlen deutlich vermindert werden [26].

In Abbildung 39 ist die zu erwartende Änderung der Hitzetage pro Jahr, in Bezug auf den Vergleichszeitraum 1991-2020, für den Zeitraum von 2036-2065 dargestellt.

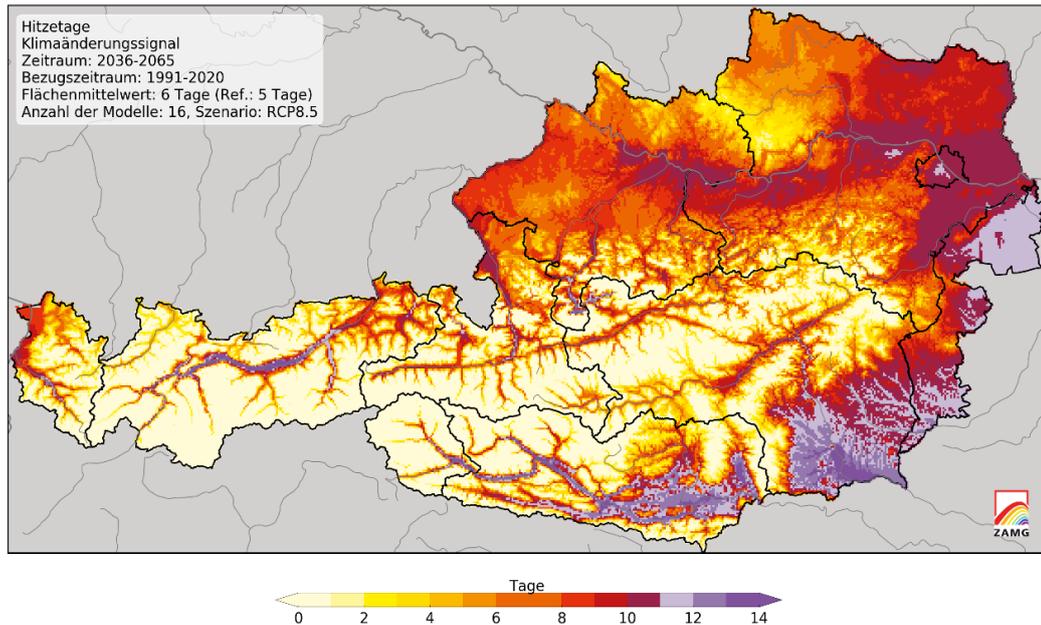


Abbildung 39 - Darstellung der für den Zeitraum von 2036-2065 zu erwartenden, absoluten Änderung der Zahl der Tage mit einer Temperatur von mindestens 30 °C in Bezug auf das aktuelle Niveau (Zeitraum von 1991-2020). Szenario RCP 8,5 (Credits: ZAMG/ÖKS15)

Die Temperatur in alpinen Gebieten ist generell niedriger als in tieferen Lagen. Deshalb kommt es hier folglich auch zu deutlich weniger Hitzetagen [26].

Bezüglich des Niederschlags ergibt sich ein regional deutlich komplexeres Bild. Aktuelle Messungen zur Folge schwankt die Magnitude des Niederschlags in den Sommermonaten von +15 bis -30%. In den Wintermonaten wird tendenziell mehr Niederschlag erwartet. Hier schwankt die Magnitude von -5 bis 30%. Die Entwicklung des Niederschlags ist jedoch sehr starken Schwankungen unterworfen, insbesondere spielen regionale Ausprägungen wie zum Beispiel die Alpen eine große Rolle [27].

Für Österreich ist zu erwarten, dass es trotz der Klimaerwärmung in den höheren Lagen, von 1500 bis 2000 m Seehöhe, kalt genug für Schneefall bleibt. In tieferen Lagen beeinflusst die Klimaerwärmung die Schneelage stärker, da der Niederschlag aufgrund der erhöhten Temperaturen vermehrt als Regen anstatt als Schnee fällt. Durch diesen Effekt steigt die Gefahr an Hochwassern und Überflutungen, wobei vermehrte Starkregeneignisse sich ebenfalls positiv auf solche Wetterextreme auswirken. In Abbildung 40 ist die prozentuale Änderung der Regentage mit bestimmten Regenmengen der letzten 30 Jahre im Vergleich mit der Referenzperiode 1961-1990 dargestellt.

Änderung der Zahl der Sommertage mit bestimmten Regenmengen (Vergleich 1961-1990 mit 1991-2020)

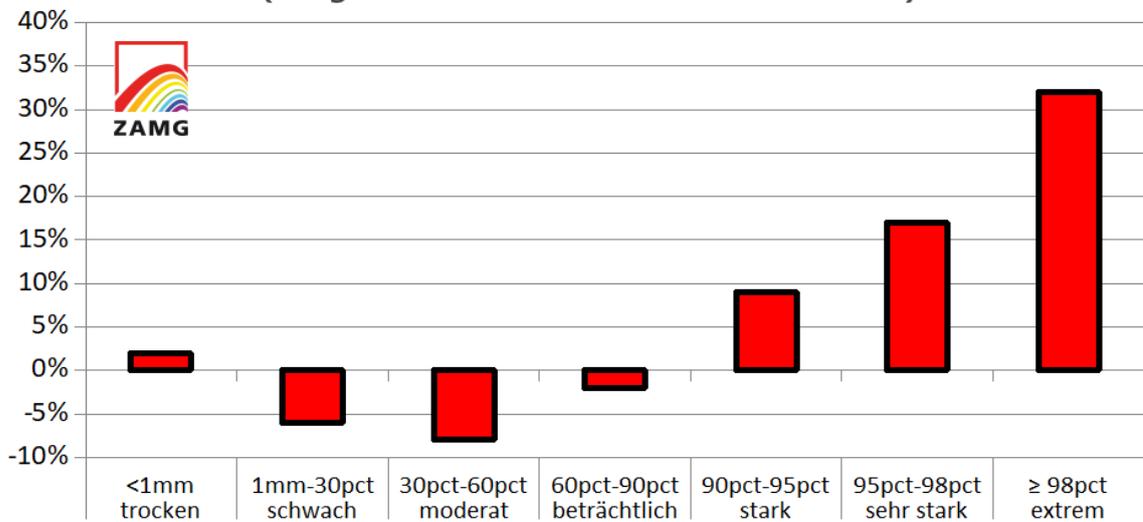


Abbildung 40 - Relative Änderung der Anzahl an Sommertagen mit bestimmten Regenmengen (Credits: ZAMG)

Wie bereits erwähnt sind die Tage mit extremen Regenfällen in Österreich in den letzten 30 Jahren stärker geworden. Außerdem ist in Abbildung 40 zu erkennen, dass die Zahl der Tage mit wenig Regen leicht abgenommen hat [26].

Eine weitere Auswirkung der Klimaerwärmung in Österreich ist das Schmelzen der Gletscher. Durchschnittlich verlieren Österreichs Gletscher jährlich rund einen Meter an Eisdicke. Bei Österreichs größtem Gletscher, der Pasterze, wirkt sich die Klimaerwärmung noch stärker aus. Im unteren Bereich der Pasterze wurde ein Verlust an 5 Metern Eisdicke pro Jahr gemessen. In Abbildung 41 ist die Entwicklung des Eises auf der Pasterze dargestellt.



Abbildung 41 - Vergleichsbild der Pasterze aus den Jahren 2006 und 2020 (Quelle: Alpenverein Deutschlandsberg)

Auch die Anzahl an Unwettern ist in den letzten 30 Jahren um 20 % gestiegen. Dies lässt sich einfach erklären: Durch die erhöhte Temperatur gelangt durch Evaporation (Verdunstung) mehr Feuchte in die Luft. Wenn dieses feuchte Luftpaket nun wärmer ist als die Umgebungsluft, so steigt dieses auf. Durch den Aufstieg kühlt das Luftpaket ab und die Sättigung an Wasserdampf in der Luft steigt. Wenn die Sättigung der Luft nun erreicht ist, kondensiert der Wasserdampf und es kommt zur Wolkenbildung.

Betrachtet man die komplexen Wechselwirkungen der verschiedenen Sphären der Erde, lässt sich ableiten, dass durch den Klimawandel bedingte Veränderungen in der Atmosphäre und der Hydrosphäre vielfältige Auswirkungen auf die Ökosysteme in Österreich haben werden.

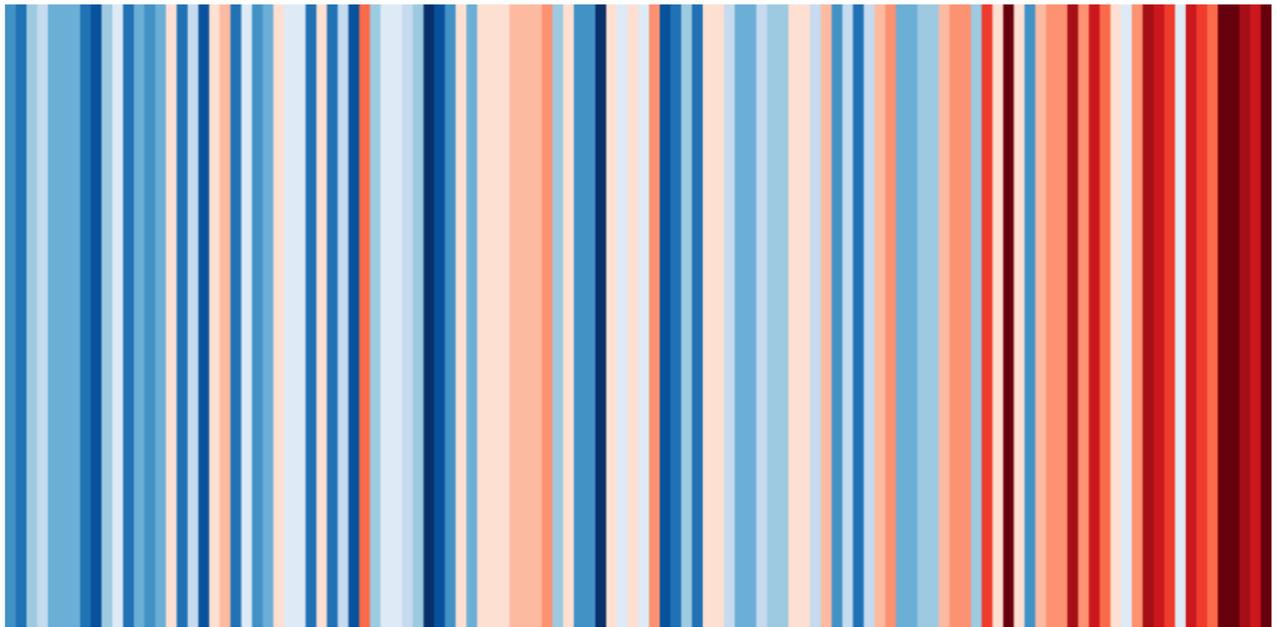


Abbildung 42 - Abweichung der jährlichen Temperatur vom Durchschnittswert in Österreich von 1901 bis 2018. Je dunkler die Farben sind, desto größer ist die Abweichung. Rot steht hier für eine Abweichung, die über dem Durchschnitt liegt, blau steht für eine Abweichung unter dem Durchschnitt (Credits: <https://showyourstripes.info/s/europe/austria/all> aufgerufen am: 10.02.2022).

Man kann beispielsweise davon ausgehen, dass die Niederschlagssumme in den Sommermonaten abnimmt und sich die Hitzeperioden verlängern, dadurch trocknen die Böden im Sommer aus und verhärten, die Wasserspeicherkapazität nimmt ab. In den Wintermonaten, in denen in Zukunft die Niederschläge leicht zunehmen, können die Böden weniger Wasser in die grundwasserführenden Schichten ableiten, es kommt zu einer Vernässung und damit Verdichtung der Böden. Durch das veränderte Bodengefüge wandeln sich deren Eigenschaften als Filter, Lebensraum und landwirtschaftliche Nutzfläche. Beispielsweise können sie nun weniger Nährstoffe speichern oder weniger Schadstoffe herausfiltern, wodurch die Bodenfruchtbarkeit negativ beeinflusst wird. Dies wird Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft haben, beispielsweise auf Erträge, verwendbare Saatgutsorten oder den Einsatz von Düngemitteln. Auch die natürliche Vegetation wird sich auf die sich wandelnden Bodeneigenschaften einstellen, was zu Veränderungen in Flora und Fauna der Ökosysteme führt.

Abbildung 43 zeigt eine überblicksartige Darstellung der verschiedenen Wechselwirkungen zwischen den Sphären und verdeutlicht, welche weitreichenden Auswirkungen eine durch den Klimawandel verstärkte Veränderung der Atmosphäre und der Hydrosphäre haben können.

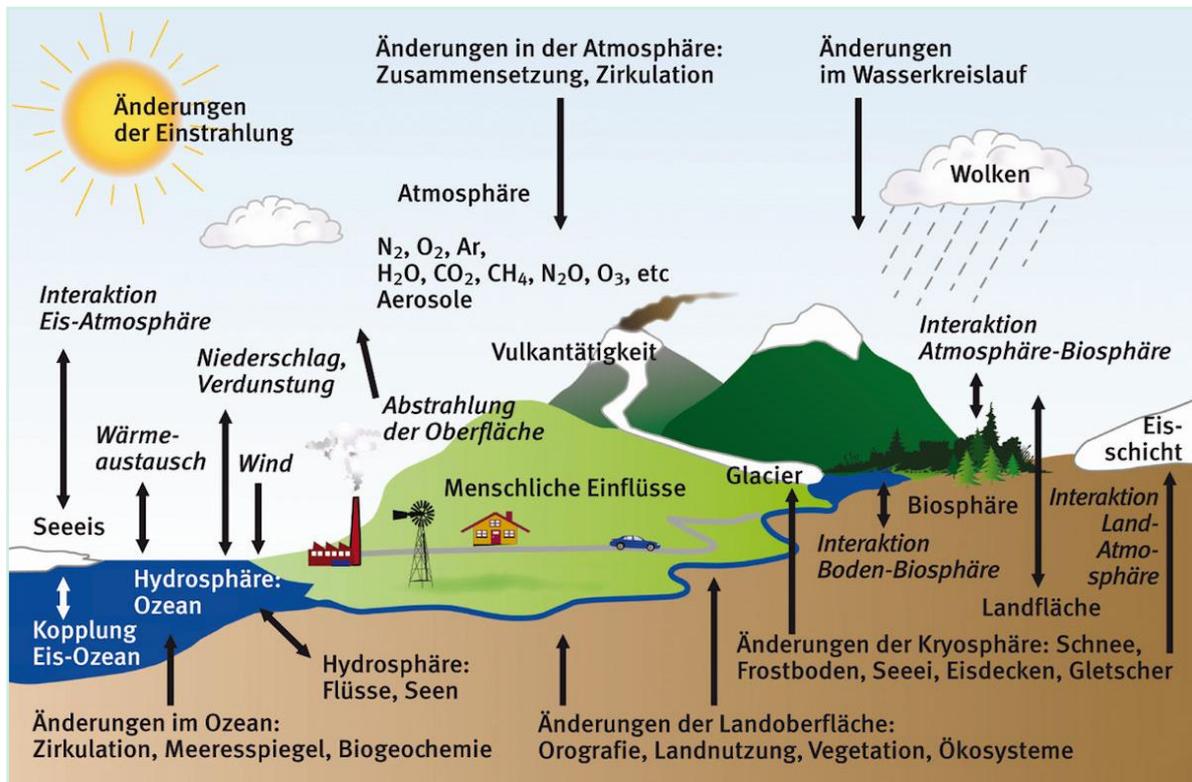


Abbildung 43 – Komponenten des Klimasystems und ihre Wechselwirkungen. (Credits: <http://www.oekosystem-erde.de/html/klima-02.html> aufgerufen am 19.01.2019)

Diese Auswirkungen manifestieren sich etwa in einem sinkendem Wasserpegel der Flüsse und einer damit verbundenen Erwärmung der Gewässer. Die zu erwartende Temperaturerhöhung wirkt sich stark auf die Wasserqualität aus. Weiters kommt es zu einem Anstieg des Meeresspiegels. Regionen, welche nur knapp über dem derzeitigen Meeresspiegel liegen, oder gar etwas darunter (Amsterdam liegt etwa 2 m unter dem Meeresspiegel), stehen deshalb in den nächsten Jahren und Jahrzehnten vor existenziellen Herausforderungen und Problemen. In den Alpen werden Permafrostböden¹⁷ auftauen und es kommt zu veränderten Formen der Landnutzung mit entsprechenden Rückkopplungseffekten auf die Ökosysteme und die Biodiversität.

Zusammen mit den geschilderten Wetterextremen, wie Hitzeperioden, Starkregenereignissen und Stürmen, deren Auftretenswahrscheinlichkeit weiter zunimmt, ergeben sich zahlreiche Folgen für Mensch und Natur.

Unter anderem die Wasserwirtschaft, der Küsten- und Meeresschutz, die Tourismusbranche, die Raum- und Regionalplanung, das Bauwesen, die Energiewirtschaft, Land- und Forstwirtschaft wie auch Industrie und Gewerbe werden sich den neuen Herausforderungen stellen müssen.

¹⁷ Unter Permafrostböden (auch Dauerfrostböden) versteht man Böden, welche über das ganze Jahr hinweg eine Temperatur unter 0°C aufweisen. Ihre Definition hängt also nur von der Temperatur und nicht vom Eisgehalt ab. Solche gefrorenen Böden sind vor allem in hohen Breiten (Arktis und Antarktis) aber auch in Hochgebirgen zu finden. Durch das Auftauen der Böden verlieren Gebirgshänge ihre Stabilität was zu Berg- und Felsstürzen führen kann.

5.4. Regionale Auswirkungen des Klimawandels in Österreich

Österreich spürt bereits jetzt die Auswirkungen des Klimawandels in aller Deutlichkeit. Wie in den vorherigen Kapiteln zu sehen war, können wir die Folgen der letzten Jahrzehnte bereits deutlich messen und auch mit freiem Auge, wie etwa am Beispiel der Pasterze, erkennen. Im Vergleich der Klimaperioden 1961 bis 1990 mit den letzten 30 Jahren lässt sich eine Erwärmung in Teilen Österreichs von etwa 1,5°C beobachten. Es fällt allerdings auf, dass die Erwärmung zwischen verschiedenen Gebieten Österreichs lokalen Schwankungen unterlegen ist.

Aus Abbildung 39 kann man entnehmen, dass die Hitzetage in der südöstlichen Steiermark am stärksten zunehmen werden. Deshalb lohnt es sich, dieses Gebiet etwas genauer unter die Lupe zu nehmen.

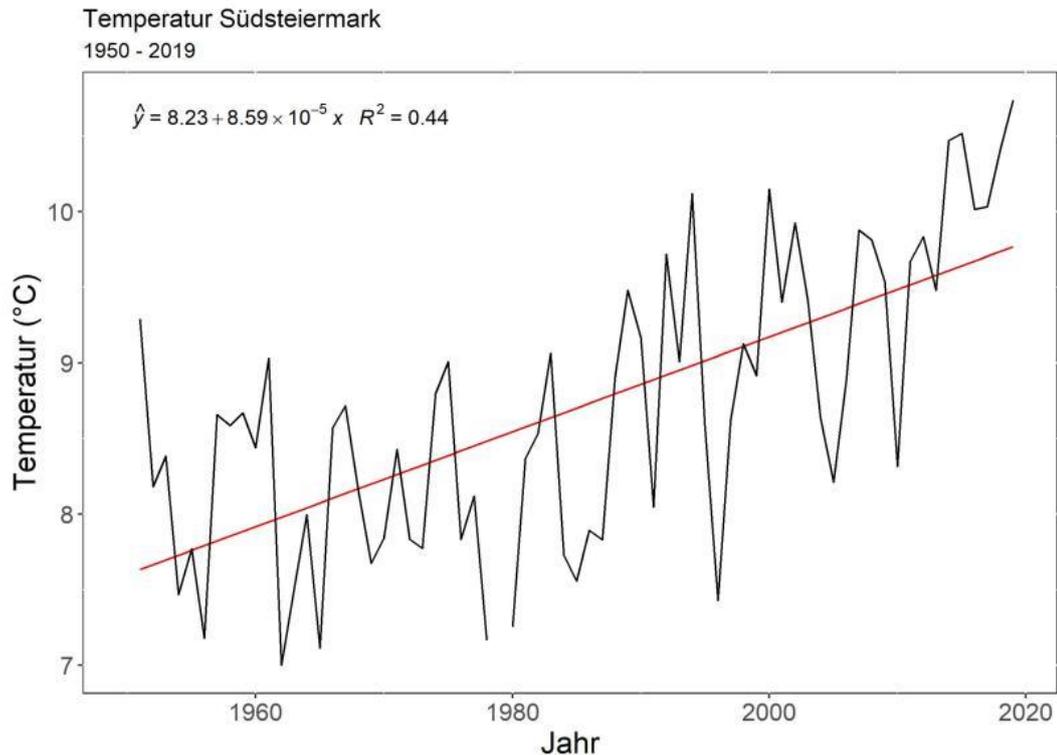


Abbildung 44 - Jährliche Durchschnittstemperatur in der Südsteiermark (Credits: Brunner, Daten: Indecis.eu)

Es zeigt sich bei Betrachtung der vergangenen 70 Jahren ein klarer Trend, der durch die Regressionsgerade deutlich sichtbar wird. Die Temperaturzunahme in diesem Zeitraum liegt knapp unter 2 °C. Zudem fällt auf, dass die Temperatur bis etwa 1990, abgesehen von einigen Schwankungen, etwa konstant blieb, ehe sich ab diesem Zeitpunkt ein klarer Anstieg bemerkbar macht. Zudem liegen die vergangenen 5 Jahre allesamt über der Durchschnittstemperatur der letzten 70 Jahre.

Die Temperaturerhöhung ist im Laufe eines Jahres starken saisonalen Schwankungen unterlegen. So gibt es Monate, wie etwa den August 2018, in denen die Durchschnittstemperatur weit über dem langjährigen Mittel dieses Monats liegt. Deutlich erkennbar ist jedoch, dass die Temperatur in ganz Österreich in jedem Monat gegenüber den Monatsmitteln der Periode von 1961 bis 1990 gestiegen ist. In Teilen Ober- und Niederösterreichs betrug die Temperaturabweichung teilweise über 4,5 °C. Die Häufigkeit solcher extremen Monate nahm in den letzten Jahren rapide zu.

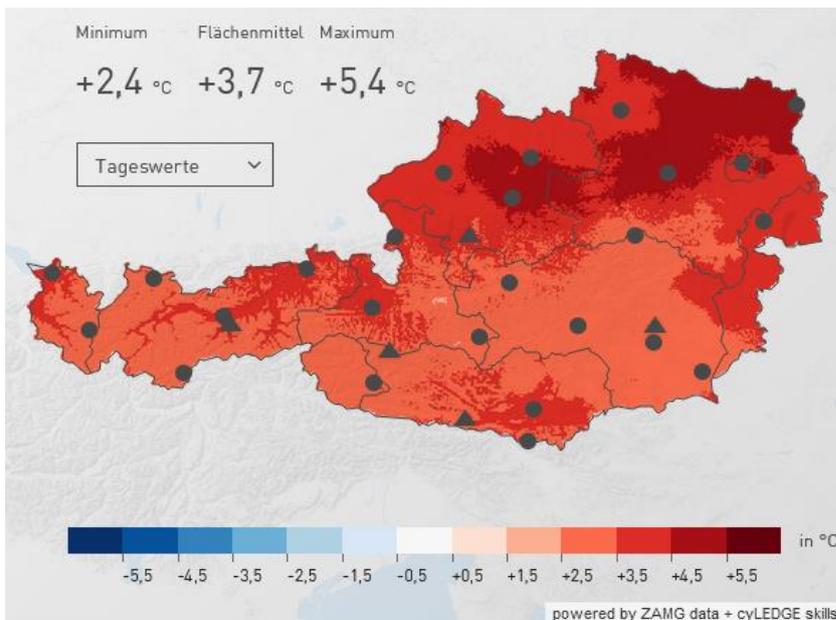


Abbildung 45 - Abweichung der monatlichen Durchschnittstemperatur im August 2018 vom Zeitraum 1961 bis 1990

als im Referenzzeitraum 1961 bis 1990. Die Folge waren Ernteeinbußen im Ausmaß von etwa 12%. Dieser Verlust entspricht einer Menge von etwa 400.000 Tonnen Getreide im Vergleich zum Durchschnitt der vorherigen 5 Jahre. Ein Jahr zuvor, also 2017, konnte im Vergleich zum Rekorderntejahr 2016 sogar 22 % (ca. 800.000t Getreide) weniger geerntet werden [28].

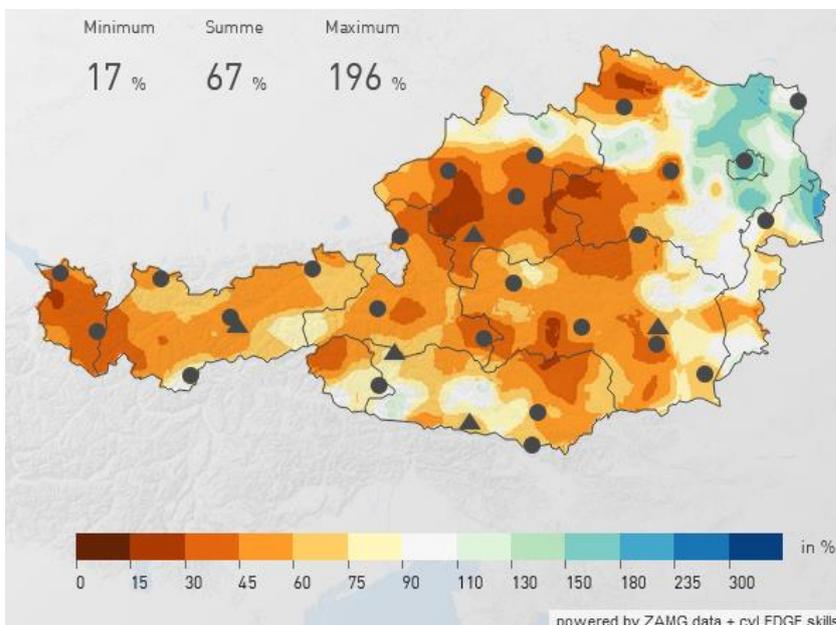


Abbildung 46 - Abweichung der Niederschlagsmenge im Juli 2018 vom Zeitraum 1961 bis 1990 (Credits: ZAMG, Klimamonitoring)

Von den Folgen des Klimawandels sind in Österreich alle landschaftsprägenden Ökosysteme, wie Hoch- und Mittelgebirge, Wälder, Graslandschaften, Feuchtgebiete und Seen bereits betroffen. Zudem beeinflussen diese Entwicklungen auch das Leben der Menschen in Österreich. Durch die zunehmende Anzahl an Hitzewellen ergeben sich insbesondere für die Wasser-, Land- und Forstwirtschaft gravierende Auswirkungen. So fiel etwa im Juli 2018 etwa ein Drittel weniger Niederschlag

Da sich der Klimawandel zunehmend auf die Niederschlagsverteilung- und mengen auswirkt, hat sich die Gefahr von Hochwassern aber auch von Trockenperioden verschärft. Im Sommer lässt dies zeitweise geringe Abflüsse und niedrige Wasserstände in Fließgewässern erwarten, von denen neben der Biosphäre auch die Wasser- und Energiewirtschaft stark betroffen ist.

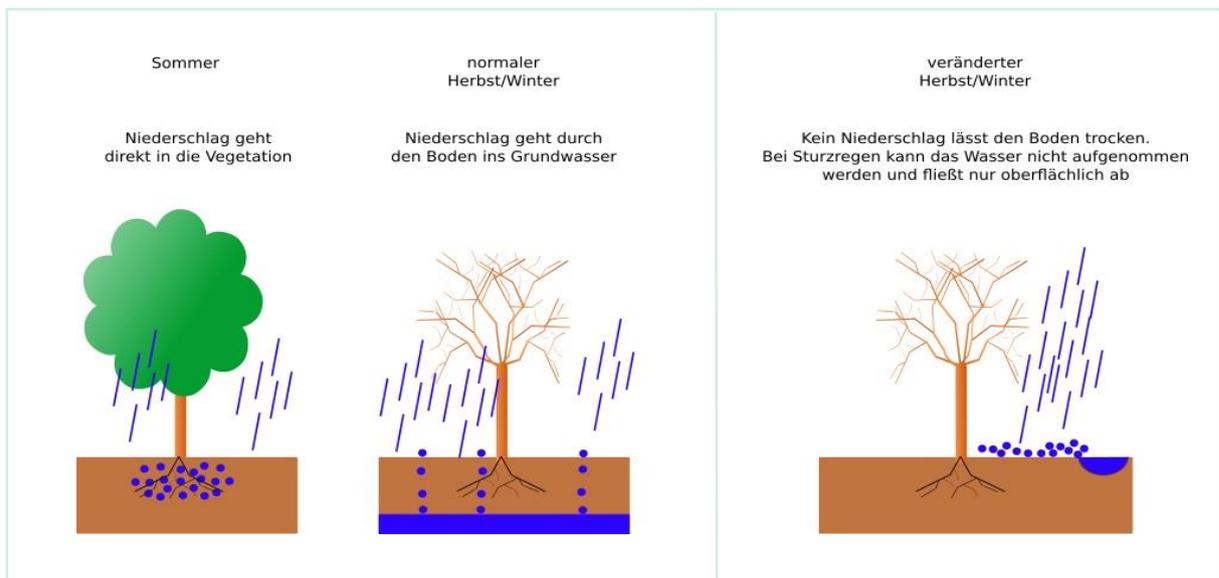


Abbildung 47 – Verminderung der Grundwasserneubildung durch erhärteten Boden (Credits: Lamparter)

In Verbindung mit den steigenden Temperaturen führt ein Rückgang der Niederschläge außerdem zu einer Verringerung der Grundwasserneubildung. Regnet es im Sommer wenig, trocknet der Boden aus und kann im Winter den Starkregen nicht aufnehmen, sodass dieser oberflächlich abfließt, was heftige Überschwemmungen verursachen kann (siehe Abbildung 47). Dadurch kommt es verstärkt zur Boden-erosion, während gleichzeitig die Grundwasserreserven nur vermindert aufgefüllt werden.

Diese Problematik wird noch dadurch verstärkt, dass auf Grund der höheren Temperaturen weniger Niederschlag in Form von Schnee fällt oder eine dünne Neuschneedecke schneller wieder abschmilzt. Dadurch wird im Winterhalbjahr weniger Wasser gespeichert, wodurch wichtige Wasserreserven fehlen, um die sommerliche Trockenheit auszugleichen. Abbildung 48 zeigt den Anteil von Schnee am Gesamtniederschlag in der Südsteiermark. Hier ist in den letzten Jahren ein klar fallender Trend erkennbar.

Diese Folgen sind bereits heute in Mitteleuropa spürbar. In Österreich machen sich vor allem im Osten die Konsequenzen von längeren Dürreperioden bemerkbar. Aufgrund von zu trockenen Böden und Starkregenereignissen kommt es in der Landwirtschaft immer wieder zu Ernteausfällen. Aufgrund der höheren Temperaturen benötigen Pflanzen im Sommer mehr Wasser, weshalb die Bedeutung von Bewässerung immer mehr zum Thema wird. Neben den Pflanzen sind aber auch die Tierwelt und vor allem unsere Trinkwasserspeicher von extremer Trockenheit gefährdet.

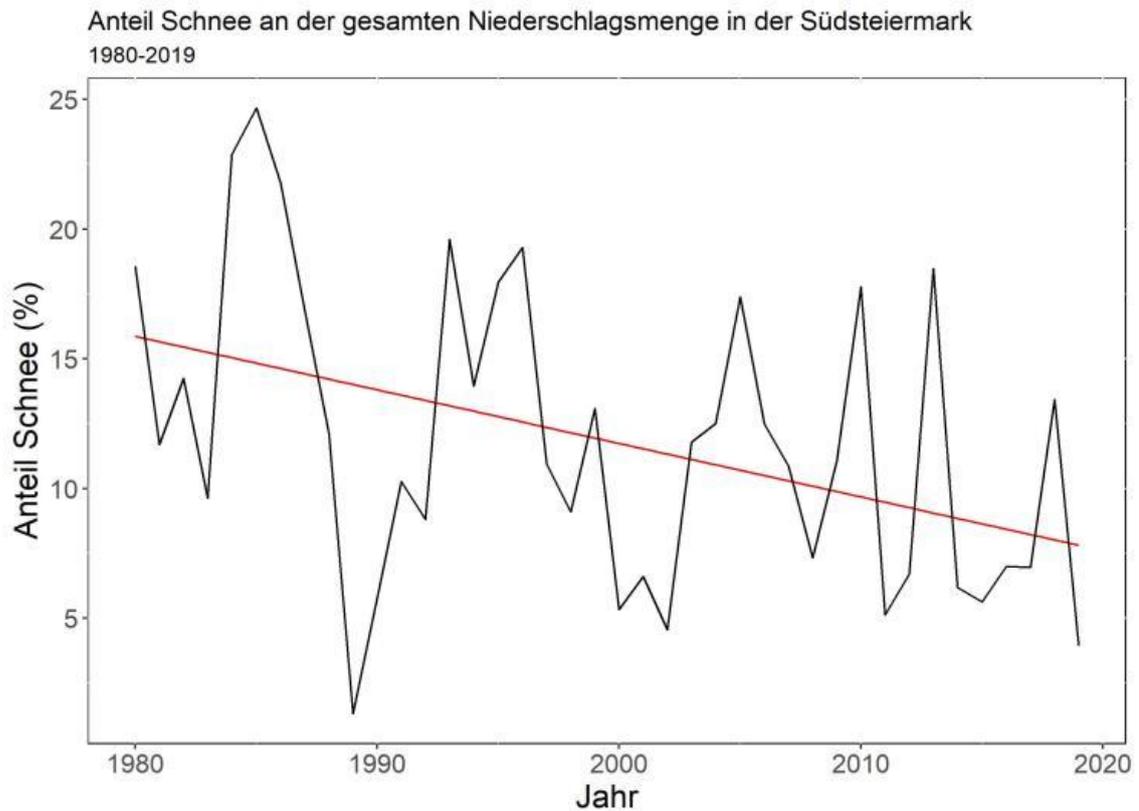


Abbildung 48 - Entwicklung des Schneeanteils in den Jahren 1980 bis 2019. (Credits: Schmölzer, Daten: Indecis.eu)

Aufgrund des Klimawandels könnten die verfügbaren österreichischen Grundwasserressourcen bis 2050 um bis zu 23% geringer werden. Dies würde einer Verminderung von derzeit 5,1 Mrd. m³ auf 3,9 Mrd. m³ entsprechen. Der Wasserbedarf hingegen wird zunehmen. Die Landwirtschaft beispielsweise wird bis zum Jahr 2050 etwa doppelt so viel Wasser zur Bewässerung von Feldern benötigen. Im Industriesektor, welcher mit Abstand am meisten Wasser (ca. 2,2 Mrd. m³ davon 330 Mio. m³ aus dem Grundwasser) benötigt, gehen Experten in Zukunft von einem konstanten Wasserbedarf aus. Doch selbst in einem pessimistischen Szenario, indem es bis 2050 lokal zu Wasserknappheit kommen kann, ist die Grundversorgung in Österreich aufgrund des enormen Wasserreichtums weiterhin gedeckt [29].

Nichtsdestotrotz werden sich Sommertrockenheit und Extremereignisse, wie etwa Starkniederschläge, Hagel oder Stürme weiterhin verstärken und so den Böden und in weiterer Folge der Landwirtschaft, stark zusetzen.



Abbildung 49 – Ausgetrockneter Boden und verdorrte Trauben an einem Weinstock in Bayern (Credits: Alana Steinbauer)

Exkurs: Wald und Klima

„Zu fällen einen schönen Baum, braucht's eine halbe Stunde kaum. Zu wachsen, bis man ihn bewundert, braucht er, bedenkt es, ein Jahrhundert!“ – Zitat Eugen Roth

Dem Wald wird seit jeher eine große Bedeutung für den Menschen zugeschrieben; sei es als Rohstofflieferant, Naherholungsgebiet, Rückzugsort, Lebensgrundlage oder Objekt der Fantasie. Seit dem großen Waldsterben in den 1980ern rückte dieser Fakt zum ersten Mal ins kollektive Bewusstsein. Damals konnte, durch vereinte Kräfte und Entschlossenheit, diesem Phänomen Einhalt geboten werden. Die Herausforderungen vor denen der Wald heutzutage steht sind um ein Vielfaches komplexer und bedürfen einer Strategie, die sich über ökologische, politische und nicht zuletzt auch ökonomische Aspekte erstreckt.

In Kalksteinen befinden sich etwa 99,95 % des Kohlenstoffs auf der Erde. Von den restlichen 0,05% befinden sich wiederum über dreiviertel in den Ozeanen. Das übrige Viertel teilt sich auf fossile Lagerstätten von Erdgas, Erdöl oder Kohle (20 %), dem Humusgehalt der Böden, einschließlich Torf, sowie Biomasse in Wäldern oder Ozeanen (4 %) und der Atmosphäre (hauptsächlich in Form von CO_2 ; 1,6%) auf [30].

Diese Aufstellung zeigt, dass auch vergleichsweise kleine Mengen Kohlenstoff gravierende Auswirkungen auf das Klimasystem unserer Erde haben können. Dass diese Kohlenstoffsinken in ständigem Austausch stehen, lässt sich am Beispiel Wald recht einfach erklären:

Pflanzen bauen Biomasse auf, in dem sie durch Photosynthese aus Wasser und CO_2 Biomoleküle erzeugen, die sich dann in unterschiedlichen Strukturen einbauen und einlagern. Ist der Lebenszyklus der Pflanze beendet, werden die Biomoleküle zersetzt. Geschieht dies vollständig, so wird am Ende wieder die gleiche Menge CO_2 an die Luft abgegeben, wie bei deren Aufbau entzogen wurde. Ist der Abbau unvollständig, so kann sich Kohlenstoff im Boden anreichern und in der Atmosphäre liegt um diesen Anteil weniger vor. Über diesen Wirkmechanismus kann der Atmosphäre netto Kohlenstoff entzogen werden. Weiters geben Pflanzen durch Evapotranspiration auch einen höheren Anteil an Wasserdampf an die Atmosphäre ab, als dies bei einer unbepflanzten Bodenfläche der Fall wäre. Dies führt in weiterer Folge zu mehr Wolkenbildung, was wiederum entscheidend das Klimasystem beeinflusst.

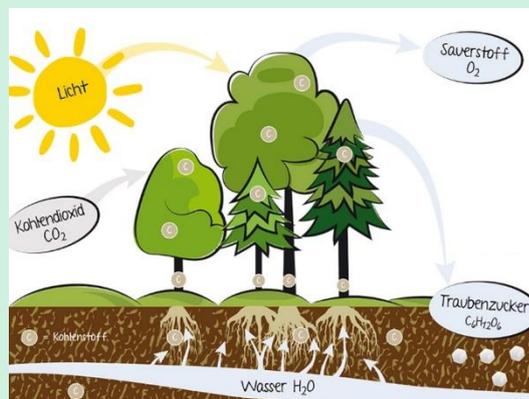


Abbildung 50 - Vereinfachte Darstellung der Kohlenstofffixierung eines Waldes durch Pflanzen sowie im Boden (Credits: klimawandel.at.)

Kapitel 6

Handeln

6.1. Notwendigkeit zum Handeln

Auf der Pariser Klimakonferenz (COP21) haben sich die Staaten darauf verständigt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C, möglichst auf 1,5 °C, zu begrenzen. Nur so können wir mit passabler Wahrscheinlichkeit noch vermeiden, dass die Kaskade der Kippelemente ausgelöst wird (siehe Abschnitt 4.3) und weite Teile die Erde langfristig für uns unbewohnbar werden. Um diese Obergrenze einzuhalten, muss die Emission der Treibhausgase möglichst ab sofort reduziert werden, denn je später der Um-schwung startet, desto weniger Zeit bleibt (siehe Abbildung 51).

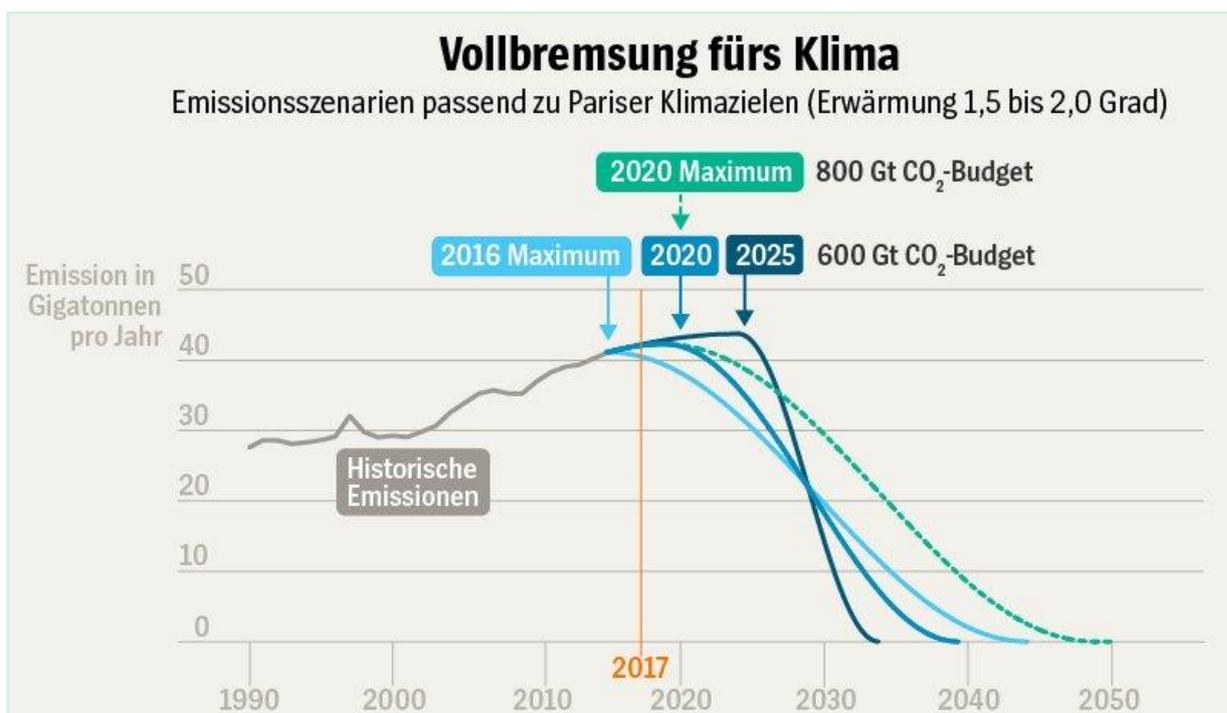


Abbildung 51 – Emissionsszenarien zur Erreichung der Pariser Klimaziele. Die Abbildung hat als Voraussetzung, dass die Gesamtmenge des noch zu emittierenden CO₂ durch Nutzung fossiler Brennstoffe auf eine festgelegte Menge begrenzt wird. Deshalb läuft man in die 'Integral-falle', wenn man nicht rechtzeitig anfängt. Da man vom zur Verfügung stehenden CO₂-Kontingent leichtfertig schon viel verbraucht hat, muss man sich in der Zukunft umso mehr anstrengen um nicht auf den Pfad 'hothouse earth' zu gelangen.
(Quelle: Spiegel Online; The Global Carbon Project, Nature, Rahmstorf)

Im Jahr 2020 ist die Restmenge des Kohlenstoffbudgets, zur Erreichung des 1,5 Grad Ziels, bereits auf 420 Milliarden Tonnen geschrumpft. Würde man alle bekannten fossilen Energievorräte an Erdgas, Erdöl und Kohle nutzen, würden hierbei etwa 5400 Milliarden Tonnen CO₂ freigesetzt. Ziel muss es also sein, diese Rohstoffe unter der Erde zu belassen und unsere Energieversorgung auf erneuerbare Energien umzustellen!

Fest steht, dass die Weltgemeinschaft in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts treibhausgasneutral werden muss, wenn dieses Ziel erreicht werden soll. Der weltweite Verbrauch von Kohle, Erdgas und Öl

nimmt aber, trotz der Klimaschutzbemühungen einiger Länder, weiter zu. Vor allem wirtschaftliche Interessen und eine fehlende Bepreisung klimaschädlicher Emissionen¹⁸ verhindern in vielen Fällen die Umsetzung des Klimaabkommens.

Aktivität 1.1

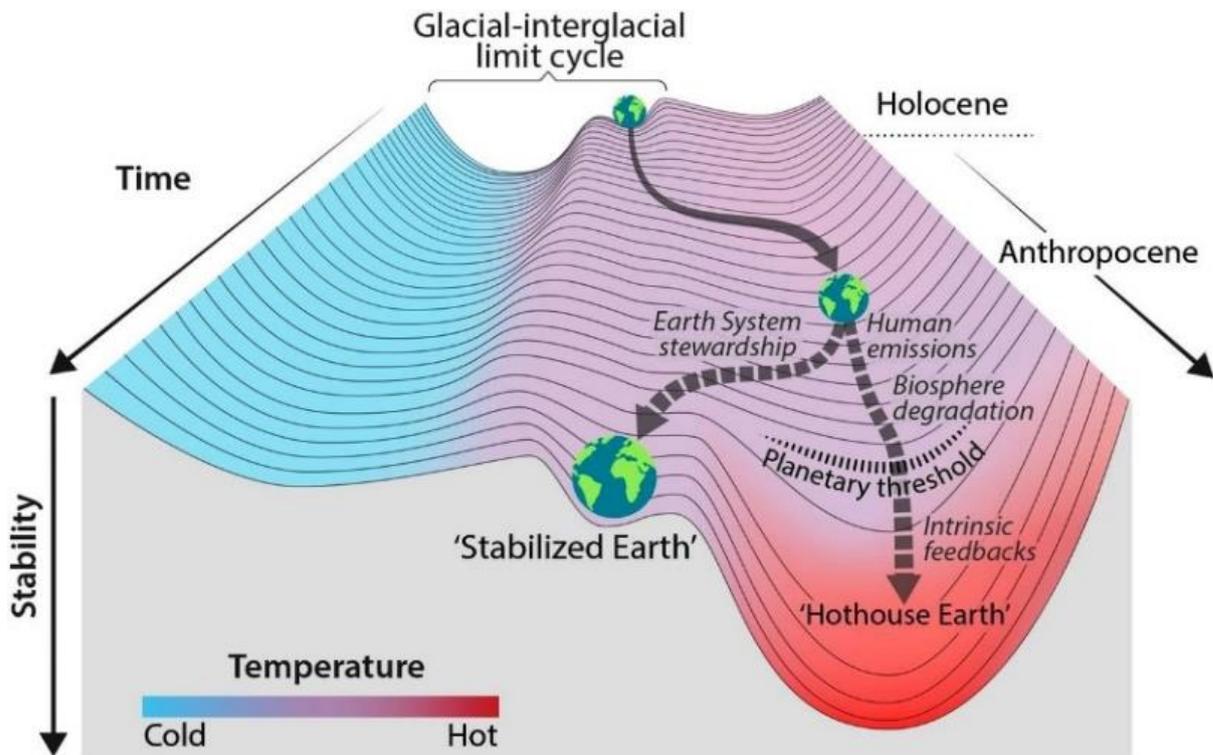


Abbildung 52 – Trajektorien des Erdsystems im Anthropozän. Durch die Auswirkung der Menschen befindet sich die Erde in einem gefährlichen Kipppunkt (Credits: Steffen et al.)

Wenn wir also diese Beschlüsse ernst nehmen, bleibt uns sehr wenig Zeit, um das Klima der Erde zu stabilisieren und die Aktivierung von Kipppunkten zu verhindern, ab denen die klimatischen Verhältnisse auf der Erde durch Rückkopplungseffekte ins Unkontrollierbare abdriften würden.

Dies bestätigten Klimawissenschaftler um Hans Joachim Schellnhuber und Will Steffen in einer Studie aus dem Jahr 2018 [31] (s. Abbildung 52): Während der letzten ca. 1,2 Mio. Jahre der Erdgeschichte wechselten sich relativ kalte und warme Phasen in einem Zyklus von ca. 100.000 Jahren ab (Glacial-interglacial limit cycle). Aktuell befindet sich die Erde auf dem Weg in eine diabolische Heizeit („Hothouse Earth“), verursacht u.a. durch die Treibhausgasemissionen der Menschen sowie die Zerstörung von Biosphäre (z.B. Abholzung von Wäldern). Übertritt die Erde auf diesem Pfad die planetare Belastungsgrenze bei ca. zwei Grad, ist der Pfad aufgrund von Rückkopplungsprozessen (s. Abschnitt 4.2) nicht mehr zu ändern. Der Weg hin zu einer Erde auf einem stabilen Pfad erfordert aber eine fundamentale Änderung der Rolle der Menschen auf dem Planeten - eine entschlossene und schnell umgesetzte Minderung der Emission von Treibhausgasen reicht hierzu aber nicht aus. Auch ein verbessertes Wald-, Landwirtschafts- und Bodenmanagement, um Kohlenstoff einzulagern, die Erhaltung der biologischen Vielfalt sowie Technologien, um der Atmosphäre Kohlenstoffdioxid zu entziehen und unterirdisch zu speichern können eine wichtige Rolle spielen [31].

¹⁸ Das Umweltbundesamt hat die Klimaschadenskosten berechnet. Für 2016 ergibt sich ein Wert von 180 €/tCO₂-Äquivalenten. Im Jahr 2030 sind es 205 €/tCO₂-Äquivalente [55].

6.2. Die Energiewende

Um das Ziel des Pariser Klimaabkommens zu erreichen, dürfen 2020 weltweit nicht mehr als ca. 420 Gigatonnen CO₂ zusätzlich in die Atmosphäre gelangen [32]. Im Hinblick auf Österreich und das Ziel der Klimaneutralität bis 2040 ergibt sich ein Gesamtbudget von 700 Millionen Tonnen CO₂.

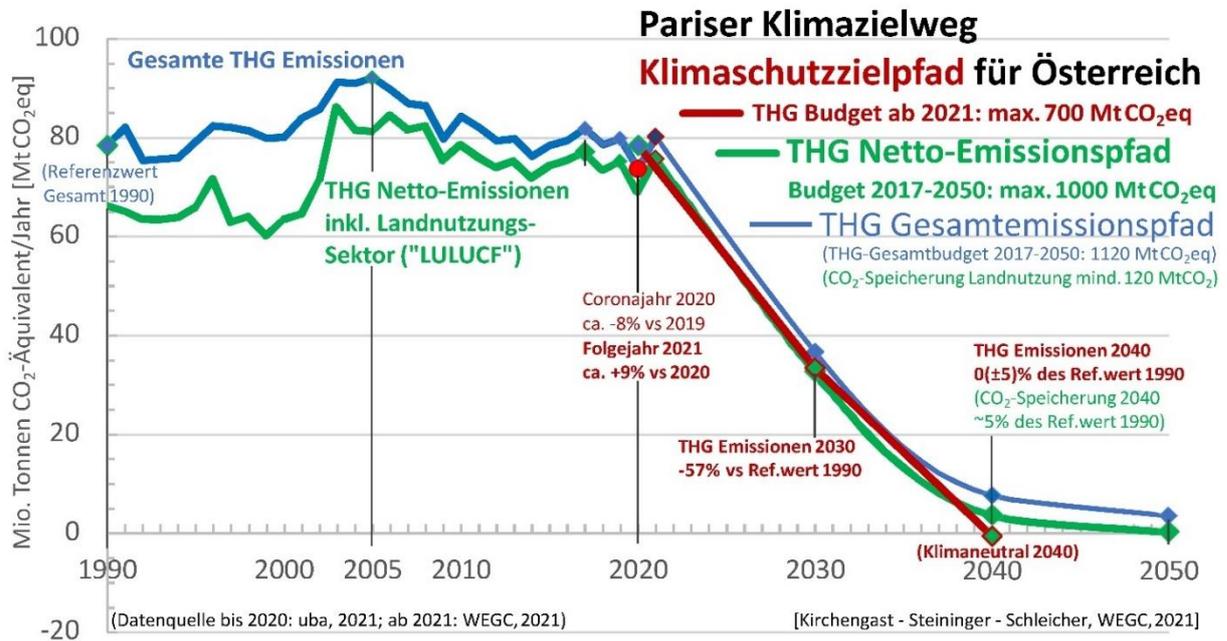


Abbildung 53 - Klimazielweg für Österreich; die grüne bzw. blaue Kurve zeigt den Reduktionspfad, um bis zum Jahr 2040 Klimaneutralität zu erzielen (Credits: Wegener Center [33])

In der obenstehenden Abbildung sind die gemessenen bzw. projizierten CO₂-Emissionen für den Zeitraum von 1990 bis 2050 dargestellt. Die Projektionen (blaue bzw. grüne Linie) sollen jene Emissionspfade darstellen, durch die eine Klimaneutralität bis 2040 erreichbar wäre (roter Zielpfad). Mit inbegriffen in den roten Klimaschutzzielpfad sind Teilziele, wie etwa die von der EU verordnete Reduktion an Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55 % gegenüber den Referenzjahr 1990. Um die Klimaneutralität bis 2040 zu erzielen, müsste im Bereich der fossilen Energie sowie im Industriesektor ein starke Emissionsreduktion von über 90 % gegenüber dem Wert von 1990 erreicht werden. Außerdem sollte sich die Politik stärker am Klimaschutzzielpfad orientieren und die verordneten Klimaschutzmaßnahmen konsequenter umsetzen [33].

Um in Zukunft auf Fossilenergie aus Erdgas, Erdöl und Kohle verzichten zu können, muss diese von alternativ erzeugten erneuerbaren Energien ersetzt werden. Bis zum Jahr 2030 müssten demnach folgende Teilziele erreicht werden (siehe Abbildung 53):

- Reduktion des aktuellen Bruttoinlandsverbrauchs von rund 400 TWh um 28%
- Steigerung des Anteils an erneuerbaren Energien am Bruttoinlandsverbrauch von rund 33% auf 50 % [34]
- Reduktion der Treibhausgasemissionen um 36% gegenüber dem Jahr 2005
- Steigerung der Energieeffizienz [35]
- Stromerzeugung sollte vollständig aus erneuerbaren Energien erfolgen

In der untenstehenden Abbildung 54 ist der zusätzlich benötigte Bedarf an erneuerbarer elektrischer Energie zur Deckung des gesamten Stromverbrauchs Österreichs dargestellt.

Vorschlag für eine potentialbasierte Aufteilung des zusätzlichen Erzeugungsbedarf - Nettozubau (exkl. Repowering) - an erneuerbarer Stromerzeugung bis 2030 auf die einzelnen Bundesländer

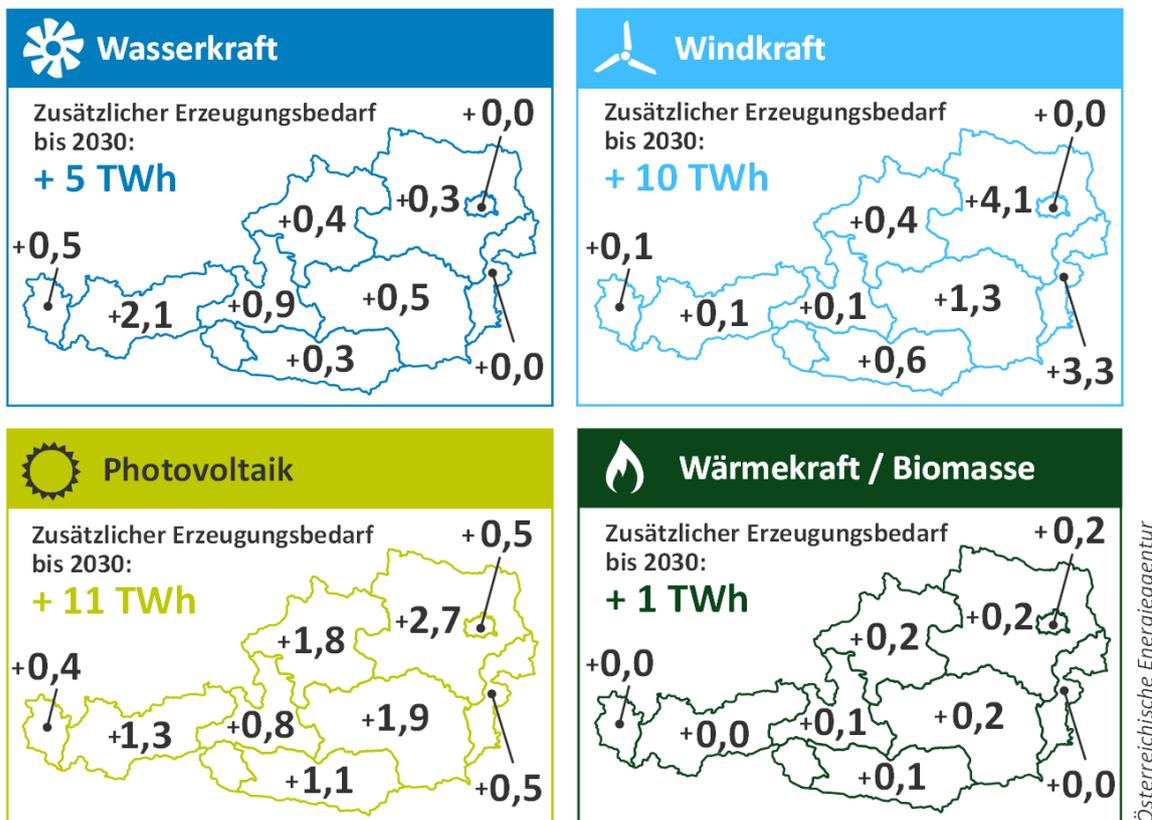


Abbildung 54 - Zusätzlicher Stromerzeugungsbedarf der einzelnen Bundesländer (Credits: Österreichische Energieagentur)

Die Steigerung der regenerativen Energieerzeugung wird hauptsächlich durch einen vermehrten Ausbau der etablierten Techniken in Windenergienutzung und Photovoltaik erreicht werden können. Ein Zuwachs von 10 TWh pro Jahr an Windkraft, 11 TWh pro Jahr an Photovoltaik und 5 TWh an Wasserkraft ist notwendig, um den Strombedarf zu 100 % aus erneuerbaren Energieträgern decken zu können. Neben der erneuerbaren elektrischen Energieerzeugung sollte auch der Verkehrs- und Gebäudesektor vermehrt auf erneuerbare Energieträger umstellen. Gesetzliche Regelungen müssen einen solchen Ausbau zügig unterstützen!

Die Versorgungssicherheit in Zeiten, wenn kein Wind weht und es dunkel ist, wird durch die großflächige Einführung von Batteriespeichern und Power-To-Gas/Liquid-Technologien sichergestellt.

Wenn der Ausstieg aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe bis 2040 gelingen soll, muss die Neuanschaffung bzw. -installation alter, auf fossilen Brennstoffen beruhenden Techniken unter der Berücksichtigung der zu erwartenden Nutzungsdauer schon zu einem frühen Zeitpunkt unterbleiben. Beispielsweise wäre es erforderlich Autos mit Verbrennungsmotoren, die eine Lebensdauer von etwa 15 Jahren haben, ab 2025 nicht mehr zuzulassen.

Wir wissen also was wir zu tun haben:

1. *Wir müssen unseren Energiebedarf deutlich senken und die eingesetzte Energie effizient nutzen!*
2. *Die von uns genutzte Energie darf nicht auf der Verbrennung fossiler Rohstoffe beruhen!*

Da das Thema Erneuerbare Energien und Energiewende, also der zukünftige Verzicht auf die Nutzung fossiler Energieträger, im Mittelpunkt beim Kampf gegen den Klimawandel steht, soll in naher Zukunft in einem gesonderten Handbuch mit begleitenden Schüleraktivitäten gezielt hierauf eingegangen werden. Tragen Sie sich auf unserer Website in den Verteiler ein und wir halten Sie auf dem Laufenden!

6.3. Sozialpsychologie und Klimaschutz

Beitrag von Gabriel Appl Scorza

Wir widmen uns nun den psychologischen Hürden, die laut verschiedenen psychologischen Studien die Menschen vom Handeln abhalten und diskutieren Möglichkeiten zur Überwindung dieser Hindernisse.

PSYCHOLOGISCHE HINDERNISSE

A. Psychologische Distanz

Die Ursachen und Folgen des Klimawandels scheinen für viele Menschen fern, fast ungreifbar zu sein. Diese sogenannte psychologische Distanz setzt sich aus verschiedenen Faktoren zusammen: der räumlichen, zeitlichen und sozialen Distanz, sowie dem Grad der Ungewissheit. Um der, im Fall des Klimawandels, großen psychologischen Distanz entgegenzuwirken ist es notwendig, **auf die lokalen Folgen des Klimawandels aufmerksam zu machen**: Diese Auswirkungen spüren wir *hier* und wir spüren sie *jetzt*.

Was tun? → Diskutieren Sie im Unterricht die unmittelbaren Auswirkungen auf das Leben der Schülerinnen und Schüler selbst, auf ihre Familie, ihr soziales Umfeld und ihre Umwelt. Da die Folgen des Klimawandels in Städten durch die Infrastruktur und die weniger vorhandene Natur oft unsichtbar bleiben, lohnt es sich beispielsweise einem Bauernhof oder Förster einen Besuch abzustatten und sie zu interviewen. In der Regel sind kleine Dörfer den Wetterextremen sehr viel stärker ausgesetzt, weshalb es auch möglich wäre, Recherchen über Überschwemmungen in Gemeinden der näheren Umgebung durchzuführen.

B. Klimaangst und wahrgenommene Selbstwirksamkeit

Die unmittelbaren Auswirkungen des Klimawandels (sind nicht angenehm und) können (gar) beängstigend wirken. In manchen Fällen kann große Angst paralisieren, vor allem wenn sie von dem Gefühl begleitet wird, nichts ändern zu können. Wenn die Schüler jedoch den *Eindruck haben, sie können durch ihr Verhalten etwas bewirken*, also *Selbstwirksamkeit* erfahren, dann können auch negative Emotionen durchaus handlungsfördernd wirken. Die Schülerinnen und Schüler müssen also verstehen, wie sie konkret handeln können und welche klimaschützenden Verhaltensweisen wirklich wirksam sind und welche eher weniger.

Was tun? → Erarbeiten Sie mit den Schülerinnen und Schülern verschiedene klimaschützende Handlungen und ordnet sie den Kategorien „effektiv“ und „begrenzt effektiv“ zu (s. hierzu Abschnitt 6.4).

C. Verantwortungsdiffusion

Eine weitere Hürde, die eng mit der wahrgenommenen Selbstwirksamkeit zusammenhängt, ist die sogenannte Verantwortungsdiffusion. Glaubenssätze wie: „Ich kann durch mein Verhalten sowieso nichts bewirken, weil alle anderen trotzdem weitermachen.“, können dazu führen, dass Klimabewusstsein nicht zu klimafreundlichem Verhalten führt. Wenn dieses Denken weit verbreitet ist und die Verantwortung an andere abgegeben wird, dann kommt es zu kollektiver Passivität. Der Schlüssel liegt dabei *in Gruppen und ihren ganz speziellen Dynamiken*. In einer Gruppe, beispielsweise einer Schulklasse oder auch Gruppen innerhalb der Schulklasse, ist es möglich, durch Etablierung von Normen, wie beispielsweise das Schützen der Umwelt, auch dementsprechendes Verhalten zu fordern – vor allem, wenn die Gruppe für die Person wichtig ist. Gleichzeitig schafft man durch die Gruppe auch ein lokales Bezugssystem für Verantwortung, das der Verantwortungsdiffusion entgegenwirkt.

Was tun? → Gestalten Sie *Gruppenarbeiten und auch längere Gruppenprojekte* zum Thema. Es wäre wichtig, dass die Projekte sich nicht nur innerhalb der Schule abspielen, sondern die Außenwelt mit der Schule verbinden und die Schüler so das Gelernte einfacher in ihren Alltag übertragen können.

D. Positives Framing

Zeigen Sie den Schülern die Möglichkeiten auf, wie sie in ihrem alltäglichen Leben effizient das Klima schützen können. Wenn es nun um die konkreten Handlungen bzw. um die Veränderungen von alten Verhaltensweisen geht, ist es wichtig, die *Botschaften positiv zu formulieren*. Für Menschen wiegen Verluste etwa doppelt so schwer wie Gewinne - deshalb wollen wir nicht hauptsächlich auf die Verzicht, sondern gleich auf die alternative Handlung aufmerksam machen.

Was tun? → Statt „Fahr weniger Auto“ „Fahr mehr Fahrrad und bleibe gesund!“ Dadurch können zugleich auch andere Gewinne, die mit der neuen Verhaltensweise einhergehen, wie in diesem Fall mehr Bewegung, in den Fokus gerückt werden. Weitere Beispiele wären:

- ✓ Kaufe frische, regionale Produkte, die vitaminreicher sind als importierte Ware!
- ✓ Stelle die Heizung eher niedrig, damit deine Schleimhäute feucht bleiben. Das schützt vor Keimen!
- ✓ Werde (Teilzeit-)Vegetarier. Das ist gesund!
- ✓ Kaufe mit Bedacht Dinge, die Du wirklich brauchst und an denen du lange Freude hast!
- ✓ Lasse Dein angelegtes Geld nur für Projekte arbeiten, die anderen Menschen helfen und für die Natur gut sind!

TRANSFORMATIVES ENGAGEMENT: DIE MÖGLICHKEIT, ETWAS ZU VERÄNDERN!

Transformieren heißt, durch aktives Handeln gesellschaftliche Strukturen zu verändern. Das Konzept des „transformativen Engagements“ bedeutet also, durch den eigenen Einsatz und die eigenen Handlungen Veränderungen anzustoßen. Ursprünglich aus dem Bildungsprogramm „Teaching and learning transformative engagement“ der UNESCO stammend (siehe Literaturliste), haben wir es hier auf den Klimawandel angepasst:



Was ist mit „transformativem Engagement“ gemeint?

Transformatives Engagement geschieht auf zwei Ebenen:

1. Der Prozess, den die Schülerinnen und Schüler hin zu intern motiviertem Klimaengagement durchlaufen
2. Die Auswirkungen des Engagements der Schülerinnen und Schüler auf etablierte Institutionen und Normen

Der Prozess des transformativen Engagements in der Schule

Im Folgenden beschreiben wir Punkt eins: den Prozess, den die Schülerinnen und Schüler hin zu intern motiviertem Klimaengagement durchlaufen. Dieser ist in mehrere Teilprozesse bei der UNESCO untergliedert:

1. Wahrnehmung einer Kluft – Ideal vs. Status quo

Transformatives Engagement beginnt oft mit ihrer Wahrnehmung der Existenz einer Kluft zwischen der Realität und dem, was man als Idealzustand betrachtet.

In Bezug auf den Klimawandel wären das zum einen die Diskrepanz zwischen der Erhaltung unseres Planeten als Idealzustand, und der heutigen Realität, also dem Status Quo, in der viele wirtschaftliche, politische und individuelle Akteure weiterhin „business as usual“ betreiben, d.h. das Fortführen von klimaschädlichen Prozessen und Verhaltensweisen, ohne daran etwas zu ändern. Dies kann zu einem „Erwachen“ führen, der Realisation, dass eine Veränderung dringend notwendig ist.

2. Verinnerlichung

Solche Momente des 'Erwachens' sind oft von kognitiven Dissonanzen oder emotionale Turbulenzen begleitet, die die Schülerinnen und Schüler zu kritischem Denken oder Selbstreflexion anregen. Es können Fragen auftreten wie:

Wie kann es sein, dass so wenig passiert, obwohl die Faktenlage doch so eindeutig ist?

Was kann ich tun, um meinen Teil beizutragen?

Was muss ich vielleicht anders machen als bisher?

Diese interne Realisation kann dann dazu führen, dass die Schüler/innen auch tatsächlich aktiv handeln und somit die interne Veränderung nach außen tragen.

3. Aktiv handeln

Nicht alle Erlebnisse und Momente des 'Erwachens', [...] resultieren in der Durchführung einer Handlung oder Verhaltensänderung bei den Lernenden. Es gibt einige begünstigende Faktoren, die Handeln auslösen können. Dazu gehören:

Empathie

Neben dem kognitiven Zugang zu Lerninhalten ist auch der sozio-emotionale Zugang von großer Bedeutung, vor allem, wenn es darum geht selbst aktiv zu handeln. Empathie erlaubt es den Schülerinnen und Schülern, sich mit der Realität einer Situation oder einem Problem auseinandersetzen und dann *eine tiefere emotionale Verbindung dazu aufzubauen*, welche zugleich die Relevanz für ihr eigenes Leben deutlich macht.

Selbstwirksamkeit

Neben dem Wissen, *dass* etwas getan werden muss, ist es von besonderer Relevanz zu wissen und zu fühlen, *dass man selbst auch etwas dazu beitragen kann*.

Kipppunkte

Neben Empathie und Selbstwirksamkeit sind sogenannte Kipppunkte (engl. tipping moments) von großer Bedeutung, in denen die Schülerinnen und Schüler all ihre kognitiven, emotionalen und sozialen Beobachtungen in eine auffordernde Handlung übersetzen können. Dies geschieht vor allem, wenn junge Menschen *eine konkrete und machtbare Möglichkeit avisieren*, mit ihrem Wissen und sozialem Engagement eine Veränderung vollzubringen. Die Zugehörigkeit zu einer Gruppe kann hier als Katalysator wirken. Ein Beispiel: Die Meldung „Corona – 80 Millionen Babies ohne Impfstoff“ macht uns traurig, aber wir können nichts daran ändern. Wenn jedoch Schülerinnen und Schüler erfahren, dass im Fall einer 100 % Energiewende in Österreich, der Energieverbrauch trotzdem gesenkt werden muss, fühlen sie sich angesprochen und in der Lage sich aktiv zu beteiligen.

6.4. Konkretes Handeln für Schülerinnen und Schüler Beitrag von Thomas Hensel und Moritz Strähle

Nach 65 Mio. Jahren erfährt das Leben auf unserem Planeten zum sechsten Mal ein Massensterben. Der dramatische Unterschied zu den vorangegangenen Malen: dieses Mal sind keine Meteoriten oder Vulkanausbrüche verantwortlich, sondern der Ausstoß von Treibhausgasen durch die Menschheit...

*Jeder heute lebende Mensch trägt Verantwortung dafür, die Erde lebenswert zu erhalten! JETZT ist die Zeit für das Leben auf diesen Planeten zu kämpfen!
Nicht-Wissen oder Verdrängen kann nicht als Ausrede akzeptiert werden!*

Nur wo und wie beginnt man mit dem Klimaschutz am sinnvollsten? An diesen fünf Punkten, welche im Folgenden ausführlicher erläutert werden, kannst du dich orientieren:

1. Habe Spaß am Klimaschutz!
2. Wissen ist Macht – informiere dich!
3. Maximiere die klimaschützende Wirkung deines Handelns!
4. Werde politisch!
5. Schließt euch zusammen!

Die ökologischen und sozialen Folgen, aber auch die finanziellen und wirtschaftlichen Folgen eines ungebremsten Klimawandels sind weit verheerender, als es jene der Corona-Krise hätten sein können! Die Konsequenzen, die wir alle für unser Handeln ziehen müssten, um der Klimakrise zu begegnen, wären hingegen weit weniger radikal!

Prof. Dr. Volker Quaschnig über die Folgen und Einschränkungen der Corona-Krise im Vergleich zur Klimakrise [36]

1. HABE SPAß AM KLIMASCHUTZ!

Du kannst viel zum Schutz von Klima und Umwelt beitragen - am besten beginnst DU mit einer Sache, die DIR Spaß macht: Vielleicht schaust du dir zur Vorbereitung erstmal eine Doku zum Klimawandel an?¹⁹ Oder hast du Interesse am Kochen? Dann stelle dich der Herausforderung im nächsten Monat möglichst klimaschonend und lecker zu kochen – mit möglichst wenig Fleisch und Tierprodukten, dafür mit saisonalem Gemüse und anderen Zutaten mit möglichst kurzem Transportweg.

Du bist sportlich oder willst es werden und deine Eltern fahren dich bzw. du fährst noch mit dem Auto zur Schule? Dann steige um: auf öffentliche Verkehrsmittel, das Fahrrad oder ein Mix aus beidem!

Wie immer du auch beginnst: Sei kreativ und habe Spaß dabei! Dann wirst du automatisch zum Vorbild für Freunde und Eltern – vielleicht macht ja bald jemand mit?! Und wenn du mal mit dem Handeln angefangen hast, dann fallen dir sicher weitere Dinge ein, wie DU für den Erhalt der Vielfalt und Schönheit der Erde kämpfen kannst!

¹⁹ Viele kurzweilige, spannende und informative Dokus, Kurzfilme, Videos etc. haben wir auf unserer Website für euch zusammengestellt: www.klimawandel-schule.de/fuereuch

2. WISSEN IST MACHT – INFORMIERE DICH!

Bleibe informiert – Dokumentationen, Kinofilme, Bücher, Zeitungs-Artikel, Podcasts und Mediatheken im Web bieten erstklassige Möglichkeiten im Bilde zu bleiben. Auf unserer Website haben wir unter www.klimawandel-schule.de/fuereuch eine tolle Auswahl für euch zusammengestellt!

Informierte lassen sich nicht von jedem Trend und Greenwashing²⁰ mitreißen und achten auf Lobbyismus und Fake-News. Wie man Fakes-News erkennt? Als Erstes an den Quellenangaben: irgendwelche „Wahrheitsportale“ statt Wissenschaftsquellen werden zitiert. Durch Recherchen auf Wissenschaftsportalen (auch dazu findest du hier eine Übersicht: www.klimawandel-schule.de/quellen) bekommst du dagegen zuverlässige Informationen. Bald wirst Du weitere Zusammenhänge verstehen und ein immer größeres Bewusstsein dafür entwickeln, was tatsächlich auf dem Spiel steht, wer lügt und wer verführt.

Kleiner Tipp: Hinter den Indizes (wie z.B. die [?] bei Greenwashing) verbergen sich interessante zusätzliche Erklärungen, Beispiele, Links oder Quellen. Diese Infos wurden vom Text in die Fußzeile verlegt, um den Lesefluss nicht zu unterbrechen. Wir empfehlen dir diese Zusatzinformationen am Ende jedes Absatzes auf jeden Fall zu lesen.

3. MAXIMIERE DIE KLIMASCHÜTZENDE WIRKUNG DEINES HANDELNS

Welche Maßnahmen bringen am meisten? Um dieser Frage nachzugehen, stellen wir dir zunächst das EEE-Prinzip vor und beleuchten einen typischen CO₂-Fußabdruck.

GRUNDLEGENDES HANDWERKSZEUG: EINSPAREN, EFFIZIENZ UND ERNEUERBARE ENERGIE (EEE)

EINSPAREN²¹

Wenig zu konsumieren und sparsam zu leben ist die einfachste, billigste, schnellste und erste Maßnahme!

Frei nach dem Motto *weniger ist mehr*: weniger Kilometer mit dem Auto fahren, weniger weit in Urlaub reisen, weniger oft Neues kaufen, dafür aber hochqualitative, langlebige Lieblingsstücke, welche du lange benutzen kannst. Ob Kleidung, Elektrogeräte oder Möbel: Was nicht produziert wird, führt auch nicht zu einem CO₂-Ausstoß!

Sehe das Thema Einsparen einfach mal als kreative Alternative mit der du auch einiges an Geld sparen kannst:

²⁰ Unter *Greenwashing* versteht man, wenn Firmen ihr Image oder das ihrer Produkte grüner und nachhaltiger darstellen als es der Realität entspricht. Z.B. wenn auf eine Plastikverpackung ein grünes Blatt und das Wort *Eco* gedruckt wird. Oder wenn ein großer deutscher Energiekonzern in einem Video mit einem Riesen wirbt, der Windräder pflanzt – obwohl zum Zeitpunkt der Ausstrahlung nur 0,1 % des Stroms des Konzerns aus Windkraft stammte.

²¹ Weniger zu konsumieren ist ein wichtiger Schritt – wenn nicht sogar der Wichtigste. Durch geschickte Werbung schaffen es Unternehmen fast jedes Quartal, die Produktion und zugleich den Bedarf an knappen Rohstoffen zu erhöhen. Der Club of Rome hat bereits vor ca. 50 Jahren mit dem Werk „Die Grenzen des Wachstums“ die ökonomischen und vor allem ökologischen Gefahren sehr zutreffend beschrieben. Heute bräuchten wir mehr als drei Erden, wenn alle Erdbewohner so konsumorientiert leben würden wie wir Österreicher.

- ✓ Minimalismus kann sehr befreiend wirken!
- ✓ Lass dir nicht von Werbung einreden, was du alles brauchst!
- ✓ Repariere, teile, verleihe und leihe!
- ✓ Esse deutlich weniger Fleisch und andere tierische Produkte! Dafür aber hochwertige, regionale, saisonale und frische Lebensmittel und in welchen noch viel Gutes steckt.

EFFIZIENZ

Je weniger Energie du zum Erreichen eines bestimmten Zieles einsetzt, desto effizienter handelst du!

Zum Erreichen des Ziels „Beleuchten meines Zimmers“ stellt der Einsatz einer LED-Lampe eine sehr effiziente Möglichkeit, im Vergleich zum Einsatz von Glühbirnen oder dem Aufstellen von Kerzen dar. Zum Erreichen des Ziels „Warmhalten meines Körpers“ ist das Anziehen eines Pullovers deutlich energieeffizienter als das Hochdrehen der Heizung.

Weitere Beispiele: In einem voll besetzten Auto verbraucht jeder Fahrgast, im Vergleich zur Fahrt allein, nur ca. ein Fünftel der Energie, handelt also fünfmal so effizient! SUVs²² sind deshalb so ineffizient, weil das sehr hohe Eigengewicht ständig beschleunigt und abgebremst werden muss. Neben der Nutzung von Fahrrad, Pedelec²³, Elektro-Mofa und öffentlichem Personennahverkehr sind also vollbesetzte kleine Autos mit wenig Eigengewicht effiziente Möglichkeiten der Fortbewegung.

Ein absoluter Elefant unter den Maßnahmen, hin zu mehr Energieeffizienz, ist die Isolation der eigenen Wohnung! Anstrengungen hierzu werden vom Staat aktuell stark bezuschusst.

Weitere Möglichkeiten mit effizienten Technologien klimaschädliche Emissionen zu vermeiden, sind z.B. Kühlschränke und andere Elektrogeräte mit einer Energieeffizienzklasse A²⁴; aber du findest sicher noch viel mehr Möglichkeiten!

²² Paradoxerweise sind SUVs auf dem Papier sehr effizient. Ein 2 Tonnen schwerer SUV verursacht weniger Emissionen als vier 0,5 Tonnen leichte Kleinwagen. Ein Auto mit vier Autos über das Gesamtgewicht miteinander zu vergleichen ist zwar total unlogisch und eine Verdrehung der Realität – macht sich aber gut als Verkaufsargument. Und da die Automobilbranche mit großen Autos viel Geld verdient und einen gewissen Einfluss hat, werden die Werte so angegeben.

²³ Pedelec: Elektro-Fahrrad, welches bis zu einer Geschwindigkeit von 25 km pro Stunde eine Tretunterstützung bietet.

²⁴ Die Energieeffizienzklassen haben sich im März 2021 geändert. Die „Plus-Klassen“ A+ bis A+++ entfallen. Nun gibt es Einteilungen von A bis G, wobei A nun am energieeffizientesten ist.

ERNEUERBARE ENERGIEN

In Österreich wie auch weltweit, steigt in den letzten Jahrzehnten der Bedarf an Energie stetig an. Dadurch, dass die meisten Treibhausgasemissionen aus dem Energie- und Industriesektor stammen, korreliert die Entwicklung der Treibhausgase stark mit den Bruttoinlandsenergieverbrauch. Klar ersichtlich ist ebenfalls der geringere Energieverbrauch im Jahr 2020 aufgrund der Corona-Pandemie [37].

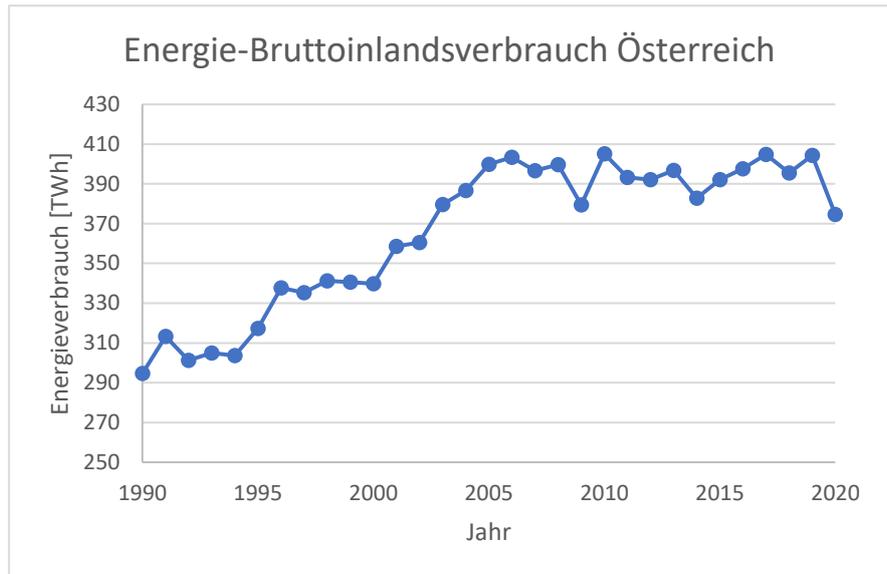


Abbildung 55 - Bruttoinlandsenergieverbrauch von 1990 bis 2020 (Daten: eurostat)

Dieser stetige Anstieg hängt zum einen mit unserem überflussorientierten Lebensstil zusammen: Heute besitzen wir 5-mal mehr Gegenstände als noch vor 40 Jahren. Der zweite Grund für den steigenden Bedarf an elektrischer Energie hängt damit zusammen, dass moderne Technologien wie Wärmepumpen-Heizungen, E-Mobilität aber auch die Industrie vermehrt auf Strom setzen²⁵. Grundlegend für alle Klimaschutzziele ist es also, den Strombedarf nicht über fossile Energieträger, sondern über erneuerbare Quellen wie Sonne und Wind zu decken. Durch den hohen technischen Standard heutiger Photovoltaik- und Windkraftanlagen ist diese Form der Energiegewinnung mittlerweile nicht nur wesentlich emissionsärmer, sondern auch billiger.

Die nebenstehende Grafik zeigt, je nach Erzeugungsenergie, die verursachten Emissionen in Gramm pro Kilowattstunde elektrische Energie, wenn man den Anlagenbau, die Energieverteilung und die Anlagenentsorgung miteinbezieht. Bei der Erzeugung einer Kilowattstunde elektrische Energie in einer Windkraftanlage werden 25 Gramm, also 0,025 kg CO₂ ausgestoßen, bei der Erzeugung in einem Kohlekraftwerk hingegen ca. ein Kilogramm, also 40-mal so viel! [38]

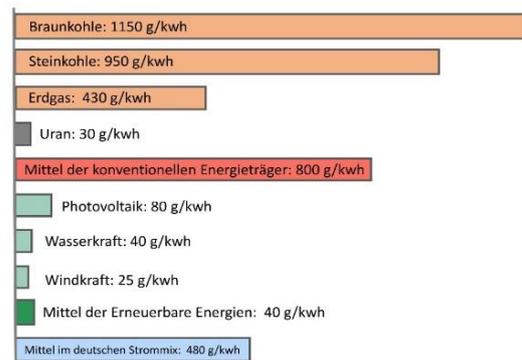


Abbildung 56 - CO₂-Emissionen nach Energieträgern, Stand 2017 (Quelle: Naturwissenschaften Europa Verlag)

Das Umsteigen auf echten Ökostrom ist sehr leicht umzusetzen, sehr effektiv und sollte daher einer der ersten Schritte sein. 100 % Ökostrom wird von Unternehmen verkauft, die weder Kohle- noch Atomkraftwerke betreiben und kostet nicht viel mehr als konventioneller Strom.

²⁵ Gerade energieintensive Branchen wie die Eisen-Stahl und Chemieindustrie müssen im Kontext der geplanten Treibhausgasneutralität Österreichs Ihre Produktionsverfahren umstellen – also weg von fossilen Energien wie Kohle, Öl und Gas hin zu Wasserstoff aus grünem Strom.

Die häusliche Wärme aus erneuerbaren Quellen wie aus einer Wärmepumpe zu beziehen hat noch mehr Wirkung für den Klimaschutz. Laut Expertenmeinungen [39] [40] brauchen wir in den nächsten Jahrzehnten vier bis fünf Mal mehr Photovoltaik- und Windkraftanlagen, um die Pariser Klimaziele einzuhalten. Der Ausbau und die Akzeptanz für Photovoltaik und Wind hängen sehr stark von gesetzlichen Rahmenbedingungen ab. Somit ist es besonders wichtig, sich politisch einzumischen - informiere dich!

4. GENAUERE ANALYSE: DER ÖKOLOGISCHE- FUßABDRUCK

Dadurch, dass alle natürlichen Rohstoffe die wir beim Essen, Wohnen, Reisen oder bei anderen Aktivitäten verbrauchen erschöpfbar sind und Platz zum Nachwachsen benötigen, dient der ökologische Fußabdruck einer Person als Maß jener biologisch nutzbaren Fläche, die durch dessen Lebensstil benötigt wird. Diese benötigte Fläche wird in globalen Hektar (gha)²⁶ angegeben. Laut aktuellem Stand stehen für jeden Menschen auf der Erde 1,55 gha zur Verfügung. Wie in der untenstehenden Abbildung 57 ersichtlich beansprucht der Durchschnittsösterreicher im Moment 5,31 gha. Mit anderen Worten: Würde die gesamte Weltbevölkerung so leben wie wir, so bräuchten wir zwei weitere Erdplaneten, um unseren aktuellen Lebensstil aufrecht erhalten zu können [41].

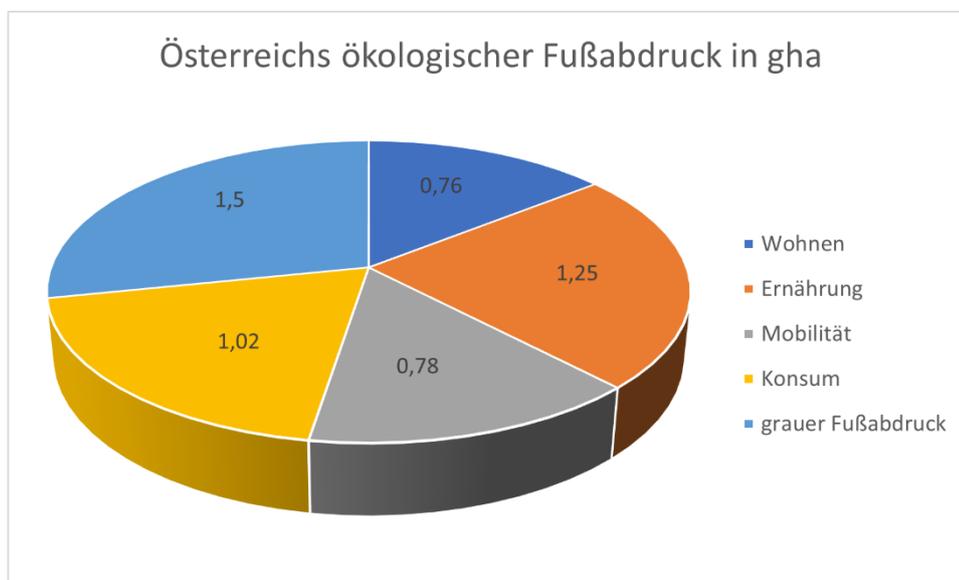


Abbildung 57 - Der durchschnittliche ökologische Fußabdruck der österreichischen Bevölkerung (Credits: BMK)

Um die Zukunftsfähigkeit deines eigenen Lebensstils testen zu können, kannst Du Deinen eigenen ökologischen Fußabdruck mittels diverser Fußabdruck-Rechner, z.B. auf der Seite www.mein-fussabdruck.at, in wenigen Minuten berechnen.

Die Zusammensetzung des durchschnittlichen ökologischen Fußabdrucks der österreichischen Bevölkerung ist in Abbildung 57 dargestellt. Die hier abgebildeten fünf großen Bereiche sollen im Folgenden genauer beleuchtet werden.

²⁶ Ein globaler Hektar entspricht einem Hektar Landfläche mit durchschnittlicher biologischer Aktivität. Nach Abzug der biologisch nicht nutzbaren Fläche von der gesamten Erdoberfläche (rund 51 Milliarden Hektar) resultiert eine biologisch aktiv nutzbare Fläche von 12,2 Milliarden Hektar. Teilt man diesen Wert durch die Weltbevölkerung (7,9 Milliarden Menschen; Stand 2021), so resultiert eine Fläche von 1,55 Hektar für jeden Menschen.

(A) Konsum: 1,02 gha

Der Kauf von Gütern aller Art und Dienstleistungen tragen zu etwa 19 % des Fußabdrucks bei (vgl. Abbildung 57). Damit Produkte wie Handys, Kleidung, Unterhaltungselektronik, Haushaltsmöbel und -geräte, Dekoration, Verpackungen, Sportartikel, usw. bei Dir landen, sind meist die folgenden Schritte nötig: Rohstoffgewinnung, Produktion, Transport, Lagerung, Vermarktung und Versand. Letztendlich enden all diese Produkte früher oder später als Müll.²⁷ [41].

Und auch Dienstleistungen, wie die Lieferung von Schuhen in verschiedenen Größen mit kostenfreier Retoure oder Streaming- und Kommunikationsdienste²⁸, mögen zwar komfortabel und günstig sein und oft auch unentbehrlich erscheinen – haben aber für das Klima und die Umwelt große Auswirkungen. Einsparen ist hier das Zauberwort. Mit dem Verzicht auf einen gewissen Gegenstand, oder eine bestimmte Bestellung kannst du deinen Fußabdruck schnell und einfach verkleinern! Falls du einen bestimmten Gegenstand aber wirklich benötigst, kann man diesen sicher auf diversen Kleinanzeigenportalen gebraucht und somit oft kostengünstiger und CO₂-kostenfrei kaufen. Und falls du dort nicht fündig wirst, gibt es mittlerweile viele Firmen und Hersteller, die CO₂-neutral und nachhaltig produzieren – Vorsicht aber vor Greenwashing (s.o.).

(B) Wohnen und Strom: 0,76 gha

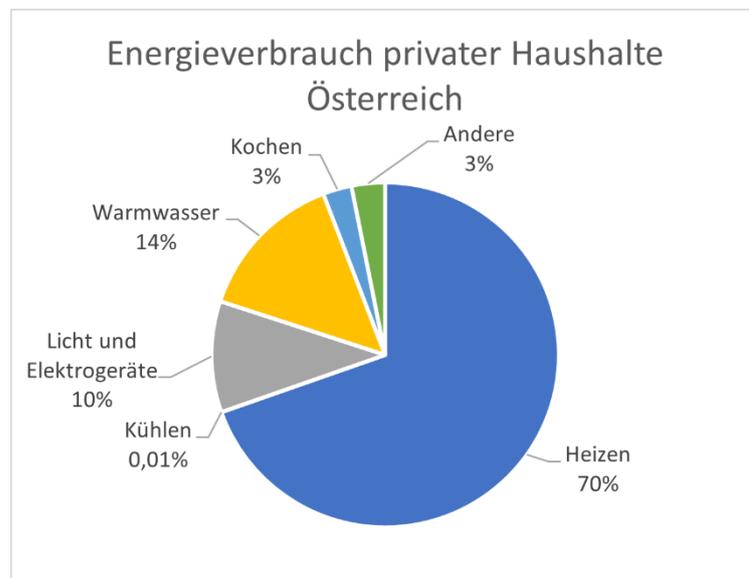


Abbildung 58 - Aufgeschlüsselter Energieverbrauch privater, österreichischer Haushalte (Daten: eurostat)

Rund 14 % (siehe Abbildung 57) des österreichischen Jahresenergieverbrauchs und der daraus folgenden Emissionen gehen auf das Konto privater Heizungen, Klimaanlage²⁹, Warmwassererzeugung und Strom. Das Heizen der Wohnräume entspricht hierbei wiederum dem größten Anteil (70%), wie der dunkelblaue Sektor der obenstehenden Abbildung deutlich zeigt. Der Austausch alter Ölheizungen gegen ein modernes, energiesparendes und nachhaltiges Heizungssystem und die Isolierung älterer Wohnungen und Häuser können den Fußabdruck deutlich senken. Um einen zusätzlichen Anreiz für den Tausch der Öl- oder Gasheizung zu schaffen, gibt es die Initiative „raus aus Öl und Gas“. Zusammen mit

²⁷ Graue Energie ist der Fachbegriff für die Energiemenge eines Produktes, welche vor und nach der eigentlichen Nutzung entsteht.

²⁸ Würde man das Internet als Land betrachten, so wäre es in den Top 5 Ländern mit dem größten Stromverbrauch. Nachvollziehen lässt sich diese Aussage nur, wenn man sich vorstellt, welche Menge an Servern und Rechnern weltweit arbeiten müssen, um ein einfaches YouTube Video ansehen zu können. All diese Server-Räume und Rechner müssen ständig gekühlt werden.

²⁹ Weit mehr Energie als Heizen benötigt das Kühlen von Wohnräumen.

Sanierungsförderungen umfasst diese Förderungsaktion des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) 650 Millionen Euro für die Jahre 2021 und 2022. Dies soll einen Beitrag zur geplanten Klimaneutralität Österreichs bis zum Jahr 2040 leisten [42].

Die empfohlene und auch als gesund angesehene Raumtemperatur liegt in Küche, WC und Schlafzimmer bei 18°C und im Wohnzimmer bei 20°C³⁰. Trage also lieber eine Kleidungsschicht mehr und verkleinere so deinen Fußabdruck. Das Einsparpotenzial bei der Beleuchtung ist hingegen vergleichsweise gering.³¹

Unabhängig davon, ob Warmwasser mittels Elektroboiler oder über die Elektrozentralheizung erhitzt wird: Der Umstieg zu einem echten Ökostromanbieter ist wohl eine der Maßnahmen mit dem besten Verhältnis aus Aufwand und Nutzen – gut über eine Tonne CO₂ kann ein durchschnittlicher Vier-Personen-Haushalt hiermit ohne Aufwand sparen.

(C) Mobilität: 0,78 gha

Unterschiedliche Fortbewegungsmittel unterscheiden sich deutlich in ihren CO₂-Emissionen – diese Nachricht ist nicht neu. Die folgende Tabelle verschafft einen Überblick, welches Verkehrsmittel wieviel CO₂ verursacht. Es werden die direkten Emissionen in Gramm pro zurückgelegten Kilometer je Fahrgast dargestellt. Bei Auto, E-Auto und E-Roller wurde von einem Fahrgast ausgegangen. Die Werte sind ein gerundeter Durchschnittswert aus diversen Quellen wie der Europäischen Umweltagentur, dem ADAC oder dem Umweltbundesamt.

Verkehrsmittel	Flugzeug	Auto	E-Auto	Bahn	Bus	Straßenbahn	E-Roller	Pedelec	Fahrrad
Gramm CO ₂ pro km und pro Person	300	200	75 ³²	50	50	15	5	2	0

Wie bereits beim Thema Effizienz angesprochen, variieren diese Durchschnittswerte je nach eingebauter Antriebstechnologie, Fahrzeuggewicht und Passagierzahl deutlich. Ferner fährt auch noch nicht jede Bahn mit Ökostrom, wodurch ein vergleichbarer Emissionswert wie mit dem Bus entsteht.

Die größte CO₂-Einsparung erreicht man jedoch, wenn man das Zurücklegen langer Strecken möglichst vermeidet. Ein Urlaub in der Heimat, wie viele ihn in den Corona-Sommern 2020 und 2021 erlebt haben, bedeutet erstmal weniger Reisestress, kann viel Spaß machen und spart im Vergleich zu einem Flug nach Bali mehr als 7 Tonnen CO₂ – und zwar pro Person.

³⁰ Ein Grad Temperaturreduzierung spart je nach Dämmung und Heizungsart zwischen 5% und 10% der Heizenergie bzw. Emission.

³¹ Das Umweltbundesamt hat online weitere Tipps zur Reduzierung des Fußabdrucks in diesem Bereich zusammengestellt: www.umweltbundesamt.de → Umwelttipps für den Alltag → Heizen Bauen → Heizen und Raumtemperatur <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/heizen-bauen/heizen-raumtemperatur#unsere-tipps>

³² Bei Elektroautos reicht die Bandbreite von 25 bis 125 Gramm CO₂/ km. Dabei resultiert der untere Wert aus 100% Windstrom und der obere Wert aus dem aktuellen deutschen Strommix. Addiert man jetzt zu den direkten Emissionen noch die Emissionen der Fahrzeugproduktion erhöhen sich alle Werte der zuvor angegebenen Tabelle – für einen herkömmlichen PKW um durchschnittlich 20 Gramm CO₂/ km und für E-Autos um 50 Gramm CO₂/ km im Mittel.

(D) Ernährung: 1,25 gha

Im Bereich Ernährung schlummert ein ungeahnt großes Potential. Betrachten wir nur den hierzulande verursachten Ressourcenverbrauch, dann verursacht jede Österreicherin und jeder Österreicher im Schnitt fast ein Viertel seines Fußabdrucks durch seine Ernährung – im Schnitt also 1,25 globale Hektar. Und diese Emissionen werden noch mehr als verdoppelt, wenn man den durch uns, außerhalb Österreichs, verursachten Schadstoffausstoß für den Anbau und die Produktion unserer Lebensmittel mit betrachtet.

Die Nutztierhaltung ist, je nach Studie, für 20 bis 50 % [43] aller weitweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich!

Wie kommt dieser riesige Anteil zustande?³³ Nutztiere brauchen viel Futter. Oft wird Soja als „Kraftfutter“ verfüttert, welches in diesen Mengen nicht in Österreich (oder generell in Europa) angebaut werden kann und somit auch nicht in der nationalen Emissionsbilanz auftaucht. Vor allem in Südamerika werden riesige Urwaldflächen gerodet, um Soja anzupflanzen und anschließend die eiweißhaltigen Bohnen mit erneutem CO₂-Ausstoß über den ganzen Globus zu transportieren. Da die Fleischverarbeitung im europäischen Ausland oft günstiger ist, folgt zudem ein beachtlicher Energiebedarf für Kühlung und Transport. Das von Kühen ausgestoßene Methangas ist zudem weitaus klimaschädlicher als CO₂ und die Produktion von Mineraldünger für die Tierfutterproduktion ist ebenso mit erheblichem Energieaufwand verbunden.

Klares Fazit: Eine Reduktion des Konsums von Fleisch und Milchprodukten ist eine sehr wirkungsvolle klimaschützende Maßnahme.

Zweite Stellschraube: Regionale und saisonale Bio-Zutaten verwenden.

Beim Bioanbau wird nur etwa die Hälfte der Energiemenge gegenüber konventioneller Landwirtschaft benötigt. Bei nicht regionalen und nicht saisonalen Lebensmitteln entstehen durch die langen Transportwege überflüssige Emissionen. 100 Gramm Spargel aus Chile verursachen allein durch den Transport 1,7 Kilogramm an CO₂-Emissionen. Dieselbe Menge an Spargel aus der näheren Umgebung zur Spargelzeit nur 0,06 kg.

(E) Grauer Fußabdruck: 1,5 globale Hektar

Unter dem grauen Fußabdruck versteht man die Emissionen und Ressourcennutzung, die nicht auf eine einzelne Person zurückgeführt werden kann. Der Ressourcenverbrauch aus diesem Bereich entsteht durch alle Einrichtungen der Öffentlichkeit – also hauptsächlich durch den Strom- und Heizwärmebedarf von Museen, Krankenhäusern, Schulen etc. Einsparungen sind somit nicht sofort umsetzbar, aber auch nicht unmöglich. So gibt es in Österreich ein Förderprogramm für die Installation von Solaranlagen auf öffentlichen oder gewerblich genutzten Gebäuden [44]. Dies ist ein Anreiz mittels selbst erzeugter Solarenergie andere, umweltschädlichere Energieformen zu ersetzen.

³³ Folgt der Argumentation von J.S. Foer im Anhang seines 2019 veröffentlichten Buches „Wir sind das Klima“

Und wie bei allen Dingen, die die Öffentlichkeit betreffen, wird sich auch im Bereich der öffentlichen Emissionen nur etwas ändern, wenn engagierte Bürgerinnen und Bürger auf Missstände hinweisen und versuchen die Welt ein kleines bisschen besser zu machen.

Nachdem du nun die fünf großen Handlungsbereiche (A bis E) kennst, konzentriere dich auf wenige konkrete Handlungen mit großem Potential, indem du dich an deinem persönlichen Fußabdruck orientierst.

*Viel mehr als unsere Fähigkeiten sind es unsere Entscheidungen,
die zeigen, wer wir wirklich sind.*

Joanne K. Rowling

Bevor wir zu Punkt 5 „Werde politisch!“ übergehen, hier noch zwei wichtige Gedanken zum Kapitaleinsatz und der Chance des Kompensierens:

DIE CHANCE DES KOMPENSIERENS

Nicht alle Emissionen lassen sich vermeiden. Für Unvermeidliches wurde die Idee der „Kompensation“ erfunden. Generell sollte Kompensation nur zusätzlich zum persönlichen Klimaengagement stattfinden und nicht als Ablasshandel für Klimasünden gelten. Die Idee dahinter:

Kompensationsplattformen wie *Atmosfair*, *Klima-Kollekte* oder *Primaklima* investieren in Projekte, mit denen CO₂ vermieden (z.B. Schutz und Renaturierung von Moorlandschaft und Torfböden³⁴) oder CO₂ eingespart werden soll (z.B. effizientere Kochstellen zur Zubereitung von Nahrung in Entwicklungsländern). Der Kompensationspreis kann sich hier aber je nach Anbieter erheblich unterscheiden – und leider auch, ob die versprochene Kompensationswirkung tatsächlich erreicht wird. Ein äußerst informativer Beitrag zum Thema CO₂-Kompensation wurde im November 2020 in Deutschlandfunk Kultur veröffentlicht [45]. Wenn du dir selbst mit der Entscheidung zur einem Kompensationsprojekt unsicher bist, hilft auch die Empfehlung des Umweltbundesamt, welches Projekte mit „Gold-Standard“ nach Vorgaben des Weltklimarats bewertet.

KAPITALEINSATZ

Auch wenn sich auf deinem Sparkonto vermutlich noch keine großen Summen befinden, ist dieser Punkt für die Zukunft und vielleicht auch für die Diskussion mit deinen Eltern wichtig! Denn wo du deine Ersparnisse anlegst und mit welcher Rentenversicherung du später einen Vertrag eingehst, hast du selbst in der Hand! Es gibt Banken, Anlagemöglichkeiten und Versicherungen, welche sich für Nachhaltigkeit, Gemeinwohlaspekte, Klima- und soziale Gerechtigkeit einsetzen und trotzdem vergleichbare Zinsen und gute Leistungen anbieten. Überspitzt dargestellt wäre es für die eigene CO₂-Billanz fatal, das ganze Jahr ökologisch zu leben und im Gegenzug mit Tausenden von Euros über Aktienanteile bewusst oder unbewusst den Kohleabbau zu fördern. Es gibt bereits Banken und Anlagefonds, die die Themen Umweltschutz und Nachhaltigkeit wirklich ernst meinen. Suche im Internet nach dem Begriff „ESG-Kriterien“ als Beurteilungsbasis für eine nachhaltige Investition.

³⁴ CO₂ und Methan Vermeidungs-Potential: Quelle Europabuch: Moorlandschaften in Regenwäldern drohen auszutrocknen. Geschieht das mit dem Mooregebiet im Kongobecken mit einer Fläche die doppelt so groß wie Österreich ist, hätte das fatale Folgen für/auf das Klima. Es käme zu einem zusätzlichen Ausstoß von 30.000 Mt CO₂. Als Vergleich: Im Jahr 2017 hatte ganz Österreich einen CO₂-Ausstoß von 82 Mt CO₂ [69]

FAZIT:

Der Verein *3 fürs Klima* schlägt drei sinnvolle Schritte vor:

- ✓ Verkleinere deinen *Fußabdruck*,
- ✓ *kompensiere* den Rest
- ✓ und vergrößere deinen *Handabdruck*!

Wenn du deinen Fußabdruck so klein wie möglich gestaltest und den Rest deiner Emissionen kompensierst, bist du auf einem guten Weg – aber noch lange nicht am Ziel!



Jetzt gilt es, deinen *Handabdruck* so groß wie möglich zu machen! Im Gegensatz zum Fußabdruck, den du maximal auf null senken kannst, hat dein Handabdruck das Potenzial bis ins Unendliche zu wachsen, indem du andere Menschen auf deinem Weg mitnimmst und mit Begeisterung überzeugst.

Jugendliche und Kinder haben einen deutlich größeren Einfluss auf ihre Eltern, andere Erwachsene und die Gesellschaft als sie vermuten. Nutze diesen Einfluss und konfrontiere Erwachsene mit Fakten und Argumenten!

- ? Warum konnte es überhaupt dazu kommen, dass uns heute eine Klimakatastrophe droht?
- ? Was haben deine Eltern in Sachen Klimaschutz unternommen, als sie so alt waren wie du heute?
- ? Was unternehmen sie heute?

Trau dich, mit Freunden und Familie über Umwelt- und Klimaschutz zu sprechen – auch über Themen, wie Geldanlage und Urlaubsplanung!

Und mit der Vergrößerung deines Handabdrucks kommen wir nun zu den beiden letzten Themen: „Werde politisch!“ und „Zusammen sind wir stark!“.

5. WERDE POLITISCH!

Politik ist nur etwas für Politiker? Kochen ist nur etwas für Köche? Natürlich nicht! Gesetzliche Regelungen betreffen alle und sind vor allem wegen ihrer breiten Wirkung so effektiv: Wir können selbst mit einschneidenden Verhaltensveränderungen und entschlossenem Handeln die Welt nicht vor dem Kippen bewahren, solange sich unsere Maßnahmen nur auf den persönlichen Bereich beschränken!

Wusstest du, dass Österreich im Jahr 2018 rund 3,5 Milliarden Euro Steuergelder in Form umwelt- und klimaschädlicher Subventionen ausgegeben hat [46]? Somit wurden u.a. Dieselstoffe, der Kohleabbau sowie der Einsatz fossiler Energieträger gefördert und der Flugverkehr mit 380 Millionen Euro unterstützt! Insgesamt entspricht das 500 Euro pro Jahr und Steuerzahler. Du findest, dass das Geld, welches

unserer Gesellschaft durch Steuern zur Verfügung steht, sinnvoller eingesetzt werden kann? Dann mische dich ein, zeige deine Meinung und werde politisch!³⁵

Es sind gesetzliche Regelungen notwendig, um z.B. Kerosin zu besteuern und damit Fliegen so zu bepreisen, wie es seiner Klimaschädlichkeit angemessen ist. Beispiele wie die Anschnallpflicht in PKWs, die Helmpflicht für Motorradfahrer oder das Nichtraucherschutzgesetz³⁶ zeigen, dass auch vorerst als einschränkend wahrgenommene gesetzliche Regelungen äußerst sinnvoll sind und schon nach kurzer Zeit ganz selbstverständlich zum Alltag gehören. Und wie sich besonders in den letzten Jahren nochmal deutlich gezeigt hat, ist politischer Druck aus der Bevölkerung hierfür enorm wichtig:

Unsere Politiker brauchen unsere Rückendeckung, um einen radikalen Richtungswechsel auch gegen Widerstände durchsetzen zu können!

So kannst du starten:

- ✓ Analysiere die Parteiprogramme vor der nächsten Wahl hinsichtlich des Engagements in Richtung Klimaschutz und diskutiere mit Freunden und Verwandten darüber!
- ✓ Überprüfe, wie diese Parteien während der zurückliegenden Jahre den Klimaschutz forciert oder behindert haben: An ihren Taten sollst Du sie messen, nicht an den schönen Worten.
- ✓ Unterschriften für Klima- und Umweltschutz können eine große Wirkung erzielen. Erfolgreiche Beispiele aus der Vergangenheit sind Volksbegehren gegen Atomkraft oder gegen Gentechnik in Lebensmitteln.
- ✓ Z.B. über www.meineabgeordneten.at findest du deine gewählten Volksvertreter. Nimm Kontakt zu ihnen auf und mische dich ein – sie wurden gewählt, um DICH zu vertreten!
- ✓ Mit deiner Teilnahme an Demonstrationen weist DU die regierenden Parteien auf Missstände hin und adressierst Forderungen zur Verbesserung!
- ✓ Tritt einer Partei bei! So kannst du selbst mitgestalten, Verantwortung übernehmen und erlebst, wie Politik und Gesetzgebung in Österreich funktionieren und wie du selbst Teil der Entscheidungen werden kannst.

6. ZUSAMMEN SIND WIR STARK!

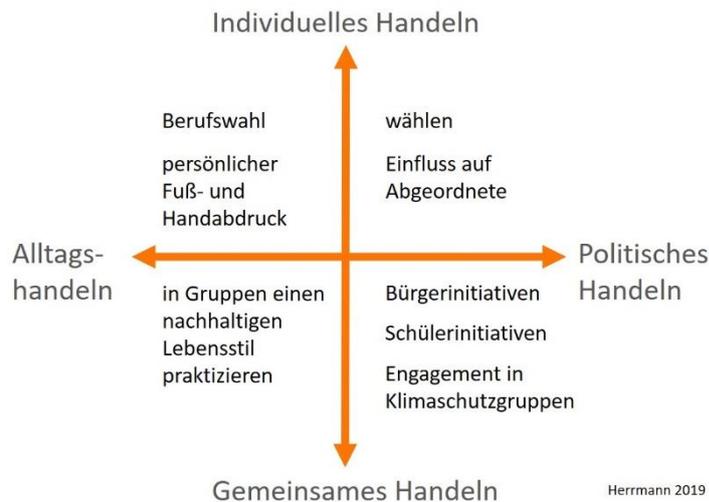
Du wirst die Welt nicht allein retten können und auch die Einhaltung selbst gesteckter Ziele fällt viel schwerer, ohne die Motivation einer Gruppe. Daher: Schließt euch zusammen! So erhöht ihr eure Wirkungskraft und euer Handeln erhält die nötige Ausdauer!

Beispiele gefällig?

³⁵ „Politik“ bedeutet übrigens nichts anderes als „die Allgemeinheit betreffend“.

- ✓ Gründet eine AG Klimaschutz an eurer Schule!
- ✓ Setzt euch Klima-Challenges im Freundeskreis!
- ✓ Bittet eure Lehrer, das Thema Klimaschutz im Unterricht zu behandeln!
- ✓ Schließe Dich Bewegungen, Umwelt- oder Klimaschutzorganisationen vor Ort an! Gemeinsam wird auch euer politischer Einfluss wachsen!³⁷

Im Diagramm unten werden verschiedene Bereiche (und nur ein paar Beispiele) aufgezeigt, mit denen du deinen CO₂-Handabdruck vergrößern kannst. Beachte, dass das individuelle Handeln im Alltag nur einem kleinen Teil deiner Einflussmöglichkeiten entspricht - verteile deine Energie also auf alle vier Felder!



Alles klar soweit?! Dann kann's ja gleich losgehen! Hier zum Start fünf Challenges für dich / euch:

Challenge 1: *Schaue zwei Dokus und lies ein Buch zum Klimawandel!*

Challenge 2: *Reduziere Deinen / Euren Verbrauch an Fleisch und Milchprodukten: Fleisch nur noch abends! Oder noch besser: Fleisch nur noch an maximal einem Tag in der Woche*

Challenge 3: Stelle deinen Eltern einige der folgenden Fragen:

- „Wie habt ihr euch für den Klimaschutz engagiert, als ihr so alt wart wie ich?“
- „Was ist euer heutiger Beitrag, um unseren Planeten lebenswert zu erhalten?“
- „Welchen Stromanbieter haben wir?“
- „Was für eine Heizungsanlage haben wir eingebaut?“
- „Ist unser Haus gut isoliert?“
- „Warum haben wir keine Solaranlage auf dem Dach?“

Challenge 4: *Rufe bei deiner Bank, Kranken- oder Rentenversicherung an und frage, wo sie dein Geld anlegen. Können Sie z.B. sicherstellen, dass nicht in den Kohleabbau investiert wird?*

Challenge 5: Schließe dich der AG Klimaschutz an eurer Schule an! Es gibt keine AG Klimaschutz? Dann gründe eine AG Klimaschutz mit deinen Freund*innen!

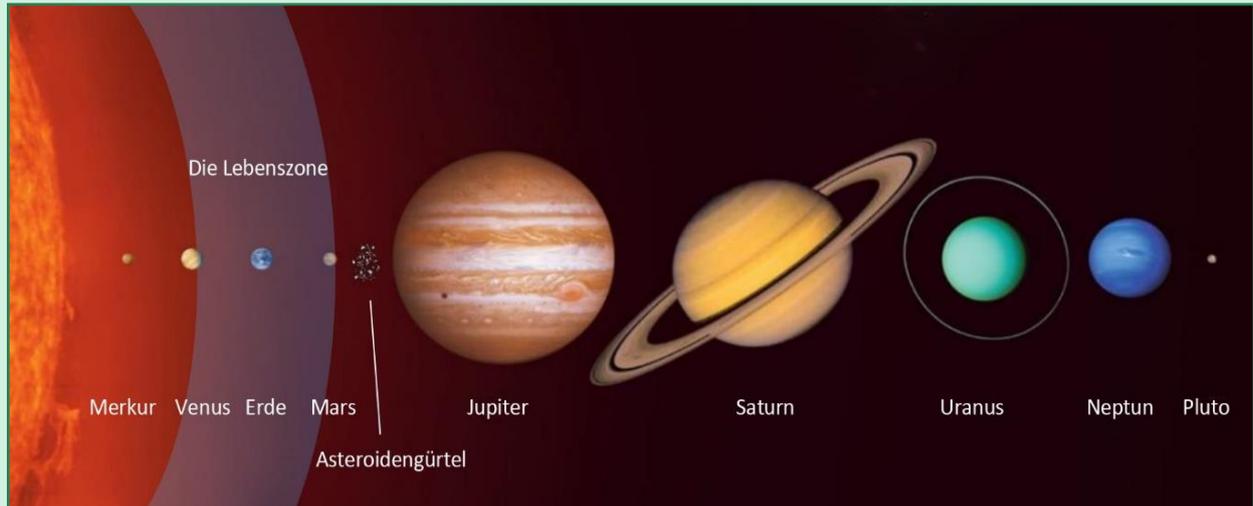
³⁷ Erste Anlaufstellen können NGOs wie z.B. Greenpeace, BUND, WWF oder NABU aber auch gemeinnützige Vereine sein.

Aktivität 1 – Die Erde im Sonnensystem

Was macht unsere Erde zu einem bewohnbaren Planeten?

Hintergrund:

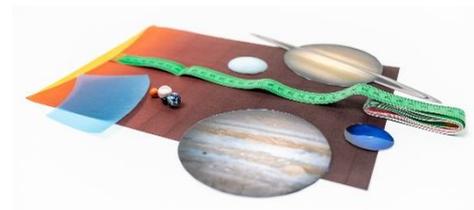
Die Erde zählt, wie Merkur, Venus und Mars, zu den inneren Gesteinsplaneten des Sonnensystems. Es folgt der Asteroidengürtel (mit ca. 650.000 Asteroiden!) und die vier Gasriesen Jupiter, Saturn, Neptun und Uranus sowie viele Zwergplaneten wie Pluto. Um alle Sterne, und damit auch um unsere Sonne, gibt es eine sogenannte Lebenszone - ein Bereich, in dem Wasser flüssig existieren kann. Die Erde und Mars befinden sich in der Lebenszone, jedoch nur die Erde ist bewohnbar. Warum?



Die Planeten unseres Sonnensystems im Größenmaßstab. Die Abstände untereinander sind hier deutlich zu klein dargestellt! (Credits: Scorza)

Materialien:

- ✓ Hintergrundbild mit Sonnenumriss (A3 Mappe)
- ✓ Planetenmodelle aus Holz ①
- ✓ Laminierte Gasplaneten (A3 Mappe + ①)
- ✓ blaue Lebenszone ①
- ✓ Maßband ①



Materialien für die Aktivität

Durchführung:

Teil 1: Wo befindet sich die Erde im Sonnensystem?

Der Abstand von der Sonne zur Erde beträgt ca. 150 Mio. km (diese Entfernung wird als *Astronomische Einheit* (AE) bezeichnet). In unserem Modell komprimieren wir diese Entfernung auf 10 cm. Der Radius der hellgelben Scheibe entspricht also einer AE. Die Lebenszone in unserem Sonnensystemmodell wird durch die 6 cm² blaue Transparentfolie dargestellt.

- Trage in dieser Größenskala die Abstände der Planeten zur Sonne sowie die Lage der Lebenszone in die Tabelle ein.



Ausschnitt der Sonne (Credits: Scorza)

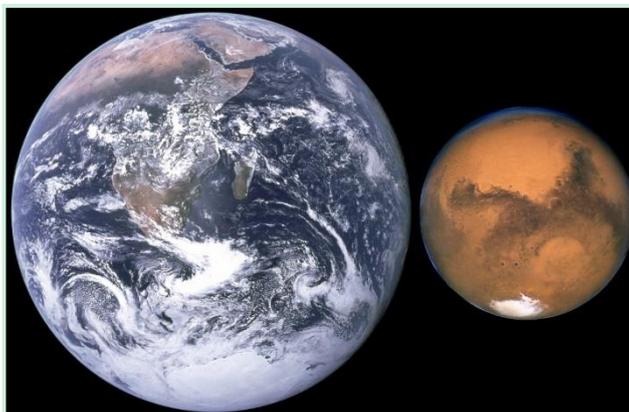
Planet	Abstand von der Sonne in AE	Abstand im Modell in cm
Merkur	0,4	
Venus	0,7	
Erde	1,0	10
Mars	1,5	
Jupiter	5,2	
Saturn	9,5	
Uranus	19,2	
Neptun	30,1	
Lebenszone (innerer Rand)	0,85	

→ Lege die hellgelbe Scheibe auf den Boden und platziere jeweils die Planetenkugeln, die Lebenszone und die Gasplaneten in der richtigen Entfernung entlang einer Linie auf dem Boden.

*Hinweis: Die Planeten werden im Vergleich zu den Abständen in diesem Modell viel zu groß dargestellt!
Der Maßstab der Planeten untereinander stimmt allerdings.*

Teil 2: Welche Rolle spielt die Masse für die Bewohnbarkeit der Erde?

- ? Wo befindet sich das Erdmodell bezüglich der Lebenszone?
- ? Platziere nun den Mars an die Stelle der Erde. Diskutiere, ob der Mars dann bewohnbar wäre. Vergleiche dabei die Masse des Mars ($6,4 \cdot 10^{23} \text{ kg}$) mit der der Erde ($5,9 \cdot 10^{24} \text{ kg}$) und überlege, wie die Dichte der Atmosphäre eines Planeten mit seiner Masse (und Anziehungskraft) zusammenhängt. Denke dabei an unseren Mond ($m = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$). Gibt es dort eine Atmosphäre?



Erde und Mars im Vergleich (Credits: NASA)

Aktivität 2 – Die Erde wird bestrahlt

Teil 1: Warum wird die Erde nicht immer heißer, obwohl sie ständig von der Sonne bestrahlt wird?

Hintergrund:

Wird ein kühler Körper durch Zuführung von Strahlungsenergie erwärmt, so strahlt er selbst auch immer mehr Energie in Form von thermischer Strahlung ab. Irgendwann nimmt er die gleiche Menge an Energie pro Sekunde auf, wie er selbst abstrahlt – er befindet sich dann im *Strahlungsgleichgewicht* und hat die *Gleichgewichtstemperatur* erreicht. Wie alle Planeten des Sonnensystems wird die Erde von der Sonne bestrahlt. Befindet sich die Erde im Strahlungsgleichgewicht?



Materialien:

- ✓ Halogen-Strahler am Rahmen
- ✓ Erdkugel mit Loch 2
- ✓ 1 Digitalthermometer
- ✓ Stoppuhr

Achtung! Sehr heißer Strahler: Verbrennungsgefahr!



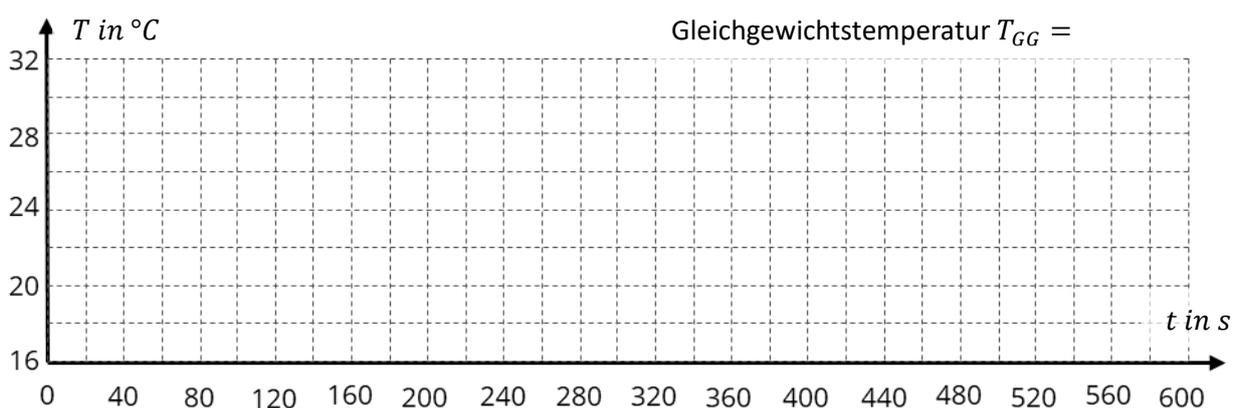
Durchführung:

Nehmt das Erdmodell und steckt das Digitalthermometer in die kleine Öffnung an einer Seite. Platziert die Erde direkt unter dem Strahler, sodass sie mit der höchsten Intensität bestrahlt wird.

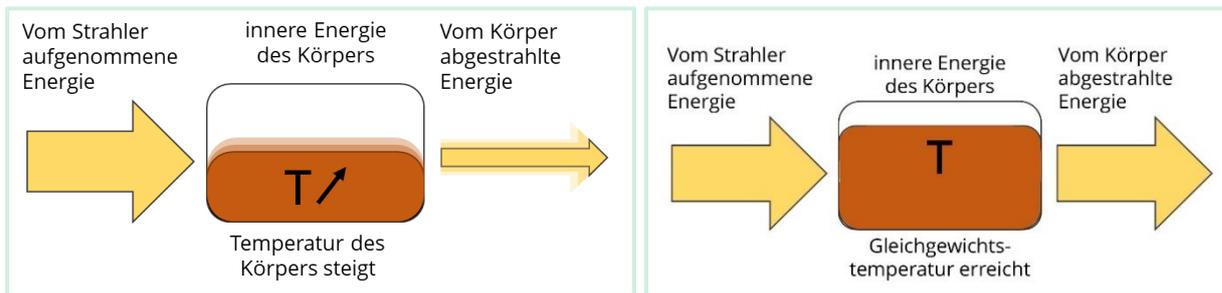
→ Messt die Temperatur der Erde alle 20 Sekunden für 10 Minuten und notiert die Ergebnisse in der Tabelle:

Zeit s	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
T in °C																
Zeit s	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	
T in °C																

→ Stellt die Ergebnisse grafisch im Diagramm dar:



→ Diskutiert das Messergebnis und erklärt, warum die Temperatur des Erdmodells nicht immer weiter ansteigt. Benutzt für die Diskussion und Interpretation die beiden folgenden Abbildungen. Verwendet dabei die Begriffe *Gleichgewichtstemperatur* und *Strahlungsgleichgewicht*.



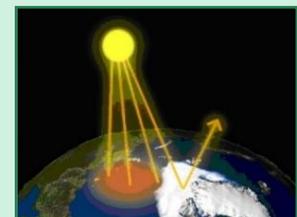
? Der Planet Venus befindet sich näher an der Sonne als die Erde. Was würde für die Temperatur auf der Erde folgen, wenn man sie an den Ort der Venus (bzw. des Mars) verschieben würde?



Teil 2: Welche Rolle spielen die Eisflächen für die Temperatur der Erde?

Hintergrund:

Helle Flächen auf der Erde, wie z.B. Eis und Schnee, reflektieren das einfallende Licht der Sonne stärker als z. B. Wasser oder der Erdboden. Dieses Rückstrahlvermögen einer Oberfläche wird als *Albedo α* (lat. "Weiße") bezeichnet. Für die gesamte Erde gilt $\alpha = 0,3$, d. h. ca. 30 % der einfallenden Strahlungsenergie werden reflektiert und tragen nicht zur Erwärmung bei. Der Verlust von weißen Flächen durch die globale Erderwärmung hat verheerende Auswirkungen für das Erdklima.



Albedo der Erde

Materialien:

- ✓ Halogen-Strahler am Rahmen
- ✓ Papierkörper „Eis“ und „Gestein“ ②
- ✓ 2 Digitalthermometer
- ✓ Stoppuhr

Achtung! Sehr heißer Strahler: Verbrennungsgefahr!

Durchführung:

→ Die beiden Thermometer werden jeweils in die gefalteten Papierkörper gesteckt. Der eine stellt das Gestein unter einem geschmolzenen Gletscher dar, der zweite eine intakte Eisfläche. Beide Testkörper werden so unter dem eingeschalteten Strahler platziert, dass sie mit gleicher Intensität bestrahlt werden.

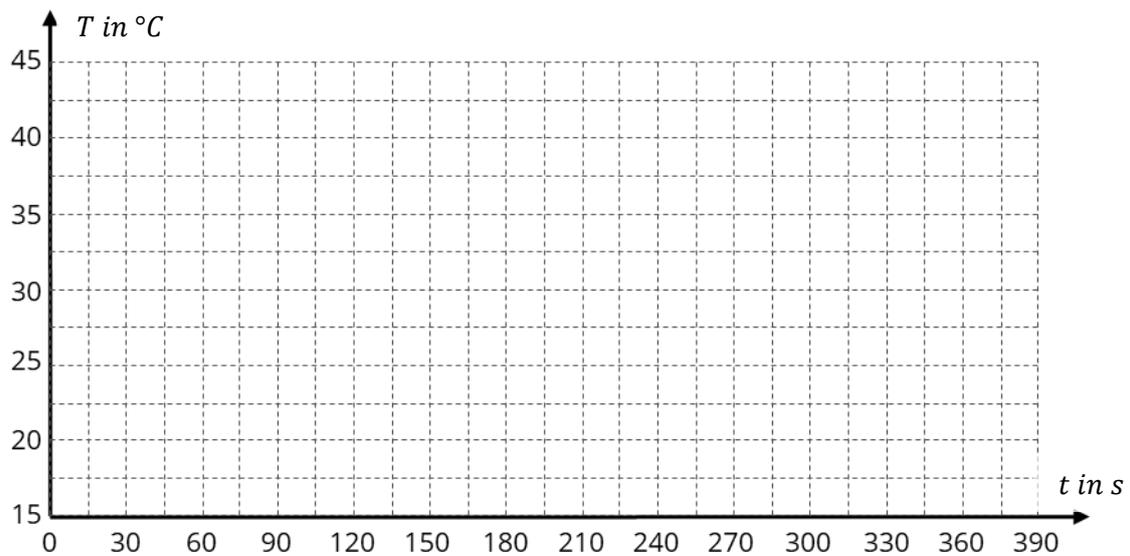


Experiment zur Albedo

→ Messt die Temperatur der beiden Papierkörper alle 30 Sekunden und notiert die Ergebnisse in der Tabelle.

Zeit in s	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390
Temperatur Schwarz in °C														
Temperatur Weiß in °C														

→ Stellt die Ergebnisse grafisch im Diagramm dar. Verwendet dabei unterschiedliche Farben.



→ Diskutiert das Messergebnis und erklärt die unterschiedlichen Temperaturverläufe. Verwendet dabei die Begriffe *Albedo*, *Gleichgewichtstemperatur* und *Strahlungsgleichgewicht*.

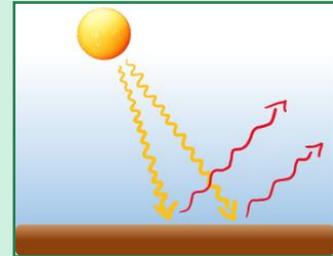
? Diskutiert, welche Auswirkungen das Schmelzen von Eis- und Gletscherflächen auf die Temperatur der Erde hat. Welche Auswirkungen hat das aktuell voranschreitende Abschmelzen der Polkappen?

Aktivität 3 – Die Erde, ein strahlender Planet

Teil 1: Können wir die Wärmestrahlung der Erde sichtbar machen?

Hintergrund:

Der Energietransport von der Sonne zur Erde findet über elektromagnetische Wellen statt. Der größte Anteil der Sonnenstrahlung besteht aus relativ kurzwelligem elektromagnetischen Wellen (*das für uns sichtbare Licht*), welche fast ungehindert durch die Atmosphäre dringen und den Erdboden erreichen. Dort werden sie dann zum Teil absorbiert. Der Erdboden strahlt diese aufgenommene Sonnenenergie dann als Wärmestrahlung in Form von *langwelliger Infrarotstrahlung* in Richtung Weltall ab. Insgesamt nimmt die Erde so viel Sonnenenergie auf, wie sie als Wärmestrahlung ins Weltall abgibt – sie befindet sich im *Strahlungsgleichgewicht*. Die Wärmestrahlung der Erde ist für uns unsichtbar. Wie kann man sie sichtbar machen und erforschen?



Kurzwellige Sonnenstrahlung (gelb) und langwellige Infrarotstrahlung (rot). (Credits: Scorza, Strähle)

Materialien:

- ✓ Wärmebildkamera



Durchführung:

Nicht nur die Erde, sondern alle Körper strahlen Wärmestrahlung ab! Hierbei gilt: Je wärmer ein Körper ist, umso intensiver ist die Wärmestrahlung. Eine Wärmebildkamera „übersetzt“ diese Wärmestrahlung in sichtbares Licht, sodass man sie auf dem Display sehen kann.

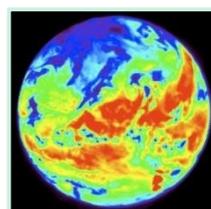
- Betrachtet mit der Wärmebildkamera Menschen ohne und mit Brille. Was könnt ihr beobachten? Welche Stellen im Gesicht sind wärmer, welche kälter?
- Wärmestrahlung kann man auch spüren! Fühlt vorsichtig neben einer Tasse mit warmem Tee oder einem anderen warmen Körper – beobachtet auch mit der Wärmebildkamera.
- Reibt eure Handflächen fünf Sekunden lang kräftig aneinander und drückt sie danach fünf Sekunden lang fest auf den Tisch. Betrachtet die Stelle nach dem Entfernen der Hände mit der Wärmebildkamera. Erklärt wie das Bild zustande kommt und auch, warum es wieder verschwindet. Reibt den Boden mit den Füßen. Was siehst du?
- ? Stellt eine Verbindung zwischen dem Verblassen des Handabdrucks und der strahlenden Erdoberfläche her! Warum kühlt der Erdboden nicht auch immer mehr ab?
- ? Betrachtet die folgenden Bilder a) der Erde und b) der Sonne. Könnt ihr erkennen, was in Bild c) abgebildet ist?



a) Erde



b) Sonne



c) ?

Teil 2: Welche Materialien sind durchlässig für sichtbares Licht, welche für die Infrarotstrahlung?

Hintergrund:

Sichtbares Licht und Infrarotstrahlung haben verschiedene Eigenschaften. Manche Materialien sind durchlässig für Infrarotstrahlung (IR-Strahlung) nicht aber für sichtbares Licht. Andere Materialien absorbieren hingegen Infrarotstrahlung (fangen sie also auf) und lassen sichtbares Licht ungehindert hindurch. Wir erkunden diese Eigenschaften nun selbst.



Materialien:

- ✓ Wärmebildkamera
- ✓ Frischhaltefolie und schwarze Folie ③
- ✓ luftgefüllter Ballon und wassergefüllter Ballon ③
- ✓ Petrischale aus Glas ③
- ✓ Papier und Schulbuch



Verschiedene Materialien zur Erforschung der IR-Strahlung

→ Untersucht mit der Hand als Strahlungsquelle und euren Augen bzw. der Wärmebildkamera die Durchlässigkeit verschiedener Materialien und ergänzt die Tabelle:

Material	Durchlässig für IR-Strahlung	Durchlässig für sichtbares Licht
Glas		
schwarze Tüte		
Papier		
luftgefüllter Ballon		
wassergefüllter Ballon		
Schulbuch		
Frischhaltefolie		

? Die Treibhausgase in der Atmosphäre lassen sichtbares Licht beinahe ungehindert hindurch, absorbieren aber Infrarotstrahlung. Welches der untersuchten Materialien weist ebenfalls diese Eigenschaften auf?

Aktivität 4 – Stellschraube für die Erdtemperatur

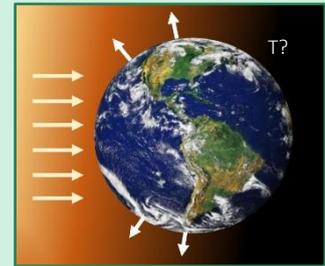


Moritz Strähle und
Cecilia Scorza

Welchen Einfluss haben Treibhausgase auf die Erdtemperatur?

Hintergrund:

Im Durchschnitt wird die Erdoberfläche über einen Tag verteilt mit $340 \frac{W}{m^2}$ („Watt pro Quadratmeter“) von der Sonne bestrahlt. Ca. 30% der Sonnenstrahlung werden z.B. durch Eisflächen und weiße Wolken in Richtung All reflektiert; die restliche Energie wird vom Erdboden absorbiert (aufgenommen) und in Form von unsichtbarer Wärmestrahlung (infrarot) wieder abgestrahlt. Die abgestrahlte Energiemenge ist gleich der eingestrahelten Energiemenge – die Erde befindet sich im *Strahlungsgleichgewicht*.



Die Erde wird von der Sonne bestrahlt und strahlt selbst

Mit dem *Stefan-Boltzmann-Gesetz* können wir nun die mittlere Temperatur auf der Erde abschätzen. Das Gesetz beschreibt, welche Strahlungsintensität I (in Watt pro m^2) ein Körper bei einer bestimmten Temperatur T abstrahlt:

$$I = \sigma \cdot T^4$$

σ (Sigma) ist eine Konstante, die zwischen Temperatur und Intensität „übersetzt“ $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$.

Je heißer ein Körper ist, desto mehr Strahlung gibt er ab, und zwar proportional zur vierten Potenz seiner Temperatur. Verdoppelt man die Temperatur eines Körpers strahlt er also pro Sekunde $2^4 = 16$ -mal mehr Energie ab! Welche Temperatur würde nun auf einer Erde ohne Atmosphäre herrschen?

Materialien:

- ✓ drei kurze Pfeile 4 und vier lange Pfeile (DIN A3-Mappe)
- ✓ acht Beschriftungen und vier Zahlenwerte 4
- ✓ Zwei DIN A3-Bögen: Erde mit und ohne Atmosphäre (DIN A3-Mappe)



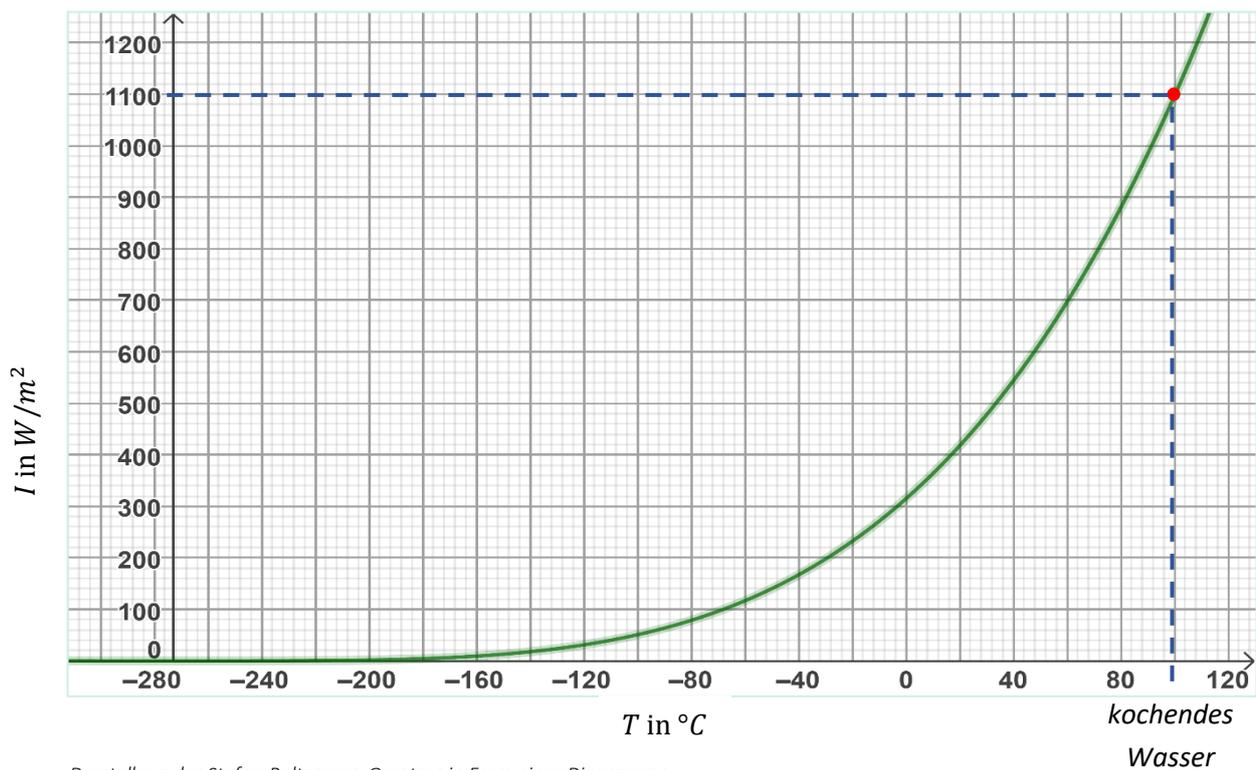
Teil 1: Wie hoch wäre die mittlere Temperatur auf einer Erde ohne Atmosphäre?

Durchführung:

- Pfeile legen: Legt auf der Seite „Erde ohne Atmosphäre“ die drei hellgrau umrandeten Pfeile und die hellgrauen Beschriftungen passend zum Hintergrundtext aus.
- Im Diagramm auf der nächsten Seite findet ihr eine grafische Darstellung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes. Wir werden uns nun damit vertraut machen! Ergänzt zuerst die fehlenden Temperaturwerte in der Tabelle (schätzen) und tragt sie dann in das Diagramm ein. Lest nun die entsprechenden Werte der entsprechenden Strahlungsintensität dieser Objekte im Diagramm ab und ergänzt sie ebenfalls in der Tabelle. Folgt dem Beispiel des kochenden Wassers.

Objekt	Temperatur °C	Intensität W/m ²
Kochendes Wasser	100	1100
Unser Körper		
Eiswürfel		

- Wenn ihr die Pfeile und Beschriftungen richtig gelegt und zugeordnet habt, wisst ihr, dass die Erde im Mittel $238 \frac{W}{m^2}$ Sonnenstrahlung absorbiert und diese Energie auch wieder abstrahlt (Strahlungsgleichgewicht). Ermittelt nun mit dem Diagramm die mittlere Temperatur einer Erde, die mit dieser Intensität Infrarotstrahlung abstrahlt und tragt sie entsprechend im Diagramm ein.
- ? Interpretiert das Ergebnis und verknüpft es mit der Realität: Lässt sich die mittlere Temperatur der Erde, die ihr ermittelt habt, mit euren Erfahrungen in Einklang bringen? Woran liegt das?
- ? Nicht einfache Zusatzfrage: Habt ihr eine Idee, warum es auf einer Erde ohne Atmosphäre in Wirklichkeit noch deutlich kälter wäre?



Darstellung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes in Form eines Diagramms.

Teil 2: Für welche Temperatur auf der Erde sorgt der natürliche Treibhauseffekt?

Hintergrund:

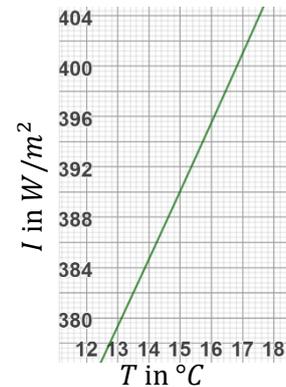
Ohne Atmosphäre wäre es auf der Erde also sehr kalt! Doch wie sorgt unsere Atmosphäre für angenehme Temperaturen auf der Erde? Das Licht der Sonne kann die Atmosphäre fast ungehindert durchdringen. Wir nehmen im Folgenden weiterhin an, dass die Erdoberfläche im Mittel mit $340 \frac{W}{m^2}$ von der Sonne bestrahlt wird, 30 % davon direkt zurück ins Weltall reflektiert und der Rest von der Erdoberfläche absorbiert wird. Allerdings gehen wir nun davon aus, dass die von der erwärmten Erdoberfläche abgestrahlte Wärmestrahlung von der Atmosphäre der Erde zu 76% absorbiert wird; der Rest (24%) gelangt ungehindert ins All. Die Energie der von der Atmosphäre abgefangene Wärmestrahlung wird nun gleichmäßig in alle Richtungen wieder abgegeben – ca. die Hälfte in Richtung Weltall, die andere Hälfte in Richtung Erdboden.



Erde mit Atmosphäre

Durchführung:

- Pfeile legen: Studiert den Hintergrundtext und legt auf der Seite „Erde mit Atmosphäre“ die beiden gelben hellgrau umrandeten, die vier dunkelgrau umrandeten Pfeile und alle Beschriftungen passend aus.
- Die Atmosphäre ist damit (zusätzlich zur Sonne) eine zweite Strahlungsquelle, die (bei unseren Annahmen) mit einer Intensität von $147 \frac{W}{m^2}$ in Richtung Erdboden strahlt. Diese Energie wird nun zusätzlich vom Erdboden absorbiert, welcher nun mit größerer Intensität auch wieder abstrahlen muss, um sich weiter im Strahlungsgleichgewicht zu befinden. Wie groß ist diese Strahlungsintensität und welche Temperatur hat dann der Erdboden? Verwendet das Diagramm rechts, das eine Vergrößerung des Diagramms oben darstellt. **Tipp:** Addiere die beiden Strahlungsintensitäten, die die Erde absorbiert.



Teil 3: Wie stark ist der anthropogene Treibhauseffekt?

Hintergrund:

Der natürliche Treibhauseffekt sorgt für angenehme Temperaturen und dafür, dass auf der Erde überhaupt Leben existieren kann! Doch nun kommt der Mensch ins Spiel: Durch den starken Ausstoß von Treibhausgasen wie Kohlenstoffdioxid oder Methan wird ein immer größerer Anteil der Infrarotstrahlung der Erde von der Atmosphäre absorbiert.



Ausstoß von Treibhausgasen

- ? Wir nehmen im folgenden Beispiel an, dass die Atmosphäre etwas mehr Strahlung der Erde absorbiert (in diesem einfachen Modell 78% statt 76%) und daher auch mit höherer Intensität abstrahlt, in diesem Fall wären das zusätzlich $6 \frac{W}{m^2}$ in Richtung Erdboden. Welche mittlere Temperatur folgt für den Erdboden, welcher nun wieder mit höherer Intensität strahlt?

Info: Der Weltklimarat (IPCC) nutzt Computermodelle, um Szenarien für das zukünftige Klima anzugeben. Die Szenarien schwanken von RCP 2,6 bis RCP 8,5, wobei die Zahl eine zusätzliche Strahlungsintensität von $2,6 \frac{W}{m^2}$ bzw. $8,5 \frac{W}{m^2}$ von der Atmosphäre in Richtung Erdoberfläche bedeutet.

Aktivität 5 – Die Wirkung von Treibhausgasen



Cecilia Scorza
und Moritz Strähle

Welche Wirkung haben Treibhausgase auf die Erdtemperatur?

Hintergrund:

Die Atmosphäre der Erde besteht hauptsächlich aus Stickstoff (78%) und Sauerstoff (21%). Treibhausgase wie beispielsweise Kohlenstoffdioxid (0,04%) und Methan (0,0002%) sind nur in Spuren vorhanden, haben aber trotzdem eine große Wirkung! Die Moleküle der Treibhausgase absorbieren die unsichtbare Infrarotstrahlung, die die Erdoberfläche abstrahlt, und werden dadurch in Schwingung versetzt. Diese Schwingungsenergie wird anschließend zum Teil in Form von Bewegungsenergie auf Teilchen in der Umgebung übertragen – die Atmosphäre erwärmt sich! Was passiert nun mit der Temperatur der Atmosphäre, wenn Menschen durch Verbrennung fossiler Brennstoffe große Mengen von CO₂ in die Atmosphäre freisetzen?



Absorption von IR-Strahlung durch

Teil 1: Kann CO₂ die unsichtbare Infrarotstrahlung „abfangen“?

Mit den folgenden beiden Experimenten kann man auf zwei verschiedenen Wegen beobachten, dass CO₂ Wärmestrahlung absorbiert.

Experiment: Strahlungsenergie erwärmt die Atmosphäre

Materialien:

- ✓ Keramik-Infrarotstrahler auf Rahmen
- ✓ Pappröhre auf Holzhalterung
- ✓ Stopfen, Frischhaltefolie und Gummis 
- ✓ Digitalthermometer
- ✓ Erlenmeyerkolben mit Stopfen und Schlauch
- ✓ Natron, Zitronensäure und Wasser



Achtung! Sehr heißer Strahler: Verbrennungsgefahr! Chemikalien: Schutzbrille tragen! Experiment: Absorption von Wärmestrahlung I

Vorbereitung:

- Steckt den Keramik-Infrarotstrahler mit der Holzhalterung auf die nach oben geklappten Füße des Holzrahmens (s. Bild).
- Verschließt die großen Öffnungen der Pappröhre mit Frischhaltefolie und Haushaltsgummis. Steckt das Thermometer in das kleine Loch in der Mitte (sodass die Spitze mittig in der Röhre ist) und verschließt die beiden anderen Löcher (CO₂-Zufuhr und Luftauslass) mit je einem Stopfen. Spannt die Dose dann mit weiteren Haushaltsgummis auf die Halterung (s. Bild) und steckt diese in die vorgesehenen Löcher im Rahmen.
- Schaltet den Infrarotstrahler ein. Lest euch, während sich der Strahler erwärmt, den Hintergrundtext aufmerksam durch und ordnet die Teile des Experiments den Entsprechungen in der Realität zu:

Luft in der Dose

Zusätzliche Treibhausgase

Keramik-Infrarotstrahler

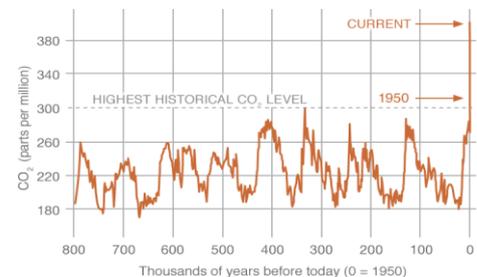
Atmosphäre der Erde mit normaler CO₂-Konzentration

Im Erlenmeyerkolben erzeugtes CO₂

Erdboden

Durchführung:

- Wartet, bis sich die Temperatur in der Dose innerhalb von 30 Sekunden nicht mehr ändert und man davon ausgehen kann, dass die *Gleichgewichtstemperatur* erreicht ist (ca. 30°C). *Notiert diese!*
- Erzeugt nun CO₂ und leitet es in die Dose: Je einen Teelöffel Natron und Zitronensäure im Erlenmeyerkolben (noch ohne Wasser) mischen, die beiden kleinen Stopfen aus der Dose entfernen, den Schlauch durch eines der Löcher schieben, etwas Wasser zur Säure-Natron-Mischung geben und den Stopfen mit Schlauch aufsetzen!
- Entfernt den Schlauch nach ca. einer Minute wieder und verschließt die Löcher wieder mit den kleinen Stopfen – die CO₂-Konzentration in der Dose ist nun stark erhöht (viel höher als sie es auf der Erde ist). Beobachtet die gemessene Temperatur in den nächsten Minuten und wartet, bis sich erneut *eine Gleichgewichtstemperatur* einstellt. Notiert deren Wert und vergleicht ihn mit dem Wert bei normaler CO₂-Konzentration in der Luft.
- Die CO₂-Konzentration der Atmosphäre wird in parts per million (ppm) gemessen. Es wird also angegeben, wie viele Moleküle CO₂ eine Million Moleküle trockene Luft enthält. Sucht im Internet nach „NASA CO₂“ und recherchiert dort die aktuelle CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Vergleicht auch mit den historischen Werten der letzten 800.000 Jahre in der Abbildung dort.



Quelle: NASA

- ? Was führt ca. seit dem 19. Jahrhundert zum beobachteten Anstieg der Treibhausgaskonzentration? Wie hängt das Experiment mit diesen Daten zusammen?

Zusatz-Experiment: Infrarotstrahlung wird abgefangen

Zusätzlich zur Messung der Temperatur in der Dose kann die Strahlung gemessen werden, welche durch die Dose hindurchgeht (Transmission).

Materialien:

- ✓ Materialien wie beim Experiment oben
- ✓ zusätzlich: Wärmebildkamera und Stativ



Experiment: Absorption von Wärmestrahlung II

Achtung! Sehr heißer Strahler: Verbrennungsgefahr! Chemikalien: Schutzbrille tragen!

Vorbereitung:

- Befestigt die Wärmebildkamera so auf dem Stativ, dass die Wärmestrahlung durch die Pappröhre auf die Messöffnung der Wärmebildkamera trifft und das Zielkreuz auf dem Wärmestrahler liegt.

Durchführung:

- Wartet, bis die Temperatur konstant bleibt (wie oben) und beobachtet dann die Temperaturanzeige beim Einfüllen von CO₂ in die Pappröhre.

Auswertung:

- Interpretiert das Ergebnis! Beachtet dabei, dass eine Wärmebildkamera die Temperatur eines Objektes über die ausgesandte Wärmestrahlung berechnet (s. Aktivität 4 – Stefan-Boltzmann-Gesetz).

Teil 2: Warum erwärmen Treibhausgase in der Atmosphäre den Erdboden?

Materialien:

- ✓ Keramik-Infrarotstrahler auf Rahmen
- ✓ Glas-Petrischale 3
- ✓ Holzklammer 10
- ✓ Wärmebildkamera



Absorption Modellatmosphäre

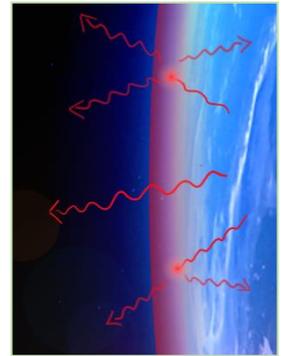


Rückstrahlung Modellatmosphäre

Durchführung:

- Die Glas-Petrischale wirkt im folgenden Versuch wie eine sehr dichte Treibhausgas-Atmosphäre, die fast die komplette Wärmestrahlung des Infrarotstrahlers (Modell für die strahlende Erdoberfläche) absorbiert. Beobachtet den Infrarotstrahler von vorne mit der Wärmebildkamera zunächst ohne Glasplatte und schiebt dann die Petrischale mit Hilfe der Holzzange dazwischen (linkes Bild). Beobachtet ca. eine Minute lang und notiert die Beobachtungen.
- Betrachtet nun (direkt im Anschluss) die Glasplatte aus Sicht der Erdoberfläche (rechtes Bild). Das hier im Modellversuch beobachtete Phänomen ist ein weiterer entscheidender Baustein zum Verständnis des Treibhauseffekts. Erklärt, indem ihr die Satzbausteine in die richtige Reihenfolge bringt:

- Durch die Aufnahme dieser Strahlungsenergie erwärmt sich die Atmosphäre.
- Treibhausgase in der Atmosphäre (Glas-Petrischale) absorbieren einen Teil der von der Erde ausgehenden Wärmestrahlung.
- Aufgrund dieser zweiten Strahlungsquelle (also Sonne + Atmosphäre) erwärmt sich die Erdoberfläche – und zwar umso stärker, je mehr Energie die Atmosphäre durch Treibhausgase absorbiert.
- Die Atmosphäre gibt die absorbierte Energie nun wiederum gleichmäßig in alle Richtungen ab, also auch in Richtung Erde.



Rückstrahlung von IR-Strahlung durch die Atmosphäre

Aktivität 6 – Der Anstieg des Meeresspiegels

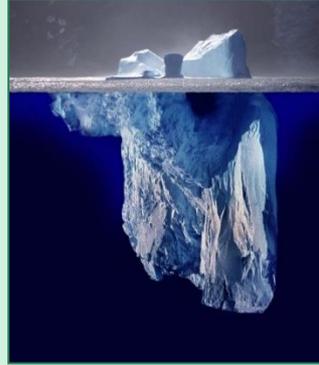
Wie führt der Klimawandel zu einem Anstieg des Meeresspiegels?

Hintergrund:

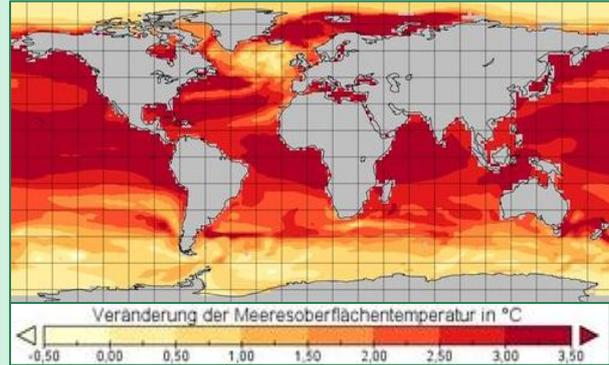
Auf Grund der globalen Erwärmung schmelzen aktuell große Eismassen an Land wie z.B. der Grönländische Eisschild oder Gletscher in den Alpen ab. Zudem steigt die Wassertemperatur der Ozeane an. Dies führt auch dazu, dass im Wasser schwimmende Eisberge schneller abschmelzen.



Gletscher auf Grönland
(Quelle: Wikipedia)



Fotomontage eines Eisbergs
(Credits: Uwe Kils)



Veränderung der Meeresoberflächentemperatur in °C
Vergleich der Mitteltemperatur 2070-2099 im Vergleich zu 1961-1990 im Szenario RCP8.5 (Quelle: wiki.bildungsserver.de)

Materialien:

- ✓ Halogen-Strahler am Rahmen
- ✓ Zwei 150 ml Bechergläser
- ✓ zwei bis vier Eiswürfel
- ✓ zwei flache Kieselsteine 6
- ✓ wasserlöslicher Filzstift
- ✓ Erlenmeyerkolben
- ✓ Glasrohr mit Gummistopfen



Achtung! Sehr heißer Strahler: Verbrennungsgefahr!



Experimente zum Anstieg des Meeresspiegels

Experiment 1: Steigt der Meeresspiegel aufgrund schmelzender Eisberge?

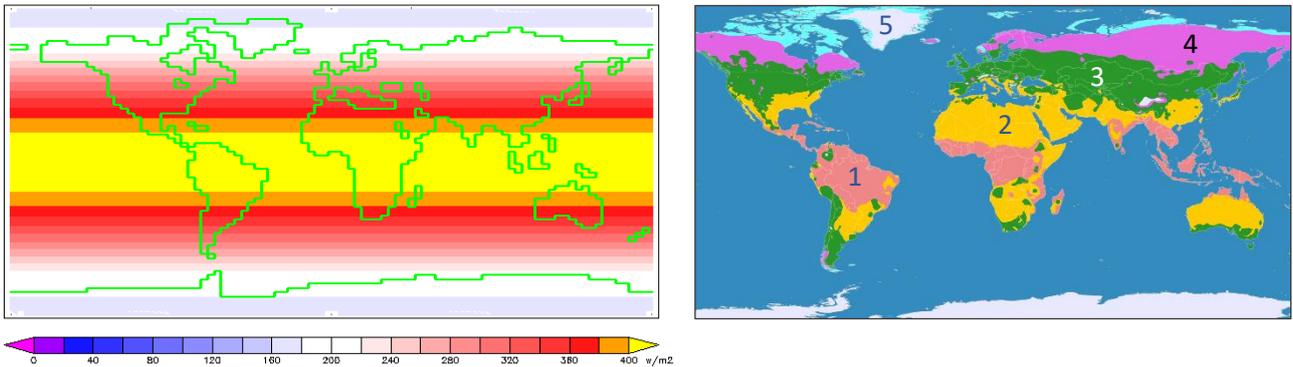
- Legt die Steine in eines der Bechergläser. Füllt dieses Becherglas soweit auf, dass nur der erste Stein unter Wasser ist und das andere mit ca. 80 ml Wasser. Legt dann einen Eiswürfel auf die Steine und lasst den anderen im zweiten Becherglas schwimmen. Stelle die Bechergläser unter den Strahler und markiert sofort jeweils den Wasserstand mit dem wasserlöslichen Filzstift! Fahrt mit dem nächsten Experiment fort.

Experiment 2: Steigt der Meeresspiegel aufgrund der Erwärmung des Wassers?

- Füllt den Kolben mit Wasser und verschließt ihn mit Gummistopfen und Glasrohr so, dass das Wasser im Rohr bis zur Hälfte steht und sich keine Luftblasen bilden (evtl. einige Versuche nötig).
- Markiert den Pegel mit dem wasserlöslichen Filzstift und erwärmt das Wasser im Kolben mit den Händen für einige Minuten. Beobachte die Wasserstände in allen drei Gefäßen!
- Notiert eure Beobachtungen zu den Experimenten und beschreibt in einer kurzen Zusammenfassung, warum es aufgrund der globalen Erwärmung zu einem Anstieg des Meeresspiegels kommt (und warum nicht). Bezieht euch dabei auch auf die Bilder des Hintergrundtexts sowie auf die Ergebnisse der Experimente.

Auswertung:

In der linken Abbildung ist der jährliche Mittelwert der Sonneneinstrahlung an der Oberseite der Atmosphäre in der Einheit W/m^2 dargestellt. In der rechten Abbildung die Einteilung der Erde in unsere fünf Hauptklimazonen.



Links: Jährlicher Mittelwert Sonneneinstrahlung Oberseite Atmosphäre; Rechts: Genetische Klimaklassifikation
(Quelle: links: William M. Conolley; rechts: Wikimedia)

→ Ordnet folgende Klimazonen den Zahlen 1 bis 5 zu und gebt je Zone ungefähre Werte der mittleren Sonneneinstrahlung an: *Subpolare Zone, Subtropische Zone, Gemäßigte Zone, Polare Zone, Tropische Zone*

Nummer	Klimazone	Mittlere Sonneneinstrahlung in W/m^2
1)		
2)		
3)		
4)		
5)		

→ Erklärt kurz den Zusammenhang zwischen der linken und der rechten obigen Abbildung.

Teil 2: Folgen des Klimawandels auf Klimazonen und Ökosysteme

Folge dem QR-Code und lies den Artikel zu den Folgen des Klimawandels auf die Klimazonen und den dort lebenden Tieren durch.

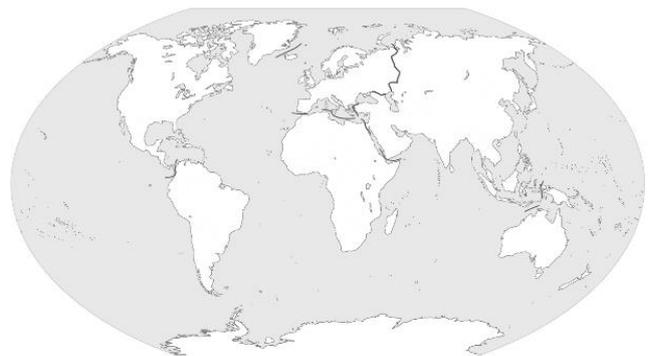


Auswertung:

→ Beschreibt, welche Folgen der Klimawandel auf die Klimazonen der Erde hat.

? Welche Auswirkungen hat der Klimawandel auf den Lebensraum der Tiere und welche Probleme ergeben sich hieraus?

→ *Zukunftsszenario:* Skizziert eine mögliche globale Verteilung der Klimazonen im Jahr 2100 in die untenstehende stumme Weltkarte ein. Färbt die Klimazonen entsprechend der Kennzeichnung aus Abb.2.



Stumme Weltkarte (Quelle: https://media.diercke.net/omeda/89090__Erde_Kontinente_und_Ozeane.pdf)

Aktivität 8 – Die Ozeane als Klimapuffer

Wie schützen uns die Ozeane vor einem noch stärkeren Klimawandel?

Hintergrund:

Etwa 2/3 der Erdoberfläche sind mit flüssigem Wasser bedeckt und das hat Auswirkungen auf das Erdklima. Denn Wasser ist ein sehr effektiver Wärmespeicher: Eine bestimmte Wassermasse kann deutlich mehr Energie pro Kelvin Temperaturerhöhung aufnehmen als z.B. die gleiche Masse an Luft. So erwärmt sich ein Kilogramm Wasser bei einer Energiezufuhr von 4,2 kJ um 1 K. Wasser hat demnach eine *Wärmekapazität* von $4,2 \frac{kJ}{kg \cdot K}$. Luft und trockene Erde hingegen haben eine Wärmekapazität von ca. $1 \frac{kJ}{kg \cdot K}$. Es genügt also rund ein Kilojoule, um ein Kilogramm dieser Stoffe um 1 K zu erwärmen.



Unsere blaue Erde (NASA)

Durch den vom Menschen verursachten Treibhauseffekt wird der Erdoberfläche zusätzliche Energie zugeführt. Wie wirkt sich das Wasser der Ozeane auf die globale Erwärmung aus?

Materialien:

- ✓ Luftballon, gefüllt mit Wasser 
- ✓ Teelicht und Streichholz 

Durchführung:

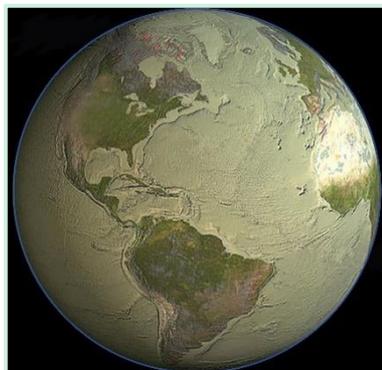
- Wie dicht traut ihr euch, den wassergefüllten Ballon über die Kerze zu halten? Nähert euch langsam der Flamme an!
- Fasst den Ballon nach einiger Zeit von unten an. Hat er sich stark erwärmt?



Wassergefüllter Luftballon über einer Kerze

Auswertung:

- Lest euch den Hintergrundtext durch und erklärt eure Beobachtungen.
- Durch den vom Menschen verursachten Treibhauseffekt wird der Atmosphäre zusätzliche Energie zugeführt. Erläutert warum die Auswirkungen ohne unsere Ozeane noch drastischer wären, als sie es heute bereits sind. Welche dieser zwei Erden hätte eine höhere Oberflächentemperatur?



Trockene Erde (Credits: Cook, Nieman, USGS)



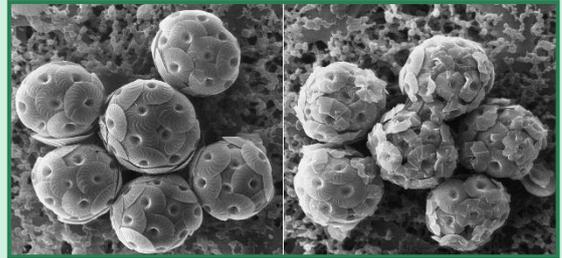
Die blaue Perle (Credits: NASA)

Aktivität 9 – Die Versauerung der Ozeane

Warum macht CO₂ die Ozeane sauer und welche Folgen hat dies?

Hintergrund:

Messungen des pH-Wertes in den Ozeanen zeigen eine zunehmende Versauerung des Wassers. Steigt in der Erdatmosphäre der Gehalt des Treibhausgases CO₂ (beispielsweise durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe), wird dieses auch vermehrt im Meerwasser gelöst und reagiert dort zu Kohlensäure ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$). Dies hat fatale Konsequenzen für das Leben dort lebender Algen und Tiere, die an das zunehmend saure Milieu nicht angepasst sind. Außerdem werden z. B. die Schalen von Kalkalgen dünner (siehe Abb.) und Korallen verlieren ihr Kalkskelett.



Kalkalgen: links heutiger Ozean, rechts Ozean mit hohem CO₂ Gehalt. [Quelle: IFM-GEOMAR]

Materialien:

- ✓ Zwei 50 ml Bechergläser
- ✓ Indikator Bromthymolblau mit pH-Wert-Tafel 
- ✓ Zitronensäure, Natron und Wasser
- ✓ Erlenmeyerkolben mit Gummistopfen und Schlauch

Achtung! Chemikalien: Schutzbrille tragen!



Versuchsaufbau

Durchführung:

- Gebt 20 ml Wasser in ein Becherglas und fügt ca. vier Tropfen des Indikators hinzu, bis sich die Lösung deutlich verfärbt.
- Notiert den pH-Wert der Lösung.
- Mischt im Erlenmeyerkolben je einen halben Teelöffel Zitronensäure und Natron und gebt anschließend vorsichtig etwas Wasser hinzu. Leitet sehr wenig (wichtig für Aktivität 10) vom entstehenden CO₂ mit dem Schlauch (nur einige „Blubber“) in das Wasser, bis sich die Lösung gelb verfärbt. Entfernt dann den Schlauch!
- Notiert den pH-Wert der Lösung.
- Beschreibt das Versuchsergebnis in einem Satz!

Nicht wegschütten:
Die Lösung im zweiten Becherglas
benötigst du für Aktivität 10!

Auswertung:

Beantworte mit Hilfe des Hintergrundtextes zu Versuch 1 und einer Internetrecherche mit nebenstehendem QR-Code folgende Fragen:

- ? Inwieweit tragen Ozeane scheinbar zu einer Verlangsamung des vom Menschen verursachten Treibhauseffektes bei?
- ? Welche Folgen hat die Versauerung der Ozeane für dessen Lebewesen?



Aktivität 10 – Freisetzung von CO₂ durch die Ozeane

Warum verstärkt die Erwärmung der Ozeane die globale Erwärmung?

Hintergrund:

Die Ozeane haben eine Doppelrolle bei der Milderung der globalen Erwärmung: Einerseits speichern sie Wärme, andererseits nehmen sie CO₂ aus der Atmosphäre auf. Wenn jedoch die Temperatur des Wassers zunimmt, verlieren diese Puffer ihre Wirkung: Warmes Wasser nimmt weniger Wärme auf, da die Temperaturdifferenz zur Umgebung geringer wird, und es kann zudem weniger CO₂ lösen, sodass es dies bei höheren Temperaturen sogar wieder freisetzt! Außerdem führt die Versauerung zu einer Auflösung von Kalk, wodurch zusätzliches CO₂ in die Atmosphäre gelangt. Der Wasserdampf, der durch die erhöhten Wassertemperaturen in stärkerem Maße entsteht, ist als Treibhausgas deutlich stärker als CO₂ und führt so zu einer zusätzlichen Verstärkung des Treibhauseffekts.

Materialien:

- ✓ 20 ml saure Lösung (Aktivität 9)
- ✓ Zweites 50 ml Becherglas
- ✓ Teelicht und Streichhölzer 
- ✓ pH-Wert-Tafel 

Achtung! Chemikalien: Schutzbrille tragen!



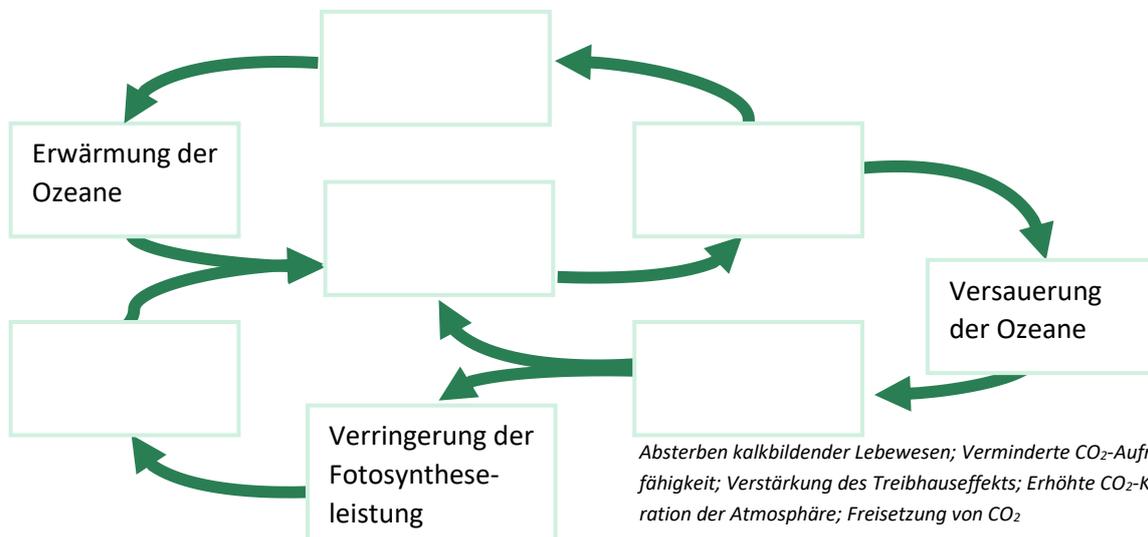
Versuchsaufbau

Durchführung:

- Verteilt die saure Lösung gleichmäßig auf die zwei Bechergläser und stellt eines der Gläser zum späteren Vergleich beiseite.
- Erhitzt die saure Lösung in einem der beiden Bechergläser über dem Teelicht für ca. zwei Minuten. Stellt das Glas dann neben die Vergleichslösung und warte noch einige Minuten.
- Stelle die Bechergläser auf einen weißen Hintergrund. Was kannst du beobachten? Gib evtl. noch 1-2 Tropfen Indikatorlösung in beide Bechergläser.

Auswertung:

- Vervollständigt folgendes Flussdiagramm mit den gegebenen Textbausteinen und verknüpft es mit dem Experiment. Welche Aspekte des Experiments entsprechen der Realität, welche nicht?



Aktivität 11 – Kippunkte: Wenn das Klima kippt...

Wird der Klimawandel irgendwann nicht mehr zu bremsen sein?

Hintergrund: Rückkopplungen und Kippunkte

Beim „Kippen“ mit einem Stuhl kann man sich, indem man sich an einen Tisch abdrückt, in eine Schiefelage bringen - je stärker, umso mehr. Drückt man nicht mehr gegen den Tisch, kehrt man wieder in seine Ausgangsposition zurück. Doch wehe man stößt sich einmal auch nur ein kleines bisschen zu viel ab...

Das Klimasystem der Erde verhält sich leider ähnlich und könnte in naher Zukunft, wenn auch nur eine Gigatonne zu viel an Treibhausgasen ausgestoßen wird, unwiderruflich kippen.



Materialien:

- ✓ verbundene Holzschienen
- ✓ Holzrahmen
- ✓ Metallstab 
- ✓ Tischtennisball 
- ✓ Laufgewicht 50g 
- ✓ Tütchen 
- ✓ 12 Muttern (M6) 



Modellversuch zu den Kippunkten im Klimasystem der Erde

Analogie:

- Setzt den Aufbau wie in der Abbildung gezeigt zusammen. Das Tütchen ist vorerst leer, das Laufgewicht so eingestellt, dass sich der Aufbau (mit Tischtennisball) in der Waagrechten befindet.

Die Position des Balls symbolisiert den Zustand des Erdklimas und wie stabil dieses ist. Der Rechtswert x entspricht der Erhöhung der Durchschnittstemperatur der Erde gegenüber heute. In der Ausgangsposition befindet sich das Erdklima in einer relativ stabilen Lage.

- Stoßt nun Treibhausgase aus, indem ihr eine Mutter in den Behälter legt, und beobachtet, wie die Temperatur auf der Erde (x -Wert) ein klein wenig ansteigt. Eine Mutter entspricht hier ca. 40 Gt CO₂, dem weltweiten Ausstoß aufgrund fossiler Brennstoffe innerhalb eines Jahres.



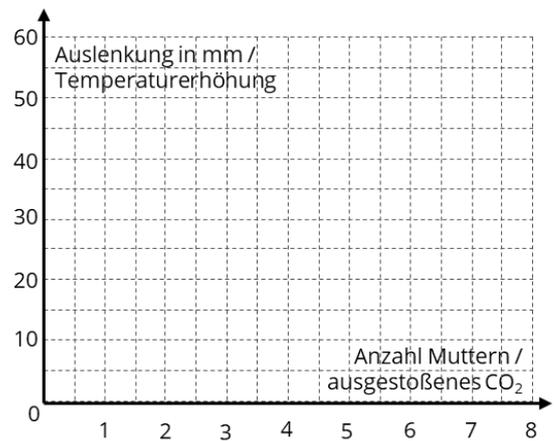
Waldbrand (Quelle: Pixabay.de)

Die verheerenden Waldbrände von 2019/20 in Australien haben ca. 30 Gt CO₂ freigesetzt. Sie waren die Folge einer ungewöhnlich langdauernden Dürre. Die Vernichtung der Wälder aufgrund der Temperaturerhöhung ist ein Beispiel für einen Kippunkt: Der Klimawandel bringt mehr Schädlinge, Feuer, Stürme und Dürren mit sich. Dadurch kollabieren vor allem die nördlichen Wälder. Das freigesetzte CO₂ beschleunigt dann den Klimawandel weiter.

Versuch 1: Kleine Ursache, kleine Wirkung

Der Zusammenhang zwischen der eingelegten Mutter und der Position x des Balls soll nun genauer untersucht werden:

- Legt nacheinander acht Mutttern in den Behälter und tragt jeweils die Ruhelage des Balls in das Diagramm ein. Wie weit ist er am Schluss von der Ruhelage am Anfang entfernt?
Hinweis: Wenn ihr meint, der Ball hänge fest, gebt ihm einen leichten Stoß und lasst ihn neu einpendeln.



- Der Ball liegt weiterhin links. Nehmt nun die Mutttern nach und nach wieder aus dem Behälter (CO_2 wird der Atmosphäre entzogen) und markiert die Ruhelage mit einem Stift anderer Farbe und tragt die Werte in den gleichen Graphen ein.
- ? Welcher mathematische Zusammenhang besteht, unter Berücksichtigung von Messfehlern, in diesem Modellexperiment?

Versuch 2: Kleine Ursache, große Wirkung

Wir untersuchen nun den Kippunkt, an dem das System in einen anderen Zustand übergeht.

- Schätzt, ohne den Versuch durchzuführen, ab welcher Position der Ball auf die andere Seite rollen wird und wie vielen Mutttern dies entspricht.
- Überprüft eure Vermutung im Experiment. Legt nach und nach so viele Mutttern in den Behälter, bis das Klimasystem kippt.
- Entzieht der Erdatmosphäre nun das zugeführte CO_2 wieder (Mutttern aus dem Tütchen entnehmen).
- Beantwortet zur Auswertung die folgenden Fragen:
 - ? Wo liegt der tatsächliche Kippunkt im Vergleich zu deinem geschätzten?
 - ? Geht der drastische Temperaturanstieg zurück, wenn man das zugeführte CO_2 der Atmosphäre wieder entzieht?

Kippunkte sind beim Klimawandel entscheidend für die katastrophale Dynamik: Wenn ein Kippunkt ausgelöst wird, ist das in der Realität nicht unmittelbar zu spüren, aber es setzt sich ein Ablauf in Gang, der nicht mehr umkehrbar ist! Ein Beispiel: Das Eis auf dem Nordpolarmeer reflektiert Sonnenlicht. Schmilzt ein Teil des Eises, so kann wegen der geringeren Rückstrahlung mehr Sonnenenergie das Meer erwärmen. Dann schmilzt das noch vorhandene Eis schneller. Der Teufelskreis ist irgendwann nicht mehr aufzuhalten. Wie beim Dominospiel gibt es im Klimasystem der Erde eine Kaskade von Kippunkten. Einer kann jeweils den nächsten auslösen und die Temperaturerhöhung wird so unkalkulierbar.

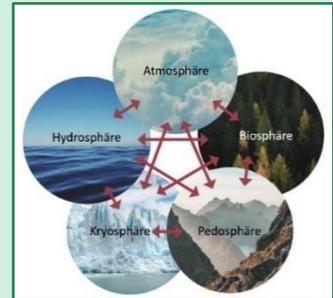
- Das Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung (PIK) setzt sich wissenschaftlich mit solchen Kippunkten auseinander. Recherchiere unter „PIK Kippelemente“ (QR-Code) weitere Kippunkte.



Was sind Kippunkte und wie hängen sie zusammen?

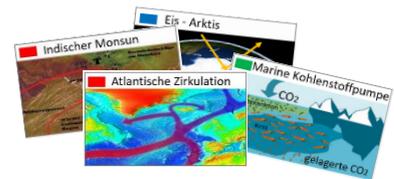
Hintergrund:

Das globale Klimasystem der Erde wird durch die *Wechselwirkung* zwischen den Hauptbestandteilen des Klimasystems bestimmt: Hydrosphäre (Wasser), Atmosphäre (Luft), Kryosphäre (Eis und Schnee), Pedosphäre und Lithosphäre (Böden und Gestein) und die Biosphäre (Lebewesen). Die globale Erderwärmung setzt Prozesse in Gang, die diese verschiedenen Elemente auf verschiedene Arten beeinflussen und verändern. Einige dieser Prozesse sind *selbstverstärkend*: So führt z.B. die globale Erwärmung zur mehr Verdunstung von Wasser; und da Wasserdampf ein Treibhausgas ist, erhöht sich dadurch die Temperatur der Atmosphäre, was wiederum zu vermehrter Wasserverdunstung führt. Wegen dieser *selbstverstärkenden Rückkopplungsprozesse* kann das Erdklimasystem, wenn eine bestimmte Schwelle überschritten wird, in den unkontrollierbaren Zustand einer Heizeit übergehen. Man spricht von einem *Kippunkt*. „Kippen“ bedeutet dann, dass diese Veränderungen, da sie sich selbst immer mehrverstrken, dann weder aufzuhalten noch rückgängig zu machen sein werden. Die Umweltauswirkungen der Kippunkte sind weitreichend und könnten die Lebensgrundlagen vieler Millionen Menschen gefährden.



Materialien:

- ✓ Jeweils 14 Kärtchen: Abbildungen (A) und Erläuterungen (B) zu den Kippunkten



Durchführung:

Auf der Weltkarte sind Kippunkte und die betroffenen Teile des Klimasystems in unterschiedlichen Farben eingezeichnet: Eiskörper ■ Strömungssysteme ■ Ökosysteme ■

- Legt die 14 Kärtchen mit den Abbildungen der Kippunkte (A) auf den Tisch und sortiert sie nach der Farbe. Legt rechts davon die Kärtchen mit den Erläuterungen und Fragen zu den Kippunkten (B) aus.
- Ordnet die Kärtchen (B) den entsprechenden Kärtchen (A) zu und bildet die zugehörigen Paare. Beginnt mit der blauen Arktis-Karte (A)!
- Betrachtet erneut die Weltkarte und beantwortet mit Hilfe der Kartenpaare die folgenden Fragen:



a) Wie verändert sich die Kryosphäre (Eis) durch den Klimawandel? ■

b) Wie verändern sich die Strömungssysteme durch den Klimawandel? ■

c) Wie verändern sich die Ökosysteme durch den Klimawandel? ■



Geographische Einordnung der Kippelemente im Erdklimasystem (Quelle: PIK, 2007)

Literatur

- [1] R. M. Ramirez und L. Kaltenegger, „A Volcanic Hydrogen Habitable Zone,“ *The Astrophysical Journal Letters*, 1 März 2017.
- [2] „LEIFiPhysik,“ Joachim Herz Stiftung, 2022. [Online]. Available: <https://www.leifiphysik.de/astronomie/sonne/grundwissen/energie-der-sonne#:~:text=Die%20Strahlungsenergie%20der%20Sonne%20pro,85%E2%8B%851026J..> [Zugriff am 10.02.2022].
- [3] „Wikipedia,“ Wikipedia, 13.01.2022. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches_Strahlungsgesetz#:~:text=Das%20Plancksche%20Strahlungsgesetz%20gibt%20f%C3%BCr,Wellenl%C3%A4nge%20oder%20oder%20Frequenz%20an.&text=Plancks%20Herleitung%20des%20Strahlungsgesetzes%20gilt%20daher%20heute%20als%20die. [Zugriff am 10.02.2022].
- [4] H. D. Baehr und K. Stephan, in *Wärme- und Stoffübertragung*, Bochum und Stuttgart, Springer, 2008, pp. 616-622.
- [5] G. Kopp und J. L. Lean, „A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance,“ *Geophysical Research Letters*, Bd. 38, Nr. 1, Januar 2011.
- [6] B. Klose und H. Klose, „Meteorologie,“ in *Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*, Oldenburg, Springer, 2016, pp. 212-213.
- [7] „Wiki Bildungsserver,“ Hamburger Bildungsserver, 3. Dezember 2013. [Online]. Available: [https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Albedo_\(einfach\)](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Albedo_(einfach)). [Zugriff am 27. Mai 2020].
- [8] P. D. Jones, M. New, D. E. Parker, S. Martin und I. G. Rigor, „Surface air temperature and its changes over the past 150 years,“ *Reviews in Geophysics*, Bd. 37, Nr. 2, p. 173–199, 1999.
- [9] P. T. Doran und M. K. Zimmerman, „Examining the Scientific Consensus on Climate Change,“ *Eos*, Bd. 90, Nr. 3, pp. 22-23, 2009.
- [10] S. Rahmstorf und H. J. Schellnhuber, *Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie*, München: C.H.Beck, 2018.
- [11] „EU Science Hub,“ [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/global-fossil-co2-emissions-increased-2017>. [Zugriff am 20. Mai 2020].
- [12] T. F. Stocker, D. Qin und e. al., „Climate Change 2013,“ Cambridge University Press, New York, 2013.
- [13] „Umweltbundesamt,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/lachgas-methan>. [Zugriff am 21.09.2020].
- [14] „The NOAA Annual Greenhouse Gas Index,“ NOAA, [Online]. Available: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>. [Zugriff am 21.09.2020].
- [15] T. M. Lenton, J. Rockström, O. Gaffney, S. Rahmstorf, K. Richardson, W. Steffen und H. J. Schellnhuber, „Climate tipping points - too risky to bet against,“ *Nature*, Bd. 575, pp. 592-596, 2019.
- [16] „Wiki Bildungsserver,“ Hamburger Bildungsserver, 10. September 2020. [Online]. Available: https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Gr%C3%B6nl%C3%A4ndischer_Eisschild. [Zugriff am 21.09.2020].

- [17] „Scinexx,“ MMCD NEW MEDIA GmbH, 20 Dezember 2004. [Online]. Available: <https://www.scinexx.de/news/geowissen/wird-der-amazonas-regenwald-zur-steppe/>. [Zugriff am 21 09 2020].
- [18] „Wiki Bildungsserver,“ Hamburger Bildungsserver, 02 Dezember 2015. [Online]. Available: https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Kippunkte_im_Klimasystem. [Zugriff am 21 09 2020].
- [19] „Wiki Bildungsserver,“ Hamburger Bildungsserver, 5 Dezember 2013. [Online]. Available: https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Kohlenstoff_im_Ozean. [Zugriff am 21 09 2020].
- [20] D. Coumou, S. Rahmstorf und weitere, „A decade of weather extremes,“ *Nature*, 2012.
- [21] X. Chen, X. Zhang, J. Church, C.S. Watson, M. King, D. Monselesan, B. Legresy und C. Harig, „The increasing rate of global mean sea-level rise during 1993–2014,“ *Nature Climate Change*, Bd. 7, pp. 492–495, 2017.
- [22] P. Christoffersen und M. B. e. al., „Significant groundwater contribution to Antarctic ice streams hydrologic budget,“ *Geophysical Research Letters*, Bd. 41, Nr. 6, pp. 2003-2010, 2014.
- [23] B. Schinke, S. Harmeling, R. Schwarz, S. Kreft, M. Treber und C. Bals, „Globaler Klimawandel: Ursachen, Folgen, Handlungsmöglichkeiten,“ Germanwatch, Bonn, 2011.
- [24] C. Jakobeit und C. Methmann, „Klimaflüchtlinge,“ Universität Hamburg, Hamburg, 2007.
- [25] J. A. Church, N. J. White, L. F. Konikow, C. M. Domingues, J. G. Cogley, E. Rignot, J. M. Gregory, M. R. v. d. Broeke, A. J. Monaghan und I. Velicogna, „Revisiting the Earth’s sea-level and energy budgets from 1961 to,“ *Geophysical Research Letters*, Bd. 38, Nr. 18, pp. 1944-2007, 2011.
- [26] „ZAMG,“ 09 08 2021. [Online]. Available: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/klimafakten-oesterreich-kompakt>. [Zugriff am 10 02 2022].
- [27] K. W. Steininger, M. König, B. Bednar-Friedl, L. Kranzl, W. Loibl und F. Prettenhaler, „Economic Evaluation of Climate Change Impacts,“ in *Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria*, Graz, Vienna, Springer, 2015, pp. 56-59.
- [28] „Agrarmarkt Austria,“ 09 08 2017. [Online]. Available: <https://www.ama.at/allgemein/presse/2017/getreideernte-2017-trockenheit-schmaelert-ertraege>. [Zugriff am 10 02 2022].
- [29] R. u. T. Bundesministerium für Landwirtschaft, „Wasserschatz Österreichs - Grundlagen für nachhaltige Nutzungen des Grundwassers,“ Bundesministerium, Wien, 2021.
- [30] „Climate Woodlands,“ 16 05 2019. [Online]. Available: <https://climate-woodlands.extension.org/carbon-budgets/>. [Zugriff am 11 02 2022].
- [31] W. Steffen, J. Rockström, K. Richardson, T. M. Lenton, C. Folke, D. Liverman, C. P. Summerhayes, A. D. Barnosky, S. E. Cornell, M. Crucifix, J. F. Donges, I. Fetzer, H. Schellnhuber und weitere, „Trajectories of the Earth System in the Anthropocene,“ *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Bd. 115, Nr. 33, pp. 8252-8259, 2018.
- [32] J. Rogelj, P. Forster, E. Kriegler, C. Smith und R. Seferian, „Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets,“ *Nature*, Bd. 571, pp. 335-342, 2019.

- [33] G. Kirchengast und K. Steininger, „Treibhausgasbudget für Österreich auf dem Weg zur Klimaneutralität 2040,“ Wegener Center, Graz, 2021.
- [34] B. Bachleitner, „invest in austria,“ [Online]. Available: <https://investinaustria.at/de/sectoren/umwelttechnik/erneuerbare-energien.php#:~:text=%C3%96sterreich%20muss%20gem%C3%A4%C3%9F%20EU%2DVorgaben,in%20%C3%96sterreich%2032%2C8%20Prozent..> [Zugriff am 10 02 2020].
- [35] A. Veigl, „Energiezukunft Österreich,“ Global 2000, Greenpeace und WWF, 2015.
- [36] P. D. V. Quaschnig, „Was kollabiert noch alles nach Corona?,“ [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=6V-C5q4VxEI>. [Zugriff am 17 03 2021].
- [37] Umweltbundesamt, „Klimaschutzbericht 2021,“ Wien, 2021.
- [38] Umweltbundesamt, „www.probas.umweltbundesamt.de,“ [Online].
- [39] „Energieszenarien,“ *Sonnenergie*, Nr. Dezember 2020, 2020.
- [40] P. D. V. Quaschnig, „volker-quaschnig.de,“ [Online]. Available: <https://www.volker-quaschnig.de/datserv/ren-Strom-D/index.php>. [Zugriff am 17 03 2021].
- [41] BMK, „Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie,“ [Online]. Available: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/nachhaltigkeit/bildung/fussabdruck_rechner.html. [Zugriff am 10 02 2022].
- [42] U. E. M. I. u. T. Bundesministerium für Klimaschutz, 01 01 2022. [Online]. Available: https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen_wohnen_und_umwelt/energie_sparen/1/raus_aus_oel.html. [Zugriff am 16 02 2022].
- [43] J. A. Robert Goodland, „Livestock and Climate Change,“ <http://templatelab.com/livestock-and-climate-change/>, 2009.
- [44] B. P. Austria. [Online]. Available: <https://pvaustria.at/forderungen/>. [Zugriff am 16 02 2022].
- [45] R. B. Fishman, „Schlechtes Gewissen, gutes Geld und faule Kompromisse,“ Deutschlandfunk Kultur, 24 11 2020. [Online]. Available: https://www.deutschlandfunkkultur.de/co2-kompensation-schlechtes-gewissen-gutes-geld-und-faule.976.de.html?dram:article_id=488040. [Zugriff am 17 03 2021].
- [46] B. Gaul, „Kurier,“ 03 09 2019. [Online]. Available: <https://kurier.at/politik/inland/325-milliarden-ministerium-zeigt-liste-klimaschaedlicher-subventionen/400594916>. [Zugriff am 10 02 2022].
- [47] R. Goodland und J. Anhang, „Livestock and climate change,“ *World Watch*, Bd. 22, pp. 10-19, November 2009.
- [48] „Beobachteter Klimawandel,“ Umweltbundesamt, [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/beobachteter-klimawandel>. [Zugriff am 21 09 2020].
- [49] „Klimafolgen: Handlungsfeld Wasser, Hochwasser- und Küstenschutz,“ Umweltbundesamt, 04 09 2013. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/klimafolgen-deutschland/klimafolgen-handlungsfeld-wasser-hochwasser#wasserverfuegbarkeit-und-hitze>. [Zugriff am 21 09 2020].

- [50] J. Swim, P. Stern, T. Doherty, S. Clayton, J. Reser, E. Weber, R. Gifford und G. Howard, „Psychology's contributions to understanding and addressing global climate change,“ *American Psychologist*, Bd. 66, Nr. 4, p. 241–250, 2011.
- [51] „Am 15. März ist CO2-Tag: Deutschland am Limit,“ Zukunft Erdgas e.V., 2020. [Online]. Available: <https://zukunft.erdgas.info/ueber-zukunft-erdgas/experten-leistungen/kommunikation/kampagnen/co2-budget-deutschland>.
- [52] „Treibhausgas-Emissionen in Deutschland,“ Umweltbundesamt, 06 07 2020. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>. [Zugriff am 22 09 2020].
- [53] „Klima-Report Bayern 2015,“ Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, München, 2015.
- [54] „Was haben Moore mit dem Klima zu tun?,“ Deutsche Gesellschaft für Moor- und Torfkunde e.V., 2009.
- [55] V. Quaschnig, „Sektorkopplung durch die Energiewende,“ Hochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin, 2016.
- [56] V. Quaschnig, „volker-quaschnig.de,“ [Online]. Available: <https://www.volker-quaschnig.de/grafiken/index.php>. [Zugriff am 12 10 2020].
- [57] Umweltbundesamt, „CO2-Bepreisung in Deutschland,“ 2019.
- [58] D. G. f. M.-. u. T. e.V., „Was haben Moore mit dem Klima zu tun?,“ 2009.
- [59] B. f. Naturschutz. [Online]. Available: <https://www.bfn.de/themen/biotop-und-landschaftsschutz/moorschutz/moore-entstehung-zustand-biodiversitaet/moortypen.html>. [Zugriff am 20 10 2020].
- [60] H. Höper, „Freisetzung klimarelevanter Gase aus deutschen Mooren,“ *Telma*, Bd. 37, pp. 58-116, 2007.
- [61] A. u. M. D. Freibauer, „Moor unter: Klimaschutz,“ *Politische Ökologie*, Bd. 30, pp. 98-105, 2012.
- [62] „klimawandel-meistern.bayern.de,“ Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, [Online]. Available: <https://www.klimawandel-meistern.bayern.de/moorschutz.html>. [Zugriff am 20 10 2020].
- [63] M. & K. M. Drösler, „Klimaschutz durch Moorschutz – im Klimaprogramm Bayern (KLIP 2020/2050),“ *Anliegen Natur*, Bd. 42, Nr. 1, pp. 31-38, 2020.
- [64] C. u. S. C. Buchal, *Klima – Die Erde und ihre Atmosphäre im Wandel der Zeiten*, Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung, Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren, 2010.
- [65] G. Schröder, „Energiewende in Gefahr - Deutschland braucht mehr grünen Strom,“ Deutschlandfunk Kultur, [Online]. Available: https://www.deutschlandfunkkultur.de/energiewende-in-gefahr-deutschland-braucht-mehr-gruenen.976.de.html?dram:article_id=481356. [Zugriff am 17 03 2021].
- [66] ZDF, 28 11 2019. [Online]. Available: <https://www.zdf.de/nachrichten/heute/klickscham-wie-viel-co2-e-mails-und-streaming-verusachen-100.html>.
- [67] BMWI, „Energiedaten: Gesamtausgabe,“ 2019.

- [68] Umweltbundesamt, „Umweltschädliche Subventionen in Deutschland 2016,“ 2016.
- [69] Umweltbundesamt, „<https://www.umweltbundesamt.de/>,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#definition-und-einflussfaktoren>. [Zugriff am 07 10 2020].
- [70] K. Kraigher, „Austrian Energy Agency,“ 04 2021. [Online]. Available: https://www.energyagency.at/aktuelles-presse/presse/detail/artikel/bund-und-laender-koennen-ihre-klimaziele-nur-in-enger-zusammenarbeit-erreichen.html?no_cache=1. [Zugriff am 10 02 2022].
- [71] M. Anderl, K. Geiger, B. Guegle, M. Gössl, S. Haider, C. Heller, N. Ibesich, T. Köther, T. Krutzler, V. Kuschel, C. Lampert, H. Neier, K. Pazdernik, D. Pertl, S. Poupá, M. Purzner, E. Rigler, W. Schieder, G. Schmidt, B. Schodl, S. Svehla-Stix, A. Storch, G. Stranner, J. Voger, H. Wiesenberger und A. Zechmeister, „Klimaschutzbericht 2019,“ Umweltbundesamt, Wien, 2019.
- [72] Z. f. M.-. u. Geodynamik, „ZAMG,“ [Online]. Available: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen/permafrost>. [Zugriff am 10 02 2022].

Weitere Literaturhinweise

- Bals, C. (2002): *Zukunftsfähige Gestaltung der Globalisierung. Am Beispiel einer Strategie für eine nachhaltige Klimapolitik*. In: Zur Lage der Welt 2002. Fischer Verlag.
- Bals, C. et al. (2008): *Die Welt am Scheideweg. Wie retten wir das Klima?* Rowohlt Verlag
- Dincere, I. (2018): *Comprehensive Energy Systems*, Elsevier Verlag.
- Levke, C., Rahmstorf, S., Robinson, A., Feulner, G., Saba, V. (2018): *Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation*. In: Nature [DOI: 10.1038/s41586-018-0006-5]
- Church, J. und White, N. (2006): *A 20th century acceleration in global sea-level rise*
In: Geophysical Research Letters, Vol. 33, L01602
- Hupfer, P. (1998): *Klima und Klimasystem*. In Lozan, J.L., H. Graßl und P. Hupfer: *Warnsignal Klima. Wissenschaftliche Fakten*, Hamburg, S. 17–24.
- IPCC (2007a): *Climate Change 2007 – The Physical Science Basis*
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents
- IPCC (2007b): *Climate Change 2007 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*
<http://www.ipcc-wg2.org/>
- IPCC (2007d): *Klimaänderungen 2007: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger*
<http://www.proclim.ch/4dcgi/proclim/de/Media?555>.
- IPCC (2007e): *Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm.
- Jonas, H. (1984): *Prinzip Verantwortung*, Suhrkamp Verlag.

- Lenton, T.M. et al. (2008): *Tipping Elements in the Earth's Climate System*
In: PNAS, Vol. 105.
- Lesch, H. und Kamphausen, K. (2016): *Die Menschheit schafft sich ab – Die Erde im Griff des Anthropozäns*,
Komplett-Media.
- Rahmstorf, S. und Katherine Richardson, K. (2007): *Wie bedroht sind die Ozeane?*
Fischer Taschenbuch Verlag.
- Rahmstorf, S. und Schellnhuber, H.J. (2018): *Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie*
Verlag C.H. Beck.
- Schüring, J. (2001): *Schneeball Erde*. Spektrumdirekt.
- Seifert, W. (2004): *Klimaänderungen und (Winter-)Tourismus im Fichtelgebirge – Auswirkungen, Wahrnehmungen und Ansatzpunkte zukünftiger touristischer Entwicklung*, Universität Bayreuth.
- Swim, J.K., Stern, P.C., Doherty, T.J., Clayton, S., Reser, J.P., Weber, E.U., Gifford, R., Howard, G.S. (2011):
Psychology's contributions to understanding and addressing global climate change. *American Psychologist*, Vol 66(4), May–Jun 2011, 241–250.
- WBGU (2007): *Welt im Wandel – Sicherheitsrisiko Klimawandel*. Hauptgutachten. Berlin.
http://www.wbgu.de/wbgu_jg2007.html.
- Literaturhinweise zu Abschnitt 6.4
- Fritsche, I. & Masson, T. (2014). Adherence to climate change-related ingroup norms: Do dimensions of group identification matter? *European Journal of Social Psychology*, 44, 455-465
- Bishop, B., Leviston, Z., & Price, J. (2014). Imagining climate change: The role of implicit associations and affective psychological distancing in climate change responses. *European Journal of Social Psychology*, 44,441-454
- Leach, C. (2008). Group-Level Self-Definition and Self-Investment: A Hierarchical (Multicomponent) Model of In-Group Identification. *Journal of Personality and Social Psychology*, 95(1), 144-65
- Bertolotti, M. & Catellani, P. (2014). Effects of message framing in policy communication on climate change. *European Journal of Social Psychology*, 44, 474-486
- Fielding K., Swim J. & Hornsey M. (2014). Developing a social psychology of climate change. *European Journal of Social Psychology*, 44, 413–420 (2014)
- UNESCO Publication Teaching and learning transformative engagement UNESCO,
<https://en.unesco.org/themes/119915/publications/all>

