

Der Klimawandel: Verstehen und Handeln

Ein MINT-Projekt für die Schule

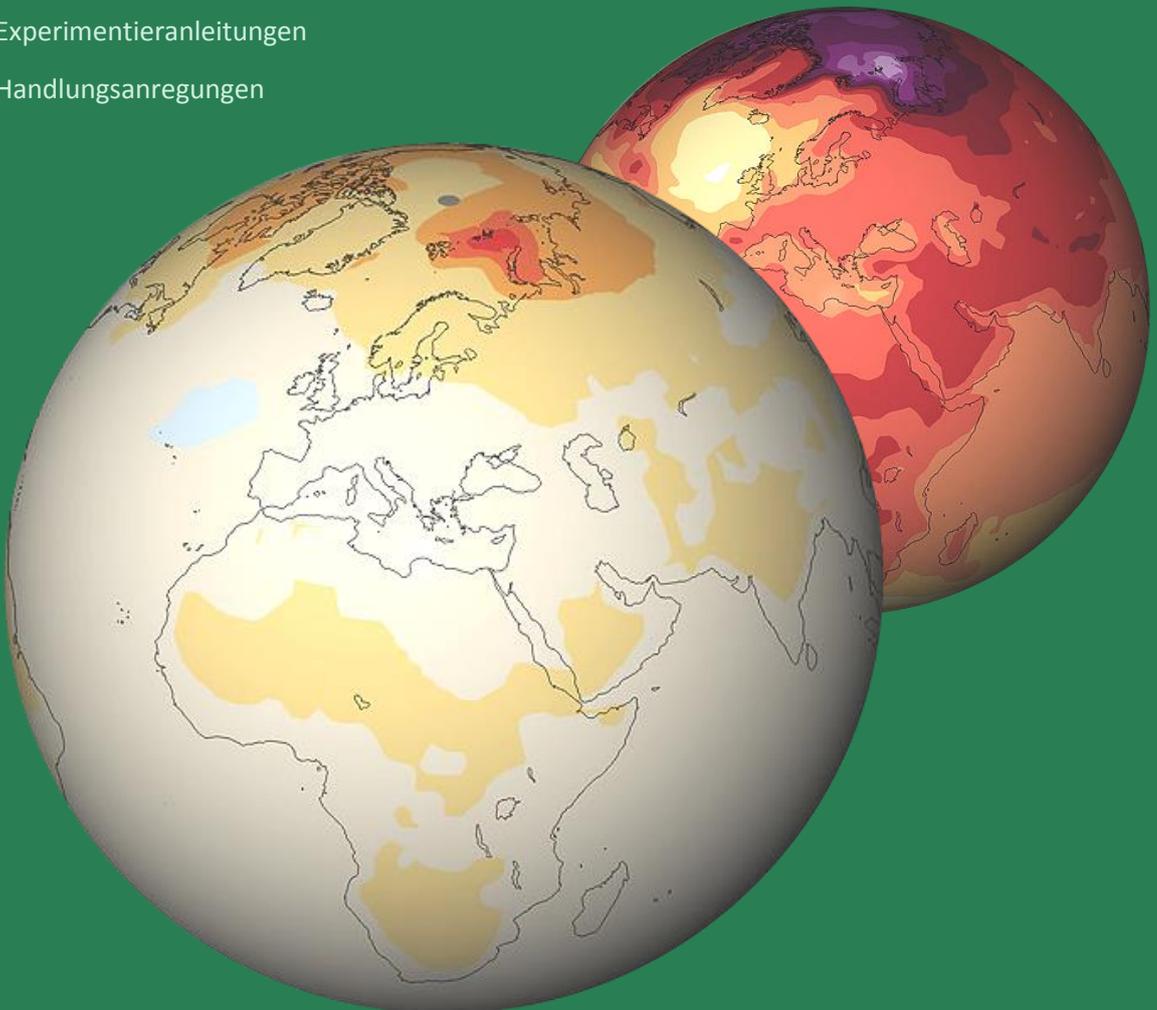
Version Februar 2019

Handbuch

Wissenschaftliche Hintergründe

Experimentieranleitungen

Handlungsanregungen



Dr. Cecilia Scorza
LMU Fakultät Physik
München

Prof. Dr. Harald Lesch
LMU Fakultät Physik
München

Moritz Strähle
Asam-Gymnasium
München

Dr. Dominika Boneberg
GFZ Deutsches GeoFor-
schungszentrum, Potsdam

Dr. Markus Nielbock
Haus der Astronomie
Heidelberg

Mit Beiträgen von Dr. Olaf Fischer, Friederike Strähle und Marco Smolla

HERAUSGEGEBEN VON:

Fakultät für Physik der LMU
Schellingstraße 4, 80799 München
www.physik.uni-muenchen.de

KONTAKTPERSON:

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

GRAFISCHE GESTALTUNG

Moritz Strähle

BILDNACHWEIS:

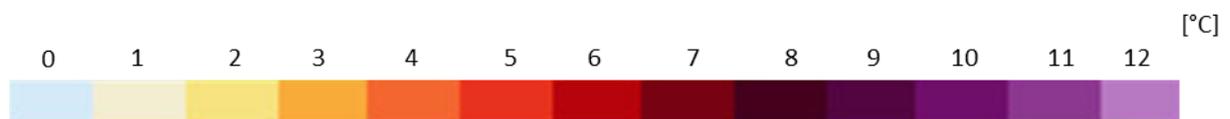
Cecilia Scorza und Moritz Strähle

STAND

Februar 2019

© Fakultät für Physik LMU, alle Rechte vorbehalten

Gedruckt auf Papier aus 100 % Altpapier



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 den größten Anteil an der aktuellen Erderwärmung durch den Kohlendioxidausstoß verursacht. 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 sämtlich Konfliktfelder, die vom Klimawandel zumindest mitverursacht werden. Der Klimawandel ist *das* Thema dieses Jahrhunderts und damit auch entscheidender Gegenstand der Zukunft heutiger Schülerinnen und Schüler.

Das globale Klimasystem und damit auch der Klimawandel sind ein Zusammenspiel verschiedener physikalischer Prozesse. Diese, und auch die daraus resultierenden Folgen, werden in diesem Handbuch aufbereitet und unterstützt durch Experimente veranschaulicht. Die wichtigsten Stichwörter sind hier: Treibhauseffekt, Energie, Energiebilanz, Gleichgewichtstemperatur, Wärmestrahlung, Strahlungsgleichgewicht, Absorptionsverhalten atmosphärischer Gase, Wetter und Klima und Wärmekapazität. Querbezüge zwischen diesen Themen unterstützen die Vorstellung des komplexen und verflochtenen Charakters des Klimawandels. Aufgrund der vielen Anknüpfungspunkte ist das Thema für fächerübergreifendes und -verbindendes Arbeiten an Schulen nicht nur im MINT-Bereich ideal geeignet.

Mindestens so wichtig wie das grundlegende Verständnis der Zusammenhänge, ist die Notwendigkeit zu handeln. Doch nur wer die wissenschaftlichen Hintergründe kennt, kann dies auch begründet motiviert, argumentationssicher und verantwortlich tun. Es sollen daher nicht nur ein Verständnis für die naturwissenschaftlichen Prozesse hinter dem Klimawandel vermittelt, sondern auch Handlungsmöglichkeiten angeboten werden, um so das individuelle Leben und Umfeld der Schüler/innen zu prägen.

Die Autoren

Aufruf zur Mitwirkung!

Dieses Handbuch und der dazugehörige Experimentierkoffer ist Teil des von der Ludwig-Maximilians-Universität München initiierten und vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz geförderten Projektes *Klimawandel: Verstehen und Handeln*.

Allgemeines Ziel dieses Projektes ist es, das Thema Klimawandel stärker in den Fokus der heranwachsenden Generation zu rücken, über ein Verständnis der wissenschaftlichen Hintergründe die Notwendigkeit zum ethischen Handeln herauszuarbeiten und zum ganz konkreten Handeln zu motivieren.

Wir laden Sie herzlich ein, daran mitzuwirken!

Hierzu wird 2019 das *Lehrernetzwerk Klimawandel* gegründet. In dessen Rahmen sollen konkrete Unterrichtsmodule, Materialien und Projekte für verschiedene Jahrgangsstufen und Fächer erarbeitet und den Schulen gesammelt zur Verfügung gestellt werden, um in Form fächerübergreifenden Arbeitens flexibel im Laufe eines Schuljahres eingesetzt werden zu können.

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

Ebenso sind wir über Anmerkungen, Änderungs- und Verbesserungsvorschläge, Ergänzungen etc. zu diesem Handbuch und den dazugehörigen Experimenten sehr dankbar.

„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 behält ihr Wasser	2
1.5. Wie der Mond die Erde lebensfreundlich machte	3
1.6. Ein Magnetfeld als Schutzschild der Erde	4
Kapitel 2 Den Treibhauseffekt verstehen	5
2.1. Die Sonne als Energiequelle	5
2.2. Ein Planet wird bestrahlt	7
2.3. Die Rolle der Atmosphäre und der Treibhauseffekt	9
2.4. Was ein Treibhausgas zum Treibhausgas macht	12
Kapitel 3 Das Klimasystem der Erde	13
3.1. Unterschied zwischen Wetter und Klima	15
3.2. Das Klimasystem der Erde und seine Komponenten	15
3.3. Entstehung der Klimazonen	18
Kapitel 4 Der Klimawandel	21
4.1. Der anthropogene Treibhauseffekt	21
4.2. Wasserdampf und Rückkopplungseffekte	24
Kapitel 5 Auswirkungen des Klimawandels	25
5.1. Weltweite Auswirkungen des Klimawandels	25
5.3. Der Klimawandel in Deutschland	30
5.4. Der Klimawandel in Bayern	34
Kapitel 6 Klimawandel im Unterricht: Verstehen und Handeln	39
6.1. Notwendigkeit zum Handeln	39
6.2. Warum ethisch handeln?	41
6.3. Psychologische Hürden bei der Bekämpfung des Klimawandels	41
6.4. Umsetzung in der Schule	42
6.5. Aktivitäten	47
Aktivität 1 Größenverhältnisse im Sonnensystem	49
Aktivität 2 Gleichgewichtstemperatur und Albedo der Erdoberfläche	53
Aktivität 3 Erwärmung verschiedener Luftschichten	55
Aktivität 4 Die Absorption von Wärmestrahlung durch CO ₂	57
Aktivität 5 Der anthropogene Treibhauseffekt	59
Aktivität 6 Wo die Wärme hingeht: Die Ozeane als Klimapuffer	63
Aktivität 7 Die Sonnenstrahlung und die Klimazone der Erde	65

Aktivität 8 Anstieg des Meeresspiegels.....	67
Aktivität 9 Versauerung der Ozeane	69
Aktivität 10 Freisetzung von CO ₂	73
Aktivität 11 Anzeichen des Klimawandels in Bayern auf der Spur	75
Literatur	79

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 fast 4000 Exoplaneten entdeckt (Stand: Juni 2018). Jedoch gelten 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. Unser Sonnensystem 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 hätten vernichten könnten. Diese Zone wird die „Habitable Zone der Galaxis“ genannt.

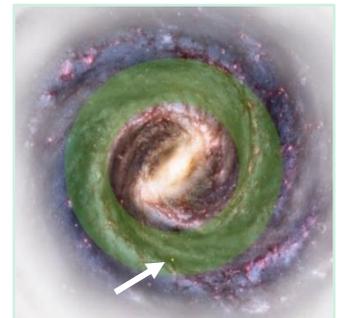


Abbildung 1 – Lage des Sonnensystems in der Galaxis
(Credits: Mandaro/Anpassung Scorza)

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), fünf Zwergplaneten wie Pluto, den Monden der Planeten, Asteroiden und Kometen. Ein Maß für die Lebensfreundlichkeit eines Planeten



Abbildung 2 – Die Erde liegt in Mitten der Lebenszone des Sonnensystems (Credits: NASA/verändert Scorza)

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 erstreckt sich die Lebenszone von Venus bis Mars (siehe Abbildung 2), die Erde befindet sich also mitten drin.

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 der Umgebung.

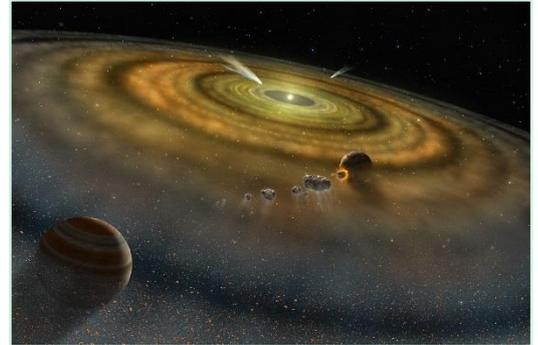


Abbildung 3 – Die Entstehung des Sonnensystems
(Credits: NASA)

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 zahlreiche 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 herauskatalpultiert. Einige wurde von der Sonne angezogen und schlugen auf der Oberfläche der inneren Gesteinsplaneten ein und brachten ihnen so das Wasser.

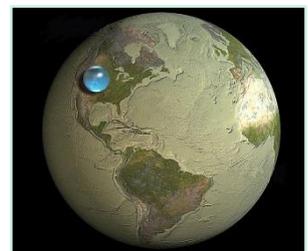


Abbildung 4 – Das Wasser der Erde
(Credits: Cook and Perlman)

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. Hierdurch 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 Kalkstein gelagert. So hat der Regen die Atmosphäre der Erde lebensfreundlicher gemacht. Als viel später die Pflanzen begannen, weiteres CO₂ aufzunehmen und über Photosynthese in Sauerstoff umzuwandeln, bildete sich eine Ozonschicht, welche die Erdoberfläche vor UV-Strahlung schützte – eine wichtige Voraussetzung für die biologische Vielfalt auf der Erde.

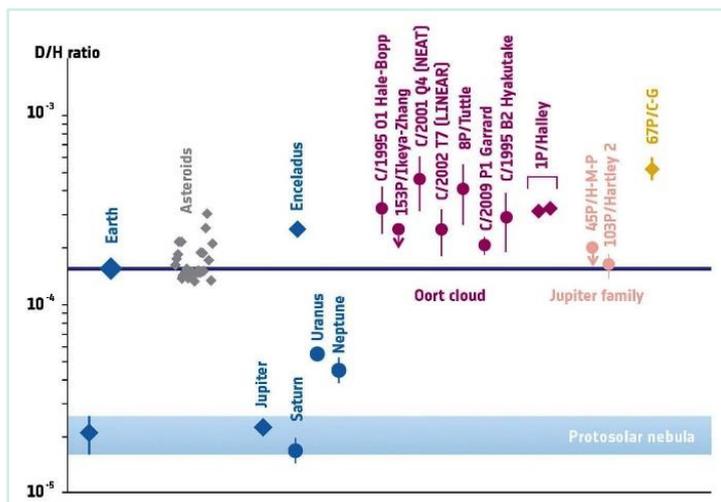


Abbildung 5 – Deuterium zu Wasserstoff (H/D) im Sonnensystem (Credits: ESA, nach: Altwegg, K. et al., Science 10.1126/science.1261952, 2014, fig. 3)

Ein wichtiges 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 Asteroiden findet.

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 geboren.

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 23,5° im Bezug zur



Abbildung 6 – Die Entstehung des Mondes (Credits: NASA)

Ekliptik. Diese Neigung verursacht die Jahreszeiten und schwächt die Wetterschwankungen der Erde ab.

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 dabei 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 erlaubt somit den Aufbau eines magnetischen Feldes. Ohne diesen Schutzschild wäre die Erdoberfläche dem Sonnenwind und dessen hochenergetischen und zerstörerischen Teilchen schutzlos ausgeliefert.

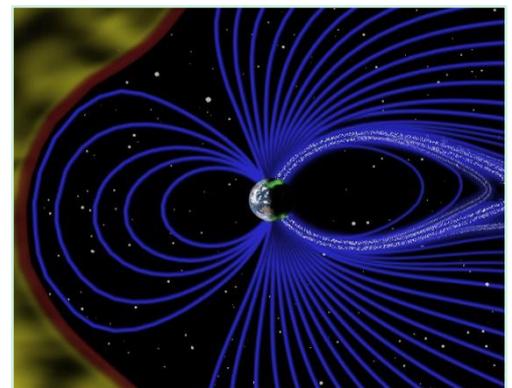


Abbildung 7 – Das Magnetfeld der Erde (Credits: NASA)

Ohne das großräumige Magnetfeld wäre das Leben auf der Erdoberfläche der zerstörerischen kosmischen Teilchenstrahlung der Sonne, dem sogenannten Sonnenwind, hilflos ausgeliefert. Der Sonnenwind besteht aus sehr schnellen 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 Eigenschaften und Prozesse führten dazu, dass aus einem trockenen Gesteinsplanet eine bewohnbare Welt wurde.

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 der Sonne ca. 15 Millionen Grad Celsius. Bei diesen hohen Temperaturen findet Kernfusion statt: Aus Wasserstoff bildet sich zunächst Helium und in weiteren Verschmelzungsschritten dann massereichere Kerne. Dabei wird, entsprechend Einsteins Gleichung $E = m \cdot c^2$, eine immense Menge an Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung freigesetzt. Pro Sekunde wandelt die Sonne so 500 Millionen Tonnen Wasserstoff in Helium um.

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

Die Sonne strahlt, aufgrund ihrer Oberflächentemperatur von etwa 5.700 °C entsprechend dem Planckschen Strahlungsgesetz¹, überwiegend elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen von ca. 400 (Violett) bis 750 Nanometern (Rot) ab (siehe Abbildung 8) mit einem Maximum bei Gelb-Grün. Unsere Augen haben sich im Lauf der Evolution an diesen Teil des Spektrums angepasst, sodass wir elektromagnetische Wellen in diesem Bereich sehen können.

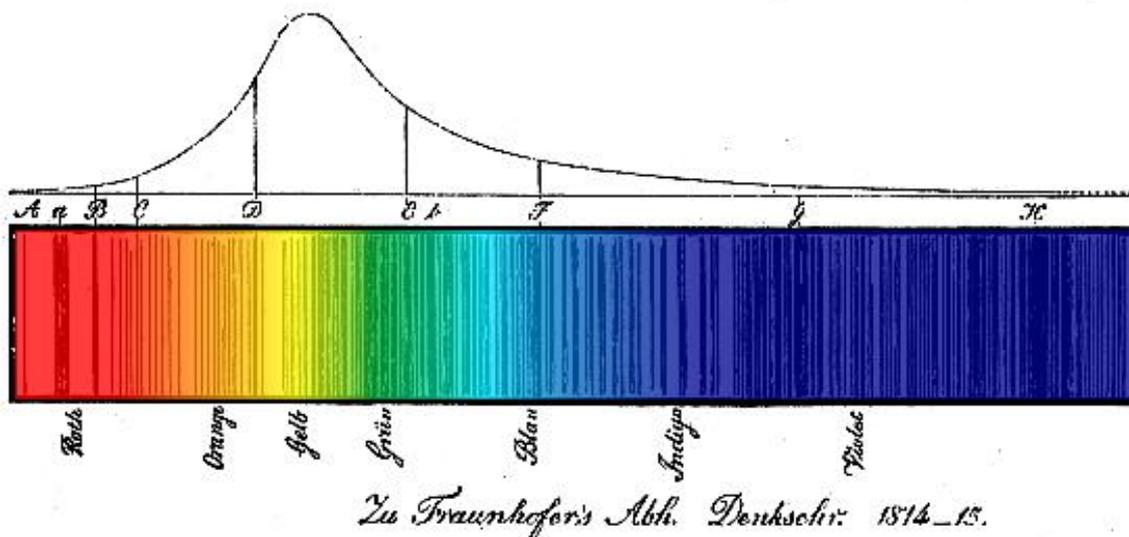


Abbildung 8 – Fraunhofers Spektrallinien und Energieverteilung

¹ Das Plancksche Strahlungsgesetz beschreibt die spektrale Energieverteilung eines schwarzen Körpers einer bestimmten Temperatur in Abhängigkeit von der Wellenlänge bzw. Frequenz der Strahlung.

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 Bestrahlungsstärke, 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 eine Strahlungsleistung von 1368 W auftrifft (siehe Abbildung 9)².

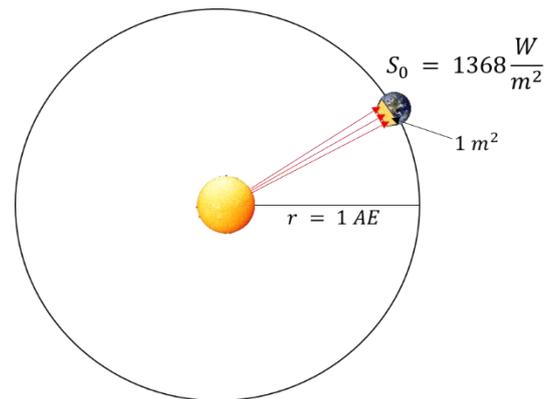


Abbildung 9 – Die Messung der Solarkonstante auf der Erde (Credits: Scorza, Strähle)

Exkurs: Die gesamte Strahlungsleistung der Sonne abschätzen

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.

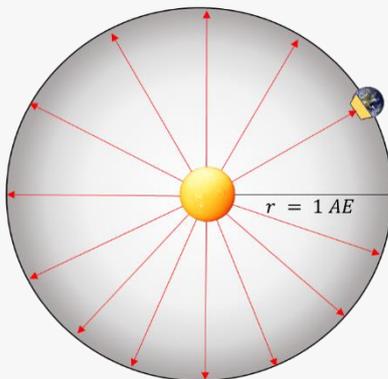


Abbildung 10 – Die gesamte Sonnenstrahlung L_0 verteilt sich auf der gedachten Kugeloberfläche (Credits: Scorza, Strähle)

$$S_0 = 1368 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

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

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

$$L = A \cdot S_0$$

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

$$L_0 = 4 \pi (149,6 \cdot 10^9)^2 \text{ m}^2 \cdot 1368 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$L_0 = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W} = 3,85 \cdot 10^{23} \text{ kW}$$

Auf die Oberfläche dieser gedachten Kugel verteilt sich die Strahlung der Sonne. Der Radius r der Kugel ist bekannt (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.

² 1AE = 1 Astronomische Einheit = Entfernung Erde–Sonne

2.2. Ein Planet wird bestrahlt

Aktivität 3

Der 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 nicht sichtbare Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) in Richtung Weltall zurück.

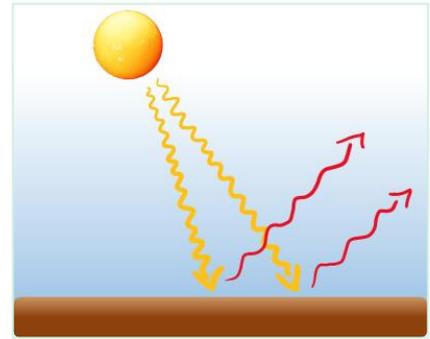


Abbildung 11 – Die kurzwellige Sonnenstrahlung wird vom Erdboden als Infrarotstrahlung remittiert (Credits: Scorza, Strähle)

Mit einem einfachen Modell³ kann der Einfluss der Erdatmosphäre auf Einstrahlung und Abstrahlung unseres Erdkörpers beschrieben werden. Dazu betrachten wir zunächst eine fiktive Erde ohne Luft-hülle:

Im Langzeitmittel muss die Energie der Wärmestrahlung, die von der Erde ins All abgestrahlt wird, exakt der 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 solange stattfinden, bis eingestrahlte und abgestrahlte Energie wieder gleichauf sind und die Erde sich letztendlich doch im Strahlungsgleichgewicht befindet.

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

Die von der Sonne senkrecht eingestrahelte Energie beträgt auf der Erde $S_0 = 1368 \text{ W/m}^2$ (Solarkonstante, siehe Seite 6). Allerdings wird ja nicht die komplette Erdkugel senkrecht, sondern zu den Polen hin, zunehmend flacher bestrahlt. Mit anderen Worten: Pro m^2 Oberfläche trifft immer weniger Energie auf, je näher wir dem Nord- bzw. Südpol kommen. Die andere Halbkugel liegt derweil im Dunkeln. Die über die Erdoberfläche gemittelte eingestrahelte Energie pro m^2 kann man abschätzen, indem man das Verhältnis von Querschnittsfläche $Q = \pi \cdot r_{\text{Erde}}^2$ (wird senkrecht bestrahlt) zu Erdoberfläche $O = 4\pi \cdot r_{\text{Erde}}^2$ bestimmt. Dies ist offensichtlich genau $1/4$. Somit ergibt sich für die *mittlere Intensität der Sonnenstrahlung auf der Erde* $I_S = \frac{1368 \text{ W}}{4 \text{ m}^2} = 342 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

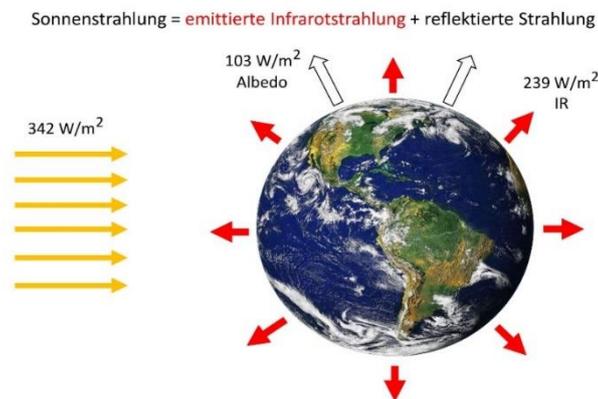
Zurück zur fiktiven Felsenerde. Die mittlere Temperatur auf einer solchen Erde lässt sich mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz abschätzen:

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

Das Gesetz beschreibt, welche Strahlungsintensität I (in Watt pro m^2) ein Körper bei einer bestimmten Temperatur T abstrahlt. Je heißer ein Körper, desto mehr Wärmestrahlung gibt er ab und zwar proportional zur vierten Potenz seiner Temperatur. Bei doppelter Temperatur (in Kelvin gemessen)

³ Modell nach Buchal und Schönwiese (2010).

strahlt ein Körper also 16-mal mehr Energie pro Sekunde ab. Die Strahlungskonstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ ist als Umrechnungsfaktor zwischen Temperatur und der Strahlungsintensität anzusehen.



Von den eingestrahnten 342 W/m^2 werden ca. 30 % direkt ins All zurückgeworfen. Dieses Rückstrahlvermögen von Oberflächen nennt man *Albedo* α und ist z. B. bei Eis besonders hoch. Es ergibt sich also, für die von der Sonne wirklich auf die Erde pro Sekunde und pro m^2 übertragene Energie:

$$I_{S \rightarrow E} = (1 - \alpha) \cdot I_S = 0,7 \cdot 342 \frac{W}{m^2} = 239 \frac{W}{m^2}$$

Die mittlere Abstrahlungsleistung der Erdoberfläche $I_{E \rightarrow}$ ist aufgrund des Strahlungsgleichgewichtes gleich groß und hängt von der Temperatur der Erdoberfläche ab:

$$I_{S \rightarrow E} = I_{E \rightarrow} = \sigma \cdot T^4$$

Diese Gleichung wird nach T aufgelöst:

$$T = \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha) \cdot I_S}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{239 \frac{W}{m^2}}{5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}}} = 255K = -18^\circ C$$

Auf unserer fiktiven Felsenerde würde also eine mittlere Temperatur von $-18^\circ C$ herrschen!

Aktivität 2

Änderungen in der Intensität der Sonneneinstrahlung I_S oder Änderungen in der Albedo α wirken sich also immer direkt auf die Temperatur der Erde aus. Würde I_S und damit auch $I_{S \rightarrow E}$ aus irgendeinem Grund zunehmen, so würde die Temperatur der Erde zunehmen, bis das Strahlungsgleichgewicht bei einer neuen Gleichgewichtstemperatur wiederhergestellt wäre.

2.3. Die Rolle der Atmosphäre und der Treibhauseffekt

Ohne seine wärmende Atmosphäre wäre unser heute blauer Planet eine weiße Eiskugel mit einer durchschnittlichen Temperatur von $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Glücklicherweise absorbiert die Erdatmosphäre die Wärmestrahlung der Erde zum Teil und strahlt diese auch in Richtung Erdoberfläche zurück. Die zugrundeliegenden Prozesse wollen wir im Folgenden betrachten:

Gehen wir einmal davon aus, dass die Atmosphäre zwar die gesamte relativ kurzwellige Sonnenstrahlung I_S durchlässt, aber einen großen Teil der infraroten Wärmestrahlung der Erdoberfläche $I_{E\rightarrow}$ absorbieren würde, sagen wir 80 %. Dadurch steigt die Temperatur der Atmosphäre und sie beginnt nun ihrerseits, die aufgenommene Wärme in Richtung Erdoberfläche ($I_{Atm\rightarrow E}$) und in Richtung Weltall ($I_{Atm\rightarrow W}$) abzustrahlen. Da die Atmosphäre in keine Richtung bevorzugt abstrahlt, gilt:

$$I_{Atm\rightarrow E} = I_{Atm\rightarrow W}$$

Das neue Strahlungsmodell (siehe Abbildung 13) sieht jetzt wie folgt aus:

Die einfallende solare Strahlung beträgt nach wie vor $I_S = 342\text{ W/m}^2$.

Direkt diffus reflektiert wird der Anteil α , den wir wieder mit 0,3 ansetzen, das entspricht einer Strahlung von $I_{ref} = 103\text{ W/m}^2$. Die Erdoberfläche absorbiert also den Anteil

$$I_{S\rightarrow E} = (1 - \alpha) \cdot I_S = 239\text{ W/m}^2$$

Diese, von der Erdoberfläche absorbierte Strahlung, wird in diesem Modell in Form von Wärmestrahlung wieder nach oben abgestrahlt ($I_{E\rightarrow}$). Hiervon werden 80 % von der Atmosphäre absorbiert:

$$I_{E\rightarrow Atm} = 0,8 \cdot I_{E\rightarrow}$$

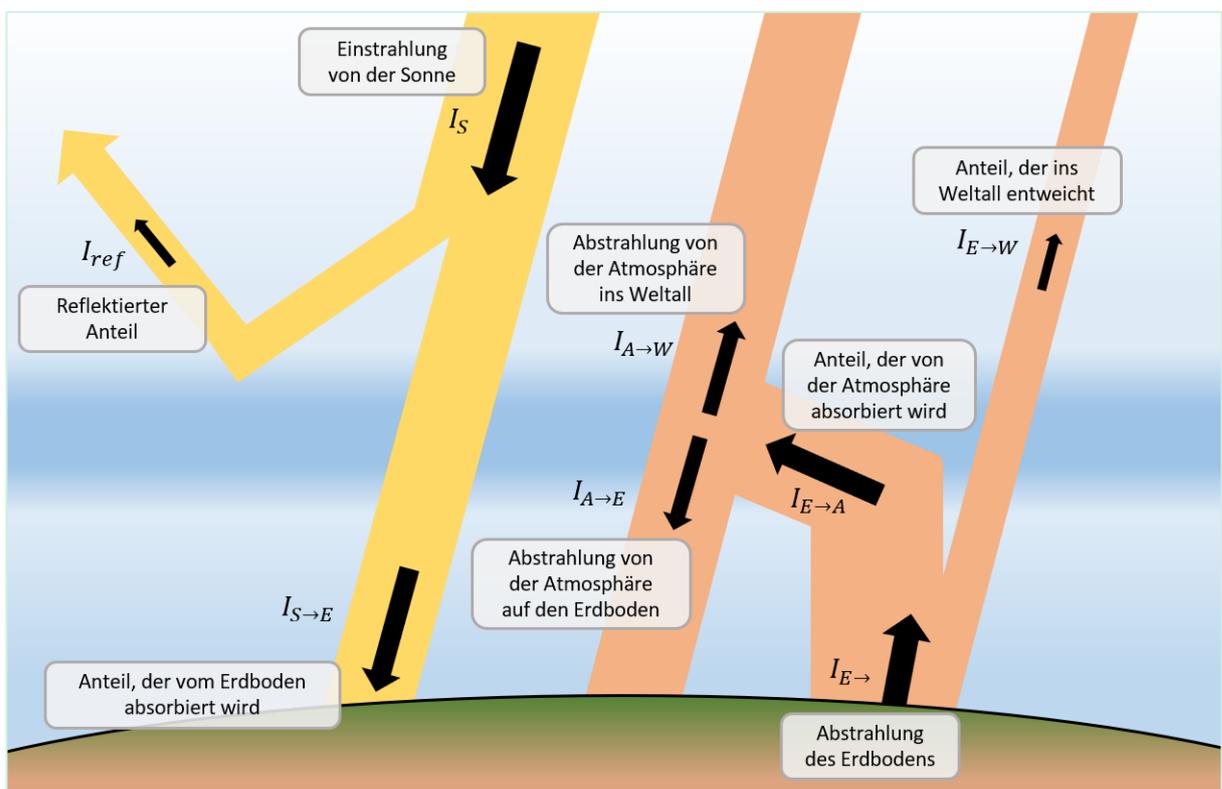


Abbildung 13 – Strahlungsmodell mit Atmosphäre (Credits: Strähle)

Da sich aber auch die Atmosphäre nicht immer weiter erwärmen wird und sich auch hier bei einer bestimmten Gleichgewichtstemperatur ein Strahlungsgleichgewicht einstellt, wird die aufgenommene Energie auch wieder abgestrahlt. Dies geschieht, wie wir oben schon angesprochen haben, nach oben und nach unten zu gleichen Teilen. Es folgt also:

$$\underbrace{I_{E \rightarrow \text{Atm}}}_{\substack{\text{von der Atmosphäre} \\ \text{aufgenommene Energie}}} = 0,8 \cdot I_{E \rightarrow} = \underbrace{I_{\text{Atm} \rightarrow E} + I_{\text{Atm} \rightarrow W}}_{\substack{\text{von der Atmosphäre} \\ \text{abgestrahlte Energie}}} = 2 \cdot I_{\text{Atm} \rightarrow E}$$

und damit:

$$0,4 \cdot I_{E \rightarrow} = I_{\text{Atm} \rightarrow E} \quad (1)$$

40 % der von der Erde emittierten Strahlung werden also wieder in Richtung Erde zurückgeschickt. Der grundlegende Unterschied zwischen dem Strahlungsmodell und der Felsenerde ist, dass die von der Erde abgestrahlte Wärmestrahlung $I_{E \rightarrow}$ nun nicht mehr nur von der absorbierten solaren Einstrahlung $I_{S \rightarrow E}$ gespeist wird, sondern auch von der Rückstrahlung der Atmosphäre. Es gilt also:

$$\underbrace{I_{E \rightarrow}}_{\substack{\text{von der Erde abgestrahlte} \\ \text{Energie}}} = \underbrace{I_{S \rightarrow E} + I_{\text{Atm} \rightarrow E}}_{\substack{\text{von der Erde aufgenommene} \\ \text{Energie}}} = \underbrace{I_{S \rightarrow E} + 0,4 \cdot I_{E \rightarrow}}_{\text{mit Gleichung (1)}}$$

Aufgelöst nach $I_{E \rightarrow}$ ergibt sich:

$$I_{E \rightarrow} = \frac{1}{1 - 0,4} \cdot I_{S \rightarrow E} = \frac{1}{1 - 0,4} \cdot 239 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 398 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Das mag überraschen, denn die Erde strahlt damit mehr Energie ab, als sie direkt von der Sonne aufnimmt ($239 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$). 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, werden die Wagen immer schneller, d. h. ihre kinetische Energie nimmt ständig zu.

Diese neue Energiebilanz liefert für die Temperatur der Erdoberfläche:

$$T = \sqrt[4]{\frac{398 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}}} = 289 \text{K} = 16 \text{°C}$$

Im Vergleich zur Felsenerde bewirkt also eine Lufthülle, welche die Wärmestrahlung der Erde zu 80 % absorbiert, eine Rückstrahlung, die die Erde in unserem einfachen Strahlungsmodell um 34°C^4 erwärmt. Dieser Prozess ist der sogenannte *Treibhauseffekt*, der das Klima maßgeblich beeinflusst und ohne den wohl kein Leben auf der Erde möglich wäre.

Aktivität 4

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

⁴ Entgegen der wissenschaftlichen Vereinbarung, Temperaturdifferenzen in Kelvin anzugeben, werden diese hier, wie dies in diesem Kontext üblich ist, in °C angegeben.

Gehen wir einmal davon aus, dass durch Abgase die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre angestiegen ist und diese nunmehr 85 %, statt der oben angenommenen 80 %, der Wärmestrahlung der Erde absorbiert. Nach obiger Argumentation werden nun $\frac{85\%}{2} = 42,5\%$ der von der Atmosphäre absorbierten Wärmestrahlung zur Erde zurückgeschickt. Wir erhalten:

$$I_{E \rightarrow} = \frac{1}{1 - 0,425} I_{S \rightarrow E} = \frac{1}{1 - 0,425} 239 \frac{W}{m^2} = 416 \frac{W}{m^2}$$

und damit:

$$T = \sqrt[4]{\frac{416 \frac{W}{m^2}}{5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}}} = 293K = 20\text{ }^\circ C$$

Eine Erhöhung der Temperatur der Erdoberfläche um 4 °C!

Aktivität 5

Man könnte unser Strahlungsmodell nun schrittweise verbessern und beispielsweise ein Temperaturprofil simulieren, d. h. die Strahlung würde in unterschiedlicher Höhe unterschiedlich stark absorbiert. Oder man könnte die Atmosphäre auch ein wenig von der einfallenden Sonnenstrahlung aufnehmen lassen, so wie es z. B. mit der Ozonschicht in unserer Atmosphäre ja tatsächlich auch geschieht. Und außerdem könnte man den Einfluss der Wolken, des Wasserdampfes und der Schmutzpartikel (Aerosole) in der Luft berücksichtigen. Das macht man am besten in groß angelegten Simulationen, die auch die Dynamik des Luftmeeres über unseren Köpfen richtig darstellen. Doch wie weit wir unser Modell auch verbessern, die oben dargestellten Zusammenhänge behalten ihre unanfechtbare Gültigkeit:

*Je mehr Wärmestrahlung 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!

Abbildung 14 zeigt die tatsächlichen Energieströme in der komplexen Atmosphäre, die sich aus langjährigen globalen Messwerten und einem relativ komplexen Atmosphärenmodell ergeben. Die Erdoberfläche strahlt hier $I_{E \rightarrow} = 390 \text{ W/m}^2$ ab, was einer mittleren Temperatur von 15 °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). 86 % 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.

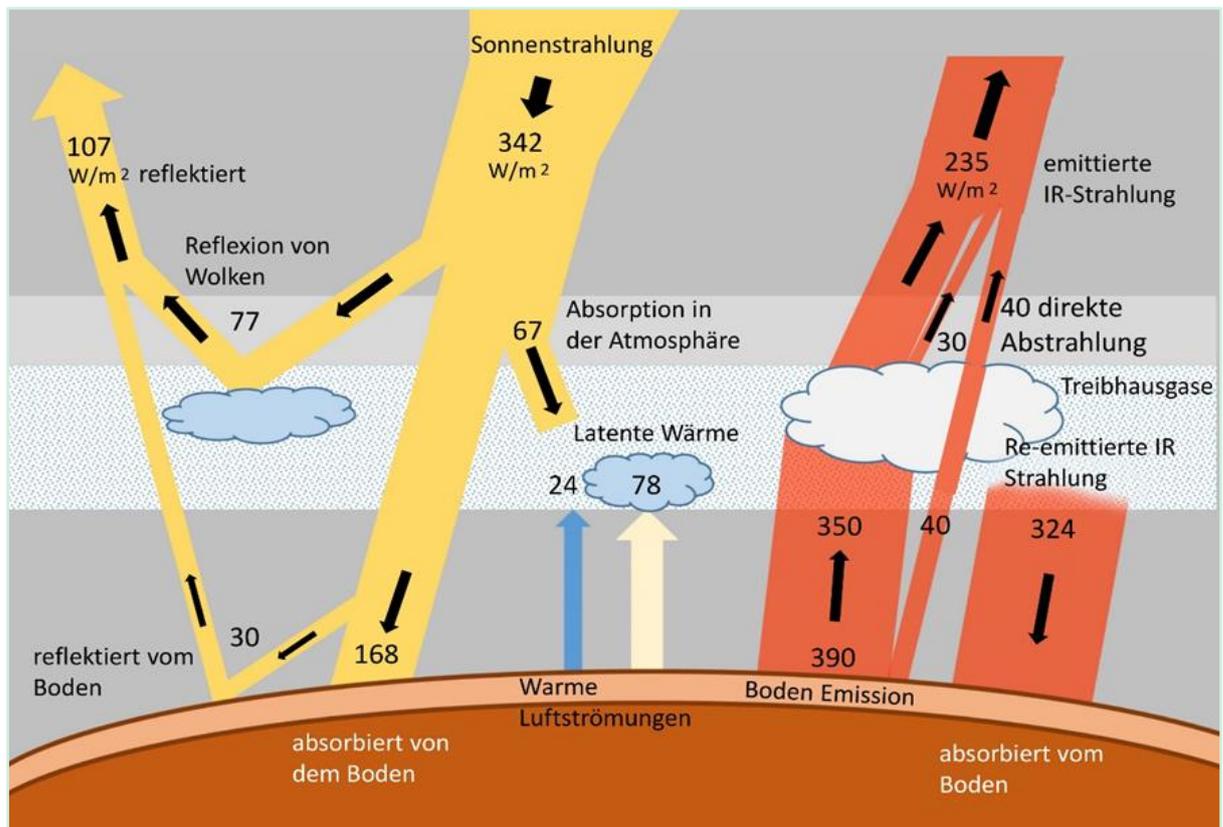


Abbildung 14 – Energieströme in der komplexen Atmosphäre. Die Bilanzen oberhalb der Atmosphäre (342 W/m^2) und oberhalb des Bodens (390 W/m^2) sind ausgeglichen (Credits: Scorza, Lesch)

2.4. Was ein Treibhausgas zum Treibhausgas macht

In der Realität sorgt der oben beschriebene natürliche Treibhauseffekt dafür, dass die globale Mitteltemperatur der Erde von $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ auf ca. $15 \text{ }^\circ\text{C}$ erhöht wird. Hierdurch wird flüssiges Wasser und damit Leben auf der Erde ermöglicht.

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

Einfach dargestellt werden diese Moleküle durch die eintreffende Strahlung in Schwingungen versetzt und wandeln Strahlungsenergie in Schwingungsenergie um. Diese Energie kann wiederum auf andere Gasteilchen in Form von Bewegungsenergie übertragen werden – das Gas erwärmt sich.

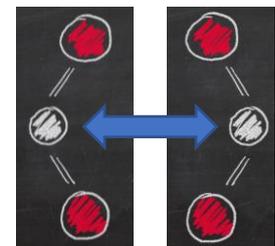


Abbildung 15 – Biegeschwingung eines CO_2 -Moleküls (Credits: Prof. B. Mayer)

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.

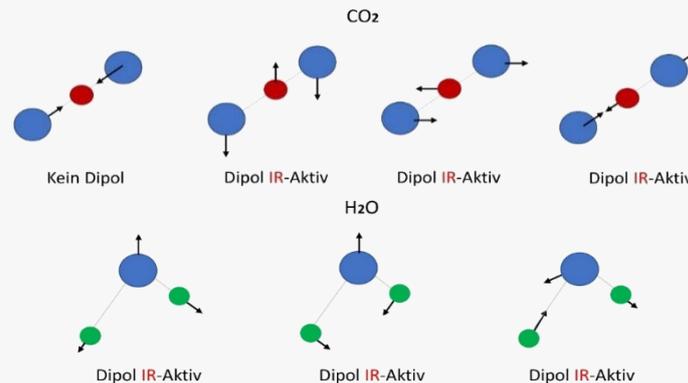


Abbildung 16 – IR-aktive Dipol-Moleküle (Credits: Scorza)

Diese Absorption von Infrarotstrahlung kann allerdings nur dann passieren, wenn sich bei der Schwingung das elektrische Dipolmoment⁵, 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 16, 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 Kohlendioxidmoleküls dazu, dass diese Symmetrie aufgebrochen wird (siehe Abbildung 16, obere Reihe). Die so entstehenden Dipolmomente führen dazu, dass CO₂ Infrarotstrahlung absorbiert und als Treibhausgas wirken kann.

⁵ 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 Wochen – 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 Tage 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.

Charakteristische Zeit	Zeitskala Jahre, Stunden	Atmosphärische Phänomene
Mikroturbulenz	Minuten - Sekunden	Staubteufel Windbö Hitzeblitzern
Wetter	Tage – Stunden	Tiefdruckgebiet Tropischer Sturm Schönwetter Wolken (Cumulus)
Witterung	Wochen - Monaten	Kalter Winter
Klima	Jahre 10^4 (12.500 J) 10^2 (200 J) 10^2 (100 J)	Holozänes Klimaoptimum Kleine Eiszeit 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:

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

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

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 Grad zu erwärmen. Für Wasser werden so beispielsweise 4,182 kJ Wärmeenergie benötigt; es hat demnach eine spezifische Wärmekapazität von $c_{Wasser} = 4,182 \frac{kJ}{kg \cdot K}$.

Luft hingegen hat eine deutlich geringere spezifische Wärmekapazität von $c_{Luft} = 1,005 \frac{kJ}{kg \cdot K}$.

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 in 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!

Die Ozeane entziehen der Atmosphäre nicht nur Wärmeenergie, sondern auch CO_2 , das sich im Wasser löst. Die Ozeane puffern so den anthropogenen Treibhauseffekt doppelt ab – allerdings nicht ohne Folgen, wie wir später noch sehen werden.

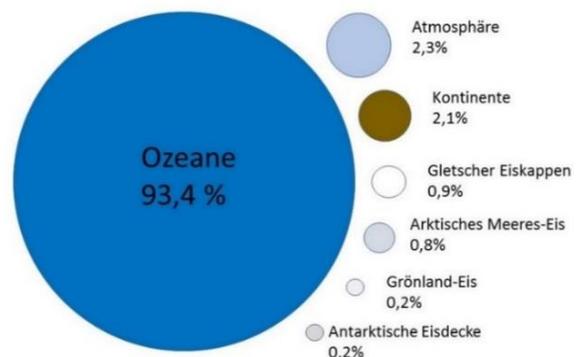


Abbildung 17 – Wärmespeicher im Erdsystem (Credits: Scorza)

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 9). Leider wird sie seit der Industrialisierung vermehrt als Mülldeponie für gasförmigen 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 Zirkuswolken 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 Wärmeabstrahlung in den Weltraum entweicht; im Vergleich zu einer sternklaren wolkenlosen Winternacht bleibt es deutlich wärmer.

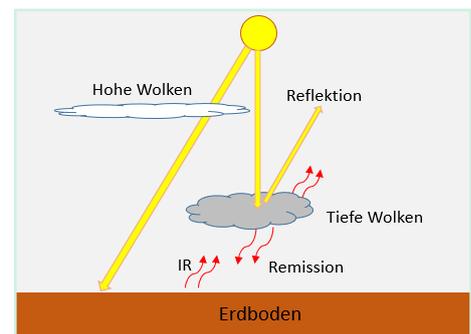


Abbildung 18 – Wirkung hoher und niedriger Wolken
(Credits: Scorza)

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 massenweiße ausgestoßenem CO_2 und dem damit verbundenen Treibhauseffekt, die Erde wieder von ihrem Eispanzer befreite.



Abbildung 19 – Experiment zur Messung der Albedo
(Credits: O. Fischer)

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 Pedosphäre und Lithosphäre im Klimasystem

Es wurde bereits dargelegt, dass der Energieaustausch von Boden zu 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 zur 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 Kohlendioxidkreislauf, bestimmt. Ursprünglich bestand die Atmosphäre der Erde überwiegend aus Kohlendioxid und Stickstoff. 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 Kohlendioxid. 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.

3.3. Entstehung der Klimazonen

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 Nordsummers die Nordhalbkugel senkrechter und dadurch intensiver von der Sonne bestrahlt wird (Position a. in Abbildung 20), während die Sonnenstrahlen auf der

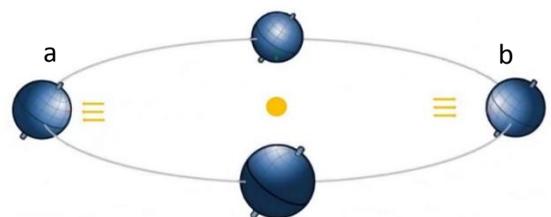


Abbildung 20 – Die Jahreszeiten (Credits: Scorza)

Südhalbkugel relativ schräg einfallen. Sechs Monate später wird die Südhalbkugel intensiver bestrahlt (Position b. in Abbildung 20) und auf der Nordhalbkugel herrscht Winter.

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 Vegetation), aufweisen.

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 Deutschland 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.

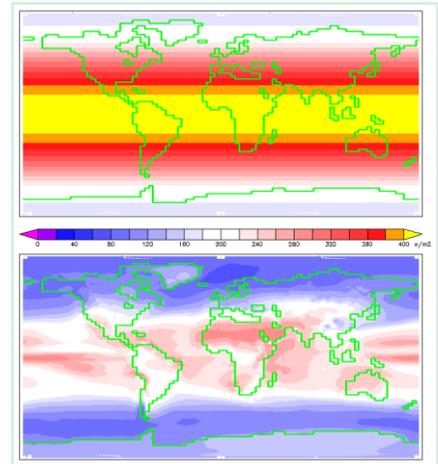


Abbildung 21 – Jährlicher Mittelwert der Sonneneinstrahlung außerhalb der Erdatmosphäre (oben) und am Erdboden (unten) in W/m^2
(Credits: William M. Conolley)

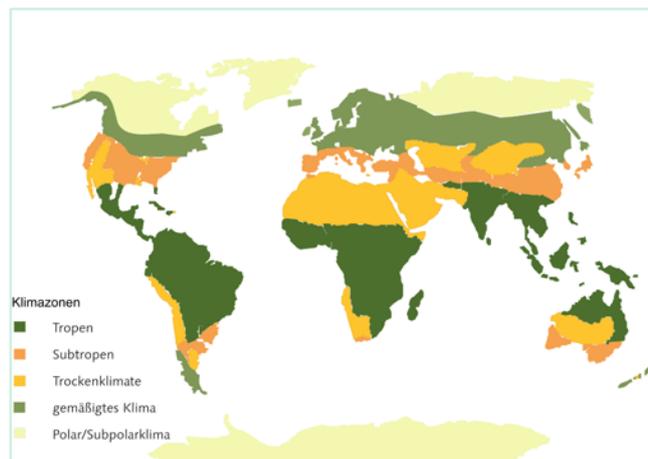


Abbildung 22 – Die Klimazonen der Erde (Quelle: ecobine.de)

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 (so genannte *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 23). Ziel ist es, eine möglichst genaue Prognose des lokalen Wetters angeben zu können.

Die Schwierigkeit an den Wetterberechnungen liegt darin, dass die Atmosphäre ein komplexes System mit teilweise chaotischem Verhalten ist. Dies bedeutet, dass der zukünftige Zustand der Atmosphäre stark von den nicht exakt bestimmbar Anfangsbedingungen abhängt. Modellrechnungen werden deshalb mit zunehmender Vorhersagezeit immer unsicherer. Aus diesem Grund gilt im Allgemeinen, dass das Wetter im Mittel etwa sieben Tage vorhersagbar ist.

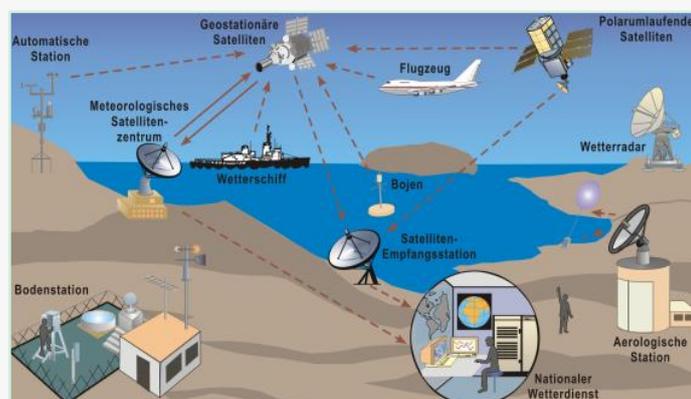


Abbildung 23 – Das weltweite meteorologische Beobachtungssystem
(Quelle: Wetterdienst.de)

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 plausible 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 Klimawandel

4.1. Der anthropogene Treibhauseffekt

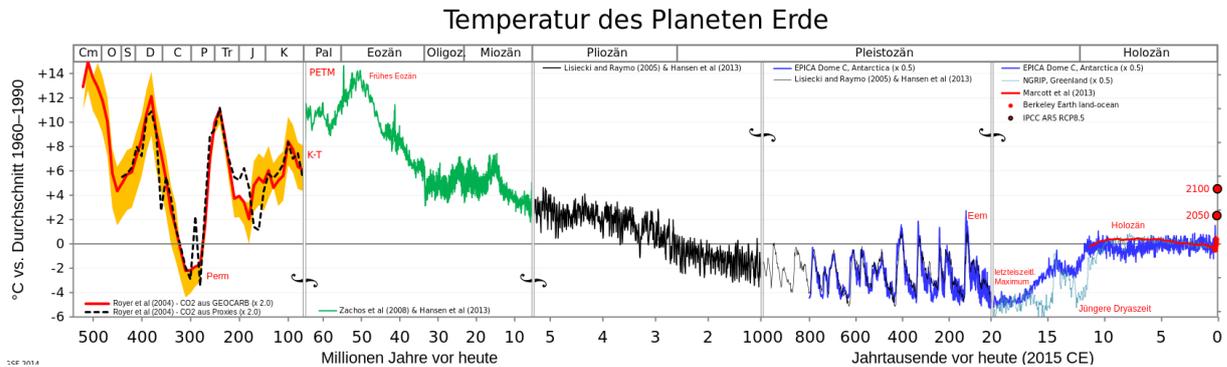


Abbildung 24 – Schätzungen der globalen Oberflächentemperaturen der letzten 540 Mio. Jahre und errechnete Temperaturen für 2050 und 2100 aus dem 5. Sachstandsbericht des IPCC (Quelle: palaeotemps G2)

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 24). Seit 1980 aber ist ein signifikanter Anstieg der mittleren Atmosphärentemperatur zu beobachten. Heute herrscht in der Klimaforschung der Konsens (zusammengefasste Indizien aus über 34.000 wissenschaftlichen Publikationen), dass der aktuelle Klimawandel ohne die Aktivitäten des Menschen nicht zu erklären ist.

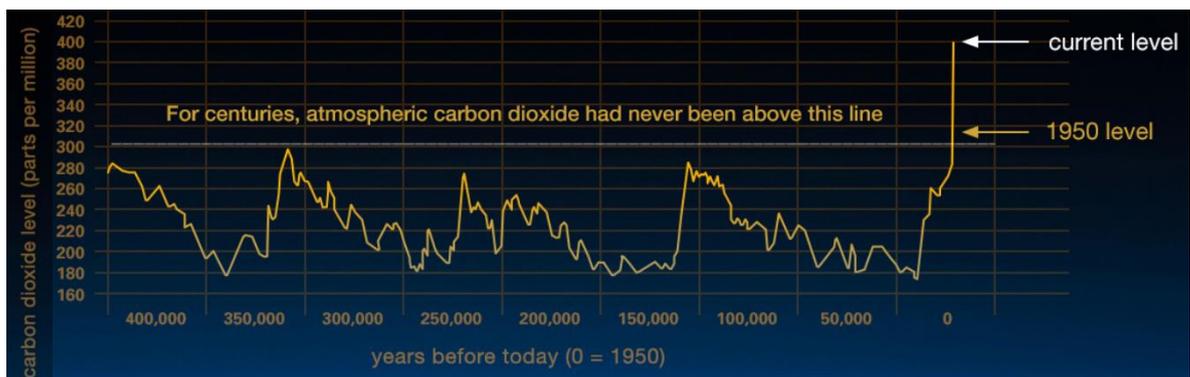


Abbildung 25 – Diagramm zur CO₂-Konzentration in der Atmosphäre mit Daten aus aktuellen Messwerten und Rekonstruktionen mittels Eisbohrkernen (Quelle: NASA – Global Climate Change; climate.nasa.gov/evidence/ aufgerufen am 20.01.2019)

Dabei spielt insbesondere Kohlendioxid eine ausschlaggebende Rolle für den anthropogenen (vom Menschen verursachten) Treibhauseffekt. Über Jahrtausende war der CO₂-Gehalt in der Erdatmosphäre stets unterhalb der 300 ppm⁶ Marke (siehe Abbildung 25). Seit der industriellen Revolution

⁶ ppm steht für parts per million, also die Anzahl an CO₂-Molekülen pro eine Million Moleküle trockener Luft.

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 Jahren⁷.

Der Hauptgrund hierfür ist, dass der Mensch, zur Erzeugung nutzbarer Energie, kohlenstoffhaltige fossile Brennstoffe verbrennt und dabei unter Sauerstoffzufuhr unter anderem Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird. Zunächst geschah dies hauptsächlich in Europa und Nordamerika, später auch in Russland, China, Indien und Brasilien. Im Jahr 2017 wurde mit 32,5 Gigatonnen die größte jemals gemessene Menge an CO₂ innerhalb eines Jahres durch den Menschen freigesetzt. Im Vergleich zum Jahr 1990 (dem Referenzjahr des Kyoto-Protokolls), stellt das eine Erhöhung der Emissionen um 65 % dar.



Abbildung 26 – Weltweiter Kohlendioxid-Ausstoß im Jahr 2015 (Credits: Internationale Energieagentur, Europäische Umweltagentur)

Dies stellt einen einschneidenden Rückschritt dar. Blieb der jährliche CO₂-Ausstoß (nicht die CO₂-Konzentration!) in den Jahren vor 2017 relativ konstant, stellt dieser Wert eine erneute Steigerung um rund zwei Prozent dar.

Abbildung 27 zeigt den globalen Anstieg der Kohlendioxidkonzentration 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 Temperaturanstieg der letzten vier Jahrzehnte verantwortlich, kann eindeutig widersprochen werden. Die Sonnenaktivität sinkt, während die Temperatur und der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre steigen. Sonnenaktivität und globale Erwärmung sind entkoppelt, sie entwickeln sich sogar gegenteilig.

⁷ 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.

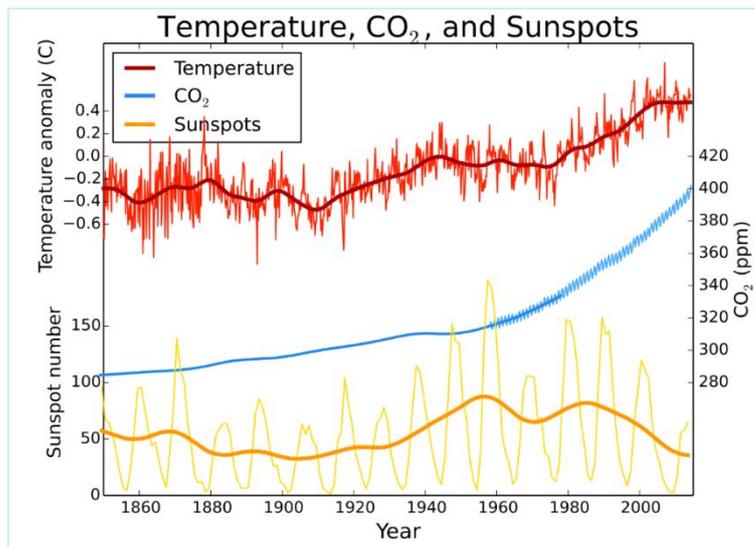


Abbildung 27 – Temperatur- und CO₂-Anstieg (Credits: Leland McInnes)

Eine wichtige Rolle für den verstärkten Treibhauseffekt spielt auch *Methan* (CH₄), welches im Vergleich zu CO₂ als Treibhausgas um einen Faktor von ca. 28 wirksamer ist. Seit der industriellen Revolution steigerte sich die Methankonzentration in der Erdatmosphäre von rund 700 ppb⁸ auf heute über 1800 ppb. Die weltweite Emission von Methan ist zu 37 % direkt oder indirekt auf Viehhaltung zurückzuführen und heute trägt Methan zu etwa 20 % zum anthropogenen Treibhauseffekt bei. Dieser Wert könnte durch das Auftauen des Permafrostbodens in Sibirien und Kanada (siehe „Wasserdampf und Rückkopplungseffekte“ unten) bald stark ansteigen. In der Erdatmosphäre hält sich Methan mit einer Lebensdauer von 10 bis 15 Jahren allerdings deutlich weniger lang als CO₂ (50 bis 200 Jahre).

Ein weiteres Treibhausgas ist *Distickstoffmonoxid* (N₂O, Lachgas), welches ein ca. 265-mal höheres Treibhauspotential hat als Kohlendioxid. In der Erdatmosphäre ist die Konzentration dieses Gases seit der industriellen Revolution um ca. 20 % angestiegen und trägt heute mit ca. 5 % zum anthropogenen Treibhauseffekt bei. Die Emission von N₂O erfolgt sowohl auf natürlichem, wie auch auf vom Menschen beeinflussten 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 ihr Anteil am gesamten Ausstoß von Treibhausgasen der Industrienationen mit 1,5 % eher gering ist, sind ihre Auswirkungen, durch die lange Verweildauer in der Atmosphäre (u. U. einige tausend Jahre) und ihrer Effektivität als Treibhausgas 12.000 bis 25.000-mal stärker als die von CO₂.

Um die Klimaschädlichkeit verschiedener Treibhausgase vergleichen zu können, ordnet man ihnen jeweils ein CO₂-Äquivalent (CO₂e) bzw. ein Treibhauspotential zu. Mit einem CO₂-Äquivalent von 28 trägt beispielsweise ein Kilogramm Methan über 100 Jahre 25-mal stärker zur Erderwärmung bei als ein Kilogramm CO₂.

⁸ ppb steht für parts per billion, also Teile pro eine Milliarde Moleküle trockener Luft.

4.2. Wasserdampf und Rückkopplungseffekte

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 (oder wegen der höheren Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre vermehrt auch als Starkregen) zurück auf die Erde. Insgesamt ist sein Beitrag zum natürlichen Treibhauseffekt ca. zwei- bis dreimal so hoch wie der von CO₂. Im Gegensatz zu CO₂ stellt Wasserdampf allerdings keine direkte Ursache für die vom Menschen verursachte Verstärkung des Treibhauseffekts dar (der anthropogene Treibhauseffekt kommt ja nicht durch den vermehrten Ausstoß von Wasserdampf zustande). Allerdings verdunstet durch die Erwärmung der Erdatmosphäre durch andere Treibhausgase vermehrt Wasser und je heißer es wird, desto höher ist die Wasserdampfkonzentration in der Atmosphäre. Dies verstärkt den Treibhauseffekt, was wiederum zu höherer Erderwärmung führt. Hinzu kommt außerdem, dass die Atmosphäre umso mehr Wasserdampf aufnehmen kann, desto wärmer sie wird. Wasserdampf wirkt also wie ein Verstärker des vom Menschen induzierten Treibhauseffektes.

Diese *Rückkopplungsprozesse* 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 versteckt war, wird durch Kohle-, 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.

Hier die vier offensichtlichsten Rückkopplungsprozesse:

1. Die globale Erwärmung führt zum Abschmelzen von Eisflächen und verringert so die Albedo der Erde. Die Erde absorbiert einen größeren Anteil der Sonnenstrahlung, wodurch die globale Erwärmung weiter vorangetrieben wird.
2. Die Temperatur der Ozeane steigt durch die globale Erwärmung. Da aber die Aufnahmefähigkeit für Kohlendioxid mit zunehmender Wassertemperatur sinkt, erhöht sich die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Dadurch wird der Treibhauseffekt und damit die globale Erwärmung weiter verstärkt (siehe auch Seite 28).
3. Durch die globale Erwärmung taut der Permafrostboden in weiten Teilen Sibiriens und Kanadas auf. Hierdurch treten große Mengen Methan in die Atmosphäre ein. Dieses wirkt als Treibhausgas und heizt somit die Erde weiter auf.
4. Wie bereits erwähnt, steigt bei zunehmender Erwärmung die Konzentration von Wasserdampf in der Atmosphäre, welcher als Treibhausgas den Treibhauseffekt weiter verstärkt.

Kapitel 5

Auswirkungen des Klimawandels

5.1. Weltweite Auswirkungen des Klimawandels

Die aktuelle globale Erderwärmung ist das Ergebnis des Anstiegs der Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid, Methan, Stickoxiden und anderen Treibhausgasen. Der 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.

Aktivität 8

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. In seinem 5. Klimareport aus dem Jahr 2013 rechnet der Weltklimarat (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. Der Grund für diesen Anstieg ist zum einen, dass Wasser (wie alle Flüssigkeiten, Festkörper und Gase) bei höherer Temperatur ein größeres Volumen einnimmt⁹. Der Anteil dieser thermischen Ausdehnung am steigenden Meeresspiegel wird auf 30 bis 55 % geschätzt. Der Rest kommt vor allem durch schmelzendes Festlandeis, wie das des antarktischen Eisschildes oder der Gletscher auf Grönland, zustande¹⁰. 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.

⁹ Ausgenommen hiervon ist natürlich die Dichteanomalie um 4 °C, die für unsere Überlegungen aber keine Rolle spielt.

¹⁰ Schmelzendes Meereis führt hingegen nicht zu einer Erhöhung des Meeresspiegels, siehe 0.

Die Prognosen bis zum Jahr 2100 sind erst der Anfang; dies zeigt der Vergleich von Temperatur und Meeresspiegel in der neueren Erdgeschichte in Abbildung 28. Würde das gesamte grönländische Eis schmelzen, zöge das einen Anstieg des Meeresspiegels von sieben Metern nach sich, das Eis aus dem West-Antarktischen Eisschild würde zu einem Anstieg von sechs Metern führen und würde das gesamte Eis der Antarktis abtauen, könnte der Meeresspiegel um ganze 65 Meter steigen!

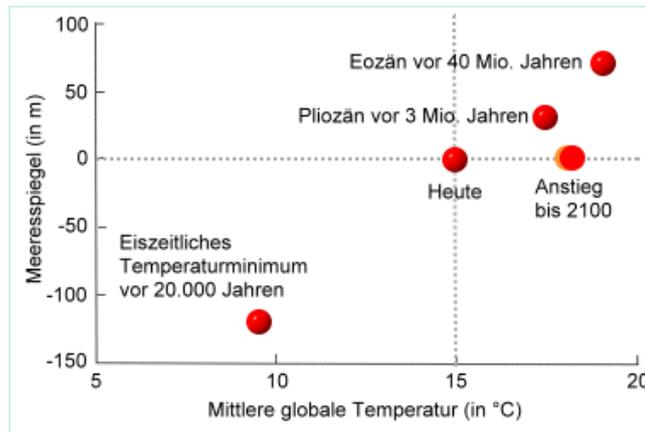


Abbildung 28 – Temperatur der Erde und Höhe des Meeresspiegels in der Erdgeschichte: Der Anstieg bis 2100 ist nur der Beginn eines langfristig viel stärkeren Anstiegs (Credits: Rahmstorf und Richardson)

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.

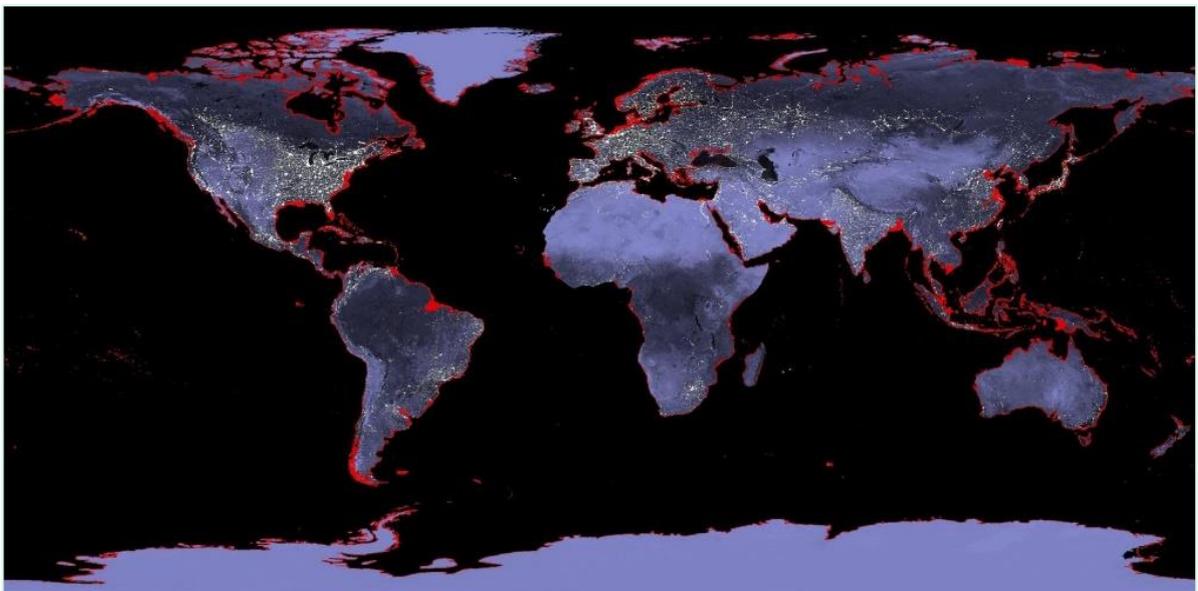


Abbildung 29 – Betroffene Küstengebiete bei einem Anstieg des Meeresspiegels um einen Meter (Quelle: nasa.gov/images/content/205267main_red_night_lg.jpg aufgerufen am 20.01.2019)

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 in etwa 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 haben.

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)

Kippelemente

Kippelemente gelten als Achillesferse des Klimasystems. Gemeint sind hiermit Bestandteile des Erdsystems, die auch durch kleine Veränderungen, falls die Schwelle bereits fast erreicht ist, in einen qualitativ neuen Zustand versetzt werden können. Sollte das geschehen, drohen drastische Folgen. Ein Kipppunkt ist z. B. die Reduktion der Albedo durch das Schmelzen von Eisflächen: Dadurch erreicht mehr Sonnenstrahlung die Erdoberfläche, was zur weiteren Aufheizung führt. Abbildung 30 zeigt einige dieser Kipppunkte.

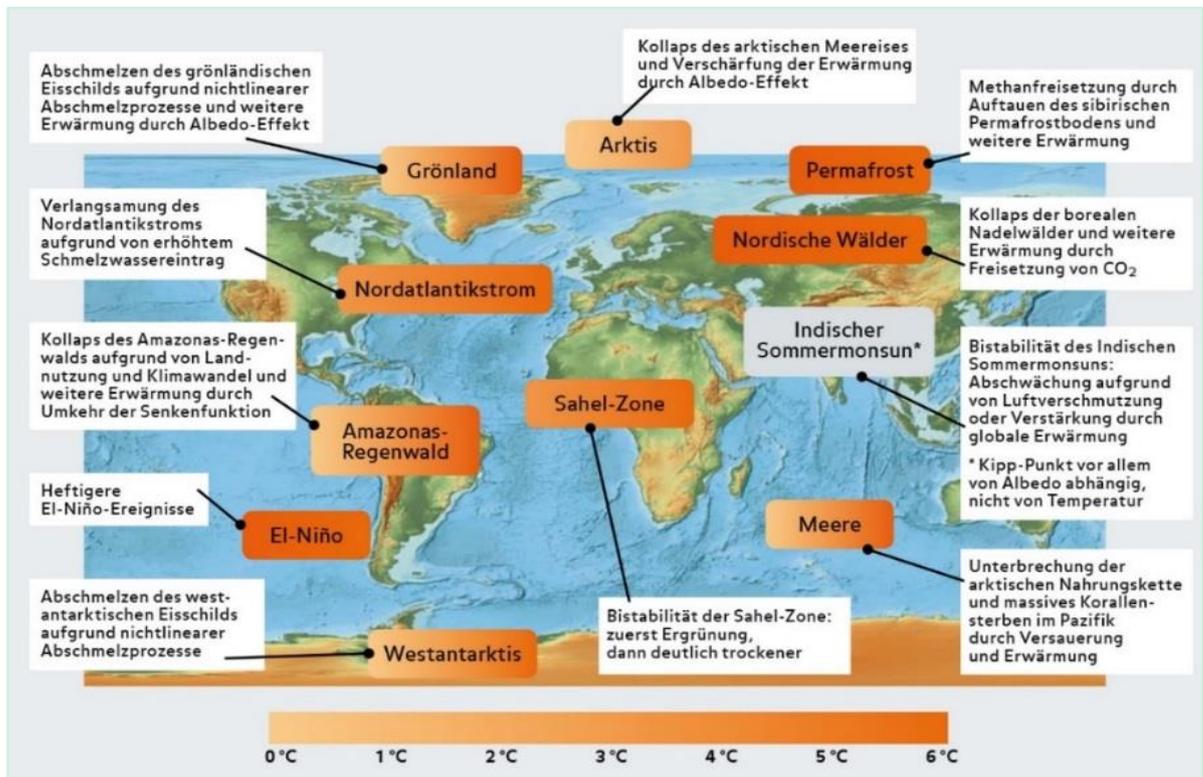
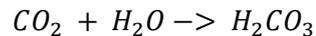


Abbildung 30 – Kippelemente des Klimasystems (Credits: Globaler Klimawandel, Germanwatch verändert nach Lenton et al.)

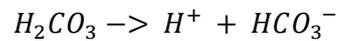
Die Versauerung der Ozeane

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 16) und Lösung von Kohlendioxid ab. In Zukunft wird das weniger werden. Denn durch die Differenz im CO₂-Partialdruck, tauscht die Atmosphäre CO₂ mit dem Ozean. Der Partialdruck entspricht dem Anteil von CO₂ am Gesamtdruck innerhalb eines Gasgemisches. Ist der Druck des Kohlendioxids in der Erdatmosphäre höher als der CO₂-Partialdruck im Ozean, so bindet das Oberflächenwasser des Ozeans Kohlendioxid. Allerdings ist der Partialdruck des CO₂ im Meerwasser stark abhängig von der Temperatur: je wärmer das Wasser, desto höher ist er. Dies bedeutet, dass ein wärmerer Ozean weniger Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen kann als ein Ozean mit niedrigerer Temperatur. Anders formuliert kann man auch sagen, dass eine Temperaturerhöhung der Ozeane zu einer höheren Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre führt.

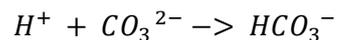
In der Erdatmosphäre reagiert CO_2 nicht mit anderen Gasen. Im Meerwasser ist das anders: Das gelöste Kohlendioxid geht Verbindungen ein und so entsteht beispielsweise Kohlensäure (H_2CO_3):



Die dabei entstehende Kohlensäure spaltet sich über die folgende Reaktion in H^+ -Ionen und Hydrogencarbonat-Ionen (HCO_3^-) auf:



Die entstehenden H^+ -Ionen gehen ihrerseits nun wieder eine Verbindung mit Carbonat-Ionen (CO_3^{2-}) ein, wobei wieder Hydrogencarbonat-Ionen entstehen:



Zusammengefasst sinkt also die Konzentration von Carbonat-Ionen durch das Lösen von Kohlendioxid in den Ozeanen. Diese Carbonat-Ionen sind jedoch für die Bildung von Kalziumcarbonat (CaCO_3), und damit als Baustoff von Kalkskeletten und -schalen (z. B. von Muscheln, Korallen, Schnecken und Seeigeln), von großer Wichtigkeit.

5.3. Der Klimawandel in Deutschland

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

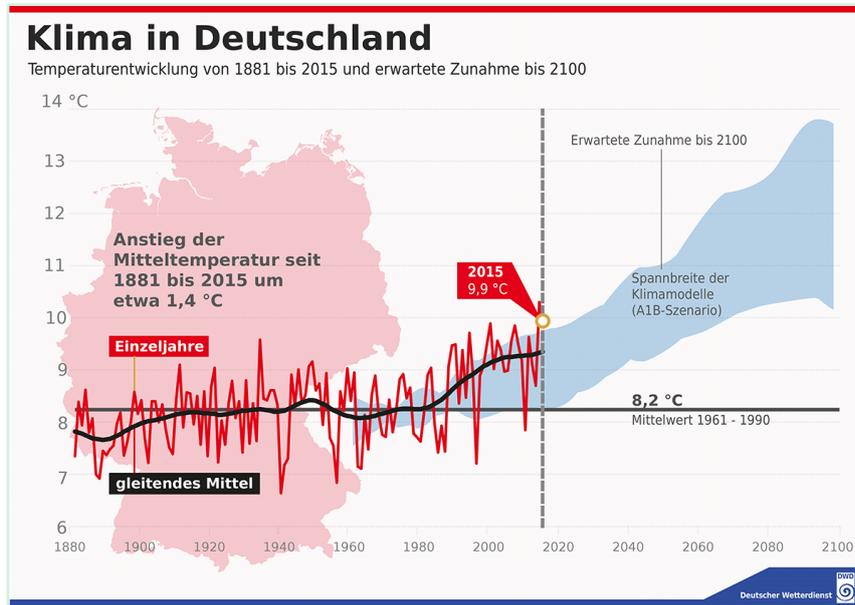


Abbildung 31 – Temperaturentwicklung in Deutschland von 1881 bis 2110 (gemessen bzw. erwartet) (Quelle: Wetterdienst.de)

Während die Oberflächentemperatur im globalen Durchschnitt von 1901 bis 2012 um 0,8 °C angestiegen ist¹¹, lässt sich für Deutschland in diesem Zeitraum eine Erwärmung von 1,4 °C beobachten. Global gesehen ist die Dekade von 2001 bis 2010 die wärmste seit 1861 und wie Abbildung 31 zeigt, ist auch hierzulande eine starke Beschleunigung des Temperaturanstiegs seit den achtziger Jahren festzustellen. Dies ist ein Trend, der sich Klimamodellen zufolge weiter fortsetzen wird.

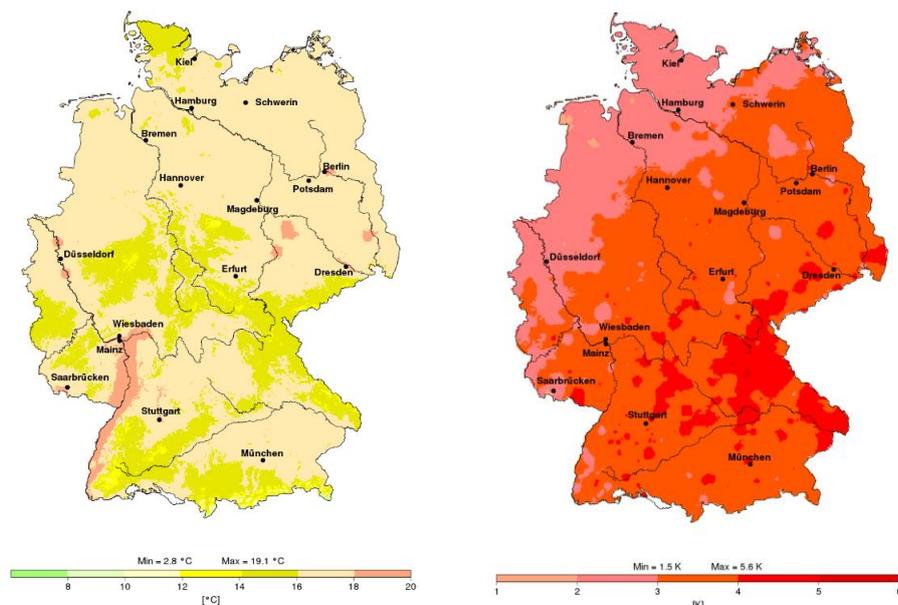


Abbildung 32 – Abweichungen der Lufttemperatur in August 2018 (rechtes Bild) von den mittleren Werten (1961–1990, links) (Quelle: www.dwd.de/DE/klimaumwelt/)

¹¹ Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/beobachteter-klimawandel> aufgerufen am 19.01.2019.

Der Temperaturanstieg hat bereits jetzt eine deutschlandweit weitgehend flächendeckende Abnahme von Frosttagen im Winter sowie gleichzeitig eine Zunahme von Sommertagen (Temperaturen > 25 °C), heißen Tagen (Temperaturen > 30 °C) und Tropennächten (Nachttemperatur > 20 °C) im Sommer zur Folge. Sommerliche Hitzeperioden werden länger und heißer und die Gefahr von Dürreperioden steigt.¹² Wie Abbildung 32 zeigt, die die Zunahme der Temperaturanomalien für den Monat Mai darstellt, treten solche Wetterextreme immer häufiger auf, wie z. B. auch im August 2018 (siehe Abbildung 32). In Deutschland wird es immer heißer.

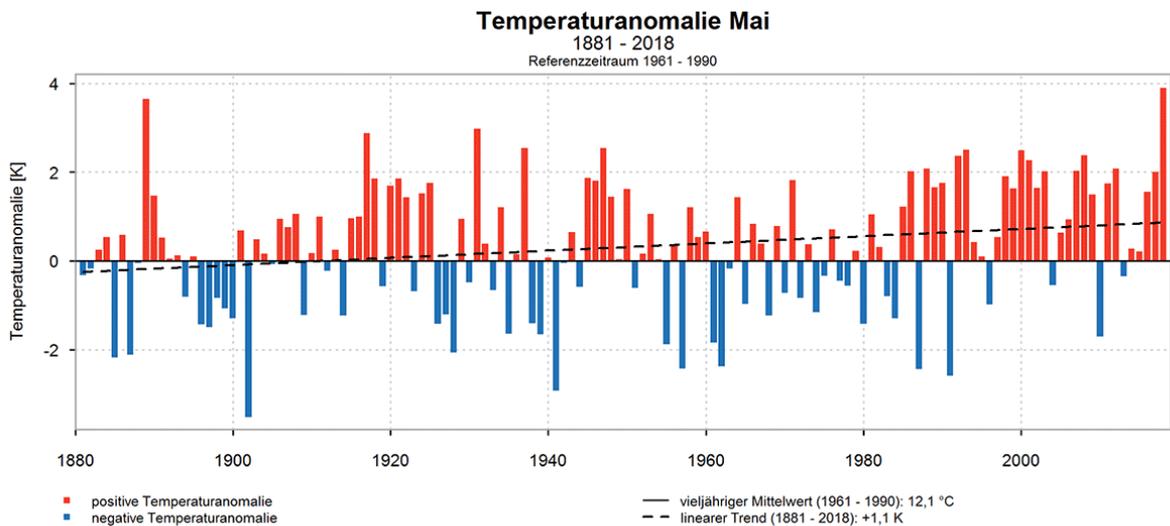


Abbildung 33 – Abweichungen der Maitemperatur für Deutschland vom vieljährigen Mittel (1961–1990)
(Quelle: www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ aufgerufen am 19.01.2019)

Bezüglich des Niederschlags ergibt sich ein regional deutlich komplexeres Bild. Aktuellen Messungen zur Folge zeigt sich tendenziell ein Rückgang der Niederschläge im Sommer und eine Zunahme der Winterniederschläge, wobei diese Entwicklung regionalen Schwankungen unterworfen ist.¹³

Da aufgrund der steigenden Temperaturen ein geringerer Anteil des winterlichen Niederschlags in Form von Schnee fällt und somit nicht zwischengespeichert wird, steigt die Gefahr von Hochwassern und Überschwemmungen. Dies wird durch die Zunahme von Starkregenereignissen, die sich bereits heute deutschlandweit feststellen lässt, noch verschärft.

Zudem steigt vor allem in den Wintermonaten die Sturmgefahr, wodurch beispielsweise in der Nord- und Ostsee die Wahrscheinlichkeit von Sturmfluten zunimmt.

¹² Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/beobachteter-klimawandel> aufgerufen am 19.1.2019.

¹³<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/klimafolgen-deutschland/klimafolgen-handlungsfeld-wasser-hochwasser> aufgerufen am 19.1.2019.

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 Deutschland haben werden.

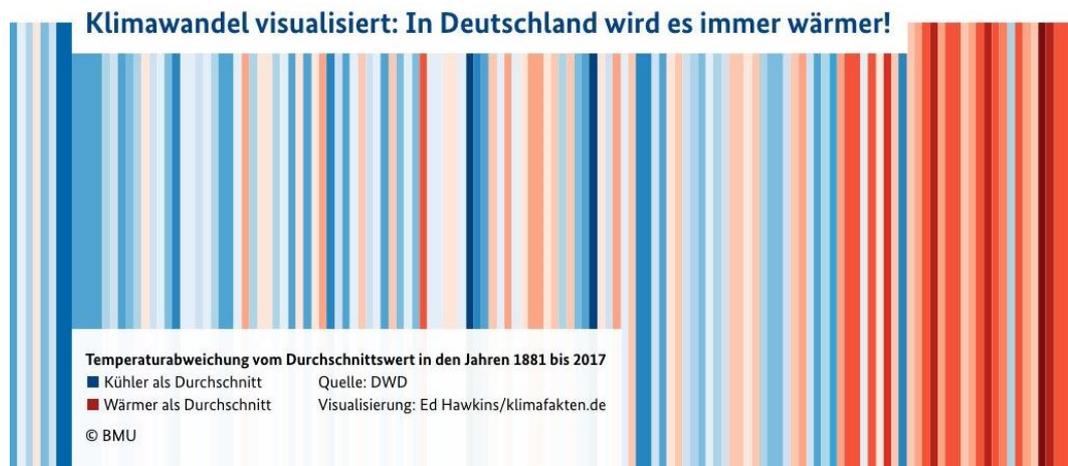


Abbildung 34 – Temperaturabweichung vom Durchschnittswert in Deutschland von 1881 bis 2017 (Credits: BMU)

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 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 35 – Niedrigwasser im Rhein im Dürresommer 2018 (Quelle: SWR Rheinland Pfalz)

Abbildung 36 zeigt eine überblicksartige Darstellung der verschiedenen Wechselwirkungen zwischen den Sphären und es wird deutlich, welche weitreichenden Auswirkungen eine durch den Klimawandel verstärkte Veränderung der Atmosphäre und der Hydrosphäre haben können.

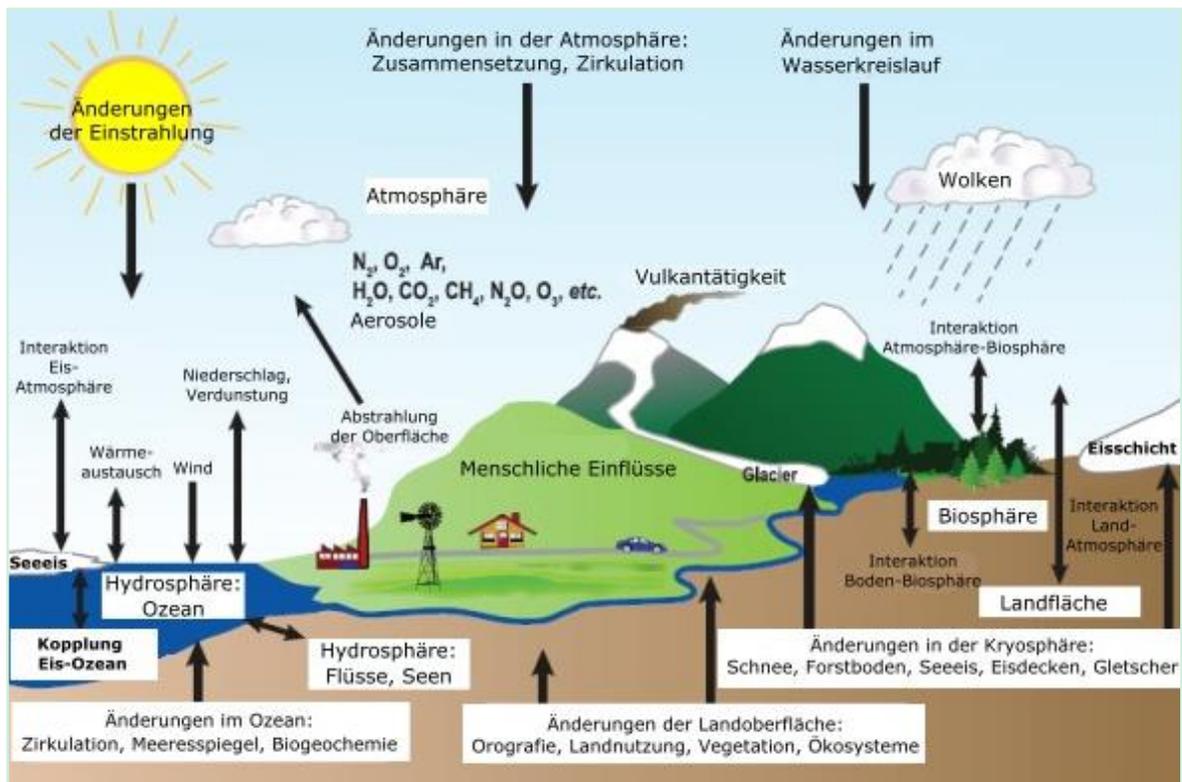


Abbildung 36 – Komponenten des Klimasystems und ihre Wechselwirkungen.
(Quelle: <http://www.oekosystem-erde.de/html/klima-02.html> aufgerufen am 19.01.2019)

Dazu zählen in Deutschland beispielsweise ein sinkender Wasserpegel der Flüsse und eine Erwärmung der Gewässer (der Rhein hatte im Sommer 2018 stellenweise eine Temperatur von 28°C), die Auswirkungen auf die Wasserqualität hat, ein Anstieg der Meeresspiegel von Nord- und Ostsee, ein Auftauen des Permafrosts in den Alpen und veränderte 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.¹⁴

¹⁴<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/klimafolgen-deutschland#strap-15396> aufgerufen am 19.01.2019.

5.4. Der Klimawandel in Bayern

Auch in Bayern sind die Auswirkungen des Klimawandels bereits deutlich spür- und messbar. Laut dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz ist zwischen 1931 und 2010 ein Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur um mehr als 1,1° C zu verzeichnen. Im gesamten Alpenraum sind die Temperaturen in den letzten 100 Jahren sogar doppelt so stark gestiegen wie im weltweiten Durchschnitt¹⁵.

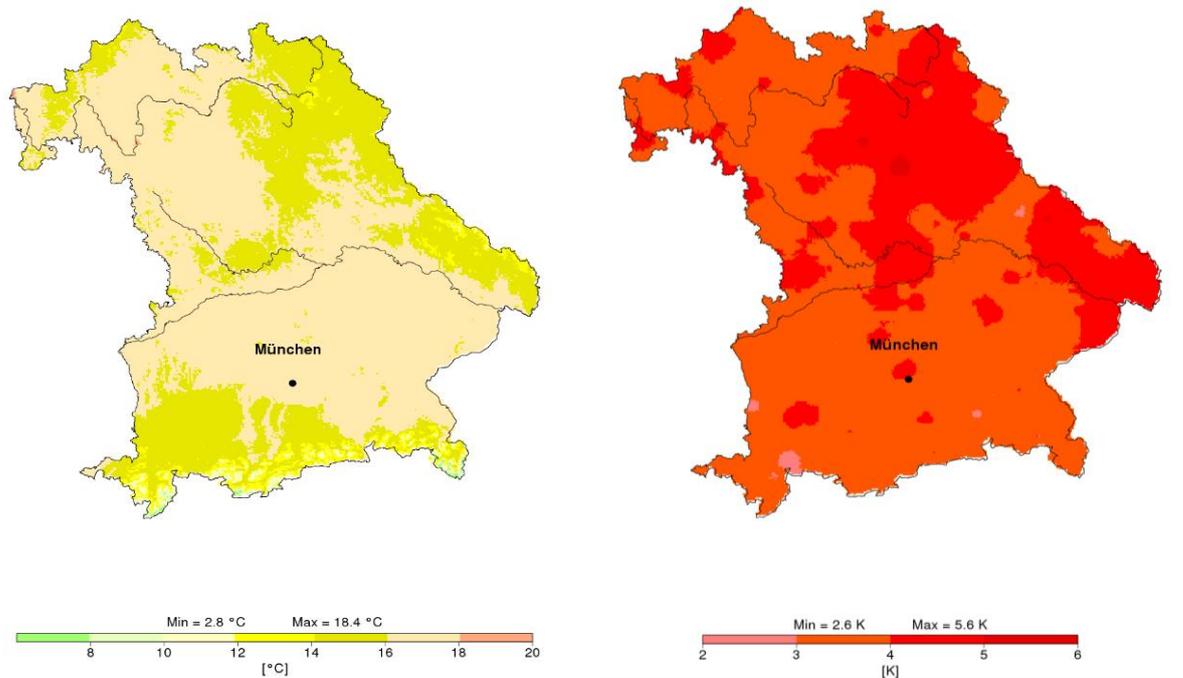


Abbildung 37 – Abweichungen der Lufttemperatur im August 2018 (rechtes Bild) von den mittleren Werten (1961–1990, links) (Quelle: www.dwd.de/DE/klimaumwelt/)

Und auch hier verstärkt sich dieser Trend seit der Jahrtausendwende zusehends. Abbildung 37 zeigt die Abweichungen der Lufttemperatur im August 2018 von den mittleren Werten der Jahre 1961 bis 1990 für Bayern. In diesem Sommer lagen beispielsweise in der Oberpfalz und in Teilen Frankens die Augusttemperaturen um fünf bis sechs Grad Celsius über dem vieljährigen Mittel. Die Häufigkeit und Stärke solcher extremer Wetterereignisse nimmt in den letzten Jahren auch in Bayern rapide zu.

Von den Folgen des Klimawandels sind in Bayern alle landschaftsprägenden Ökosysteme, wie Hoch- und Mittelgebirge, Wälder, Graslandschaften, Feuchtgebiete und Seen bereits betroffen. Zudem beeinflussen diese Entwicklungen auch das Leben der Menschen in den Städten und Kommunen Bayerns. Geht zudem mit den Hitzewellen – wie im Sommer 2018 – eine ausgeprägte Trockenheit einher, ergeben sich insbesondere für die bayerische Wasser-, Land- und Forstwirtschaft gravierende Auswirkungen. So fiel im August in der Oberpfalz und in Franken 70–90 % weniger Niederschlag als im gemittelten Durchschnitt, was zum Teil massive Ernteaufälle und in der Folge vielerorts Futtermangel zur Folge hatte.

¹⁵ stmuv.bayern.de (aufgerufen am 05.01.2019).

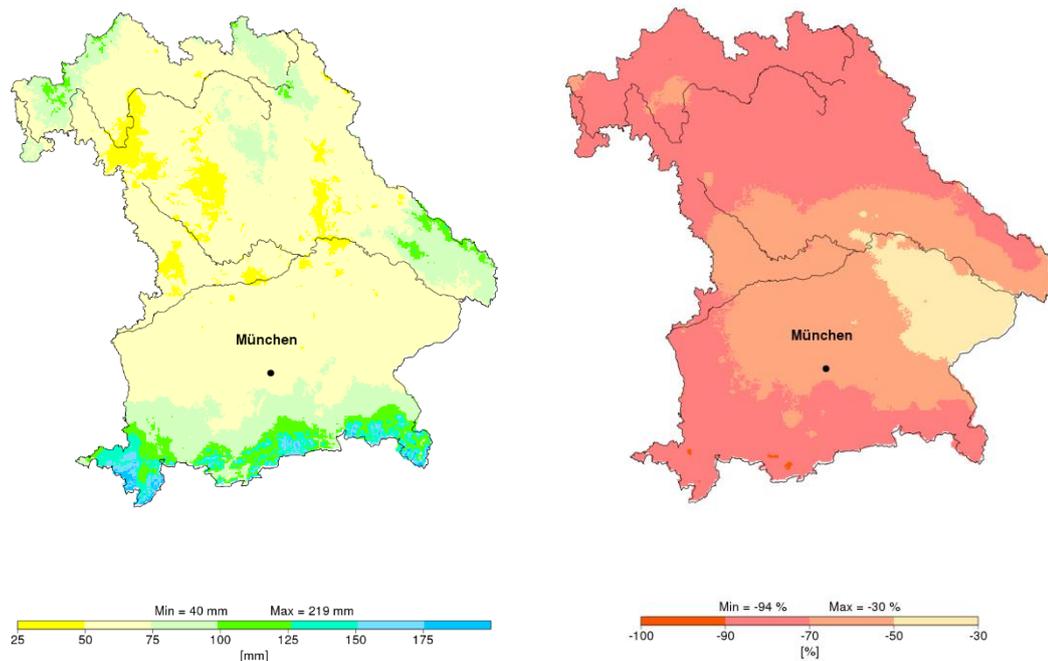


Abbildung 38 – Abweichungen des Niederschlags in November 2018 (rechtes Bild) von den mittleren Werten (1961–1990, links) in Bayern (Quelle: www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ aufgerufen am 05.01..2019)

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 den bayerischen Fließgewässern erwarten, mit Auswirkungen auf die Biosphäre, aber beispielsweise auch auf die Wasser- und Energiewirtschaft.

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 39). Dadurch kommt es verstärkt zur Bodenerosion, während gleichzeitig die Grundwasserreserven nur vermindert aufgefüllt werden.

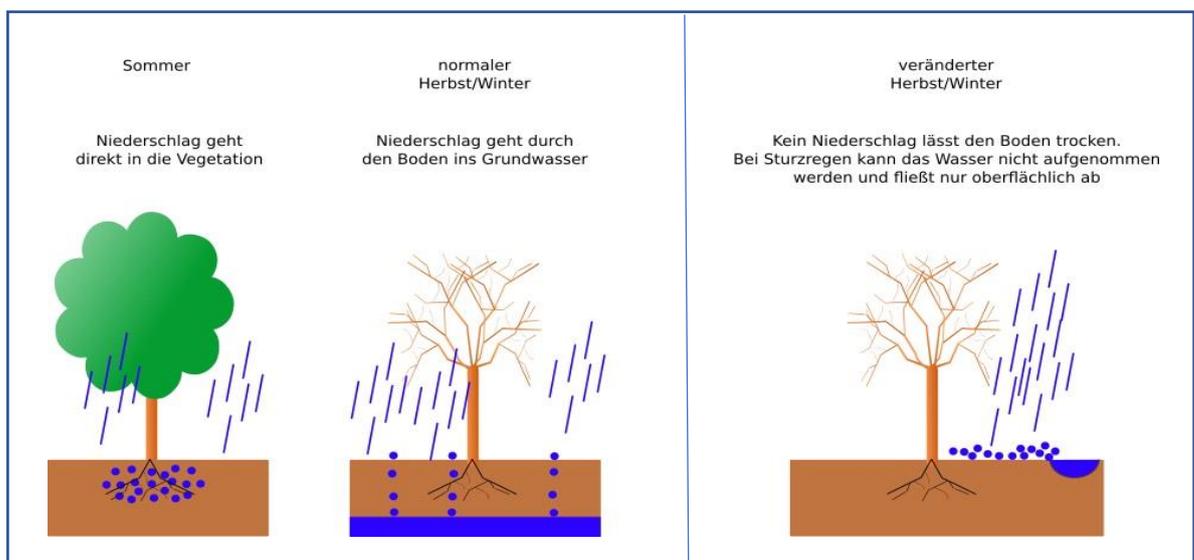


Abbildung 39 – Verminderung der Grundwasserneubildung durch erhärteten Boden (Credits: Lamparter)

Diese Problematik wird noch dadurch verstärkt, dass auf Grund der höheren Temperaturen weniger Niederschlag in Form von Schnee fällt oder die dünne Schneedecke schneller wieder verschwindet, wenn es geschneit hat. Dadurch wird im Winterhalbjahr weniger Wasser gespeichert, wichtige Wasserreserven fehlen dann, um die sommerliche Trockenheit auszugleichen. Abbildung 40 zeigt die Tage mit Schneedecke von mindestens 15 cm in den Wintermonaten im Zeitraum 1961 bis 2002.

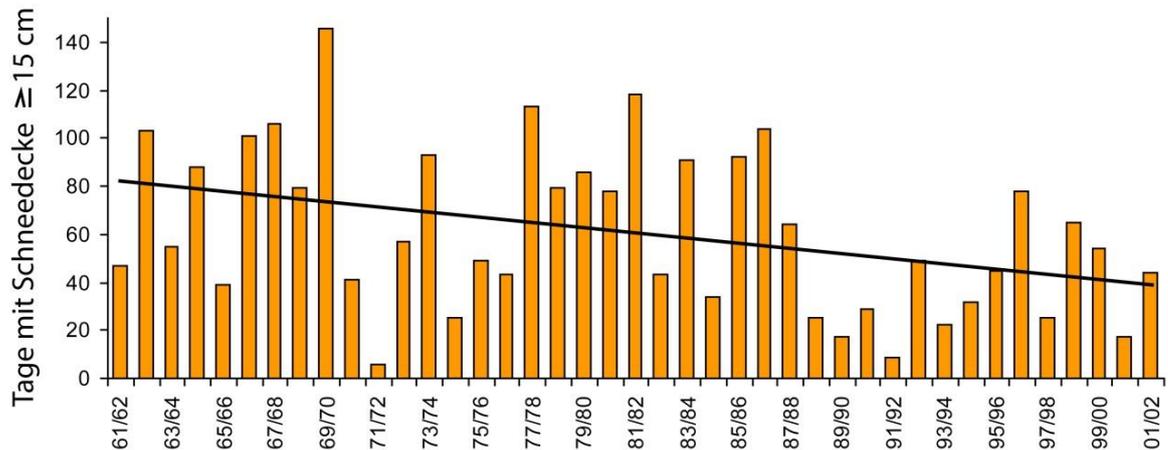


Abbildung 40 – Tage mit Schneedecke in Fichtelberg/Ofr. 685 m ü. NN (Credits: Seifert)

Die Folgen dieses Wassermangels sind bereits heute spürbar: Weil im Norden Bayerns das Grundwasser knapp geworden ist, musste Wasser von Oberbayern nach Niederbayern gepumpt werden. Doch auch im noch wasserreichen Oberbayern wird sich die Lage verändern. Die fünf Alpengletscher in Bayern verlieren seit dem Beginn der Industrialisierung zunehmend an Volumen. Heute ist nur noch ein Viertel der ursprünglich bedeckten Fläche vergletschert. Folgen sind neben der Verstärkung der Hochwasserereignisse vor allem eine Gefährdung der Trinkwasserspeicher sowie eine Bedrohung der Bergwälder und der alpinen Tier- und Pflanzenwelt.



Abbildung 41 – Ausgetrockneter Boden und verdorrte Trauben an einem Weinstock in Bayern (Credits: Alana Steinbauer)

Die Zunahme der Sommertrockenheit führt also zu einem erhöhten Wasserbedarf, vor allem auch in der Landwirtschaft, der nicht immer gedeckt werden kann und damit zu einer Beeinträchtigung der Fruchtbildung und in der Folge zu Ertragseinbußen führt. Diese werden durch die Bodenerosion sowie zunehmende Extremwetterereignisse wie Starkniederschläge, Hagel und Stürme noch verstärkt.

Exkurs: Sanierung von Mooregebieten in Bayern

Moore stellen dauernde Feuchtgebiete mit besonderen Biotopen dar. Der ständige Überschuss an stehendem Wasser, gespeist durch Niederschläge (Hochmoore) oder durch austretendes Mineralbodenwasser (Niedermoor), verschließt den Boden, hält ihn sauerstoffarm und verhindert die vollständige Zersetzung organischen Materials. Damit wird der in den organischen Stoffen gebundene Kohlenstoff im Boden festgehalten. Mit der Zeit werden die nicht zersetzten Überreste als Torf abgelagert und die Moore wachsen in die Höhe, pro Jahr ca. 1 mm. Weltweit werden durch torfbildende Moore ca. eine viertel Milliarde Tonnen an Kohlendioxid gespeichert. Um es einmal in Relation zu bringen: In Mooren lagert weltweit mehr Kohlenstoff als in den Wäldern.¹⁶ Die Trockenlegung von Mooren für landwirtschaftliche oder andere Zwecke führt zur Freisetzung großer Mengen von Kohlendioxid, aber auch weiterer Treibhausgase wie Stickoxide, in die Atmosphäre. Deshalb sind der Erhalt von Mooren und ihre Wiedervernässung ein wichtiges Instrument für den Schutz des Klimas. Außerdem haben Moore wegen ihrer Speicher- und Reinigungsfähigkeit eine besondere Bedeutung hinsichtlich des Hoch- und Grundwasserschutzes. Leider sind von den ursprünglich in Deutschland mit 1,5 Millionen Hektar heimischen Moorlandschaften, heute bis auf gut 75.000 Hektar, alle Moorflächen tot. Sie wurden trockengelegt, der Torf komplett abgebaut, oder sonst wie bebaut bzw. land- und forstwirtschaftlich genutzt. Das ist eine fatale Entwicklung, denn Moore speichern offensichtlich große Mengen an Kohlenstoff und sind deshalb für den Klimaschutz sehr wichtig. Darüber hinaus verzögern sie bei Hochwasser den Abfluss und sind vor allem auch wichtige biologische Speicher der Artenvielfalt. Insgesamt tragen entwässerte Moore mit ca. 5,1 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten zu den Treibhausgasemissionen Bayerns bei. Dieser Effekt soll durch den neuen Masterplan deutlich reduziert werden.

Um Moore wieder zum Leben zu erwecken und als Kohlenstoffsenken erneut zu aktivieren, sollen deshalb 50 Moore in Bayern wieder renaturiert, also unter Wasser gesetzt werden. Zehn Mooregebiete sind bereits entsprechend saniert, in 30 weiteren Gebieten sind Maßnahmen geplant oder begonnen. Durch die Renaturierung von Mooren wird in Bayern bereits ein positiver Klimaeffekt von jährlich 25.000 Tonnen CO₂ erreicht.¹⁷



Abbildung 42 – Moor Walsrode (Credits: Poul Krosggard)

¹⁶ Deutsche Gesellschaft für Moor- und Torfkunde e.V. (Hrsg.) (2009): Was haben Moore mit dem Klima zu tun?

¹⁷ Siehe hierzu auch: www.stmuv.bayern.de/themen/naturschutz/biodiversitaet/artenschutz/arten_biotopschutz.htm.

Kapitel 6 Klimawandel im Unterricht: Verstehen und Handeln

6.1. Notwendigkeit zum Handeln

Auf der Weltklimakonferenz in Paris (COP21) wurde ein Klimaschutzabkommen mit dem verbindlichen Ziel vereinbart, die *Erderwärmung auf 2 Grad zu begrenzen*. 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 43).

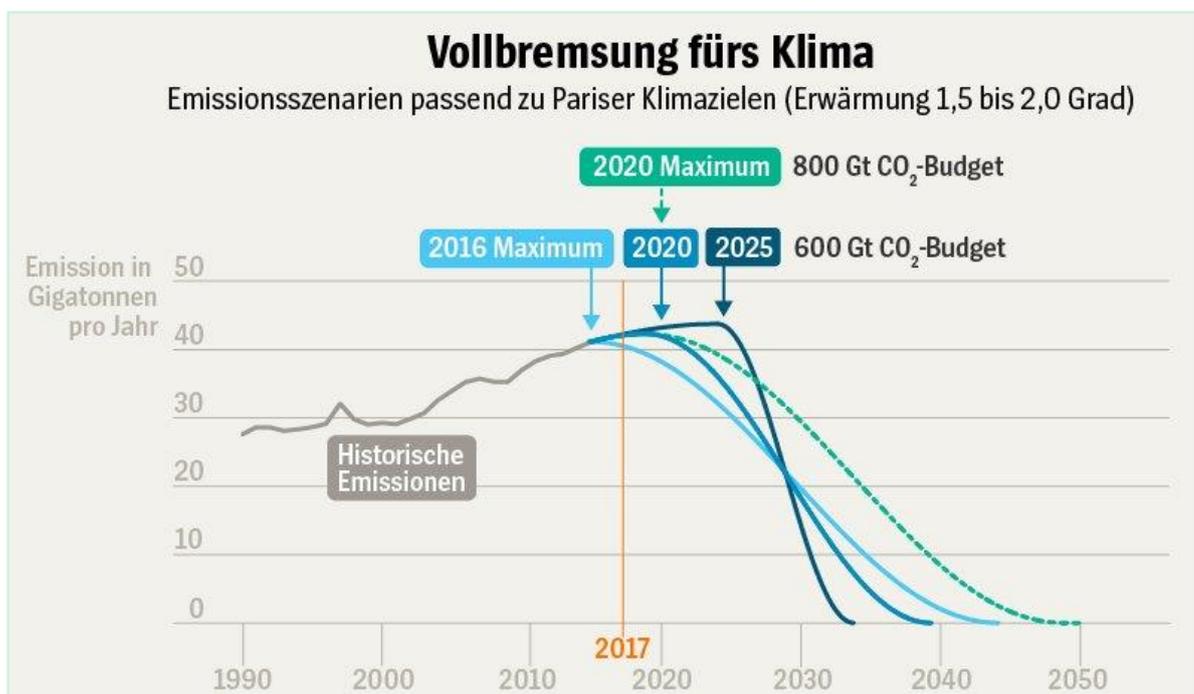


Abbildung 43 – Emissionsszenarien zur Erreichung der Pariser Klimaziele
(Quelle: Spiegel Online; The Global Carbon Project, Nature, Rahmstorf)

Fest steht, und so legt es auch das Abkommen fest, 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 verhindern in vielen Fällen die Umsetzung des Klimaabkommens.

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

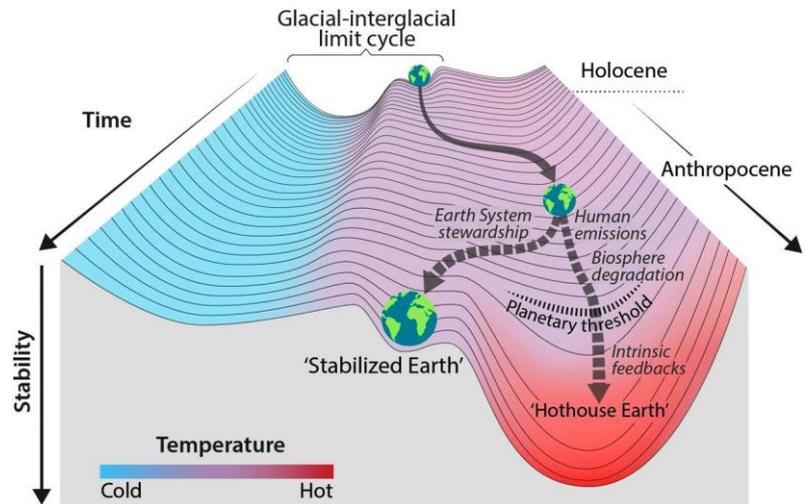


Abbildung 44 – Trajektorien des Erdsystems im Anthropozän. Durch die Auswirkung der Menschen befindet sich die Erde in einem gefährlichen Kippunkt (Credits: Steffen et al.)

Trotz all dieser Kenntnisse und Warnungen aus der Wissenschaft, hält nur etwa jeder siebte Deutsche den Klimawandel für eines seiner drei größten Sorgen (siehe Abbildung 45). Und selbst wenn man sich des Problems bewusst ist, scheint der Schritt hin zum konkreten Handeln oft riesig.

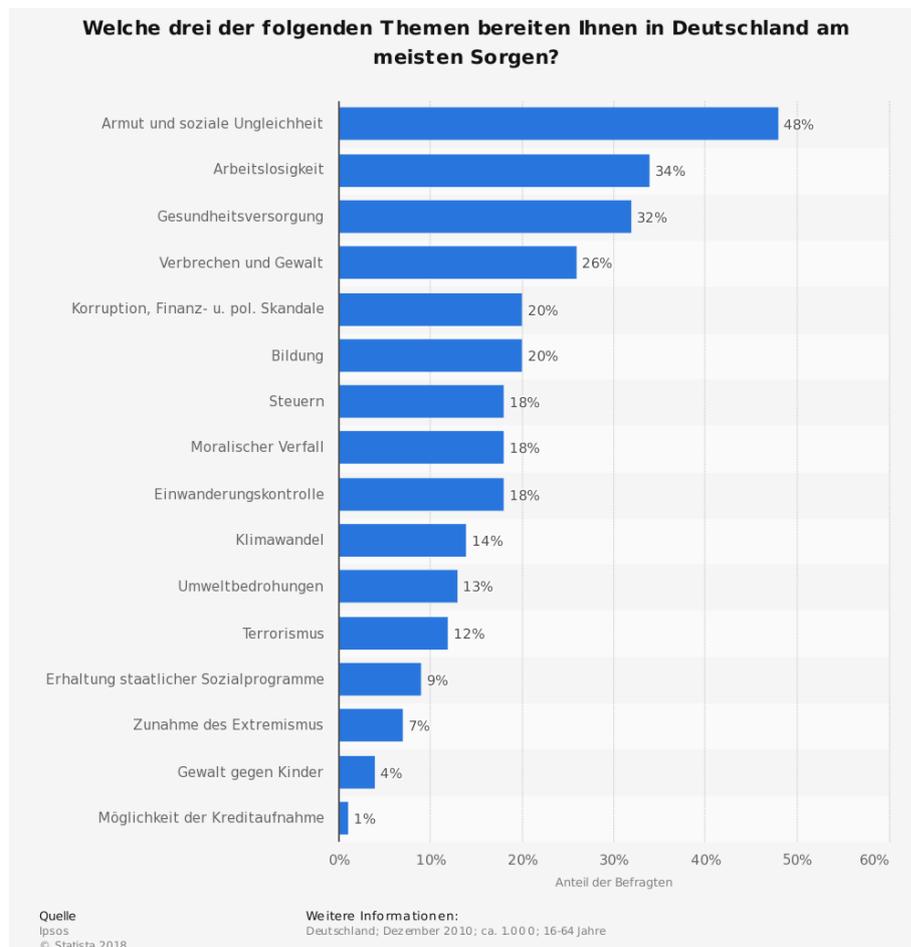


Abbildung 45 – Umfrage zu den Sorgen der Deutschen (Quelle: Statista 2018)

Was können also Lehrerinnen und Lehrer in Deutschland tun, um Schüler/innen zu motivieren, sich aktiv an der Bekämpfung des Klimawandels zu beteiligen? Bevor wir uns konkreten Vorschlägen zuwenden, soll an dieser Stelle kurz beschrieben werden, warum das Wissen um den Klimawandel für viele Menschen im Alltag keine Rolle spielt, welche ethischen Werte Menschen für einen erfolgreichen Klimaschutz besitzen und ausleben sollten, und welche psychologischen Barrieren Menschen vom Handeln abhalten.

6.2. Warum ethisch handeln?

In seinem Werk „Prinzip Verantwortung“, schreibt der Naturphilosoph Hans Jonas, dass das Umweltproblem kein Oberflächenphänomen sei, dessen man allein mit modifizierten Regeln und Regulationen Herr werden könne. Vielmehr stelle es ein Tiefenproblem an den Fundamenten des Mensch-Natur-Verhältnisses und der Gegenwartskultur insgesamt dar, so seine Diagnose.

Seine Überlegungen bündelt Jonas in seinem *verantwortungsethischen Imperativ*: „Handle so, dass die Wirkungen deiner Handlungen verträglich sind mit der Permanenz echten menschlichen Lebens auf Erde“. Jonas fasst den Menschen als teilnehmenden Teil der Natur auf, die er aber zugleich nach seinen Normen und Wertvorstellungen behandelt.

„Werte“, denen kulturelle Normen und konventionelle Regeln als regulative Idee und wegweisendes Ideal zugrunde liegen, eignen sich aufgrund ihrer positiven Konnotation, ihrer Orientierungsfunktion und motivierenden Kraft besonders gut in der Anwendung auf das Thema Klimawandel. Sie erlauben Handlungsoptionen, Ziele und Wünsche zu gewichten und abzuwägen. Werte sind mehr oder weniger bewusste Vorstellungen darüber, was letztlich und unbedingt gut, wertvoll und wichtig ist. Die uns umgebende Natur ist für uns gut, wertvoll und wichtig. Sie ist die Bedingung der Möglichkeit überhaupt als Mensch leben zu können. Ihr Schutz stellt einen unbedingten Wert dar. Nur wie bilden sich solche Werte? Laut Dr. Hutflöz von Hochschule für Philosophie München geschieht die Wertebildung als soziale und emotionale prägende Orientierungserfahrung. Werte können nicht vermittelt werden, sondern müssen vorgelebt werden. Die aktive Auseinandersetzung mit Klimaschutz und entsprechenden Maßnahmen können hier als beispielhaftes wertebildendes Projekt bezeichnet werden.

6.3. Psychologische Hürden bei der Bekämpfung des Klimawandels

Wir widmen uns nun den psychologischen Hürden, die laut psychologischen Studien die Menschen vom Handeln abhalten¹⁸ :

A. Risiken und Konsequenzen scheinen weit entfernt

Anscheinend ist für den überwiegenden Teil der Menschen noch unklar, was der Klimawandel für sie bedeutet. Der Klimawandel scheint zeitlich und räumlich weit entfernt, „keiner rechnet hier mit verheerenden Katastrophen“.¹⁹ Die Menschen verbinden kein akutes Risiko damit. Wenn dies so ist, dann müssen die unmittelbaren, regionalen und lokalen Auswirkungen des Klimawandels im Unterricht diskutiert werden. Denn wer zum Handeln angeregt werden soll, muss fühlen, sehen und mit der Realität direkt konfrontiert werden.

¹⁸ Swim et al. 2011, van der Linden 2014.

¹⁹ Zitat von Dr. Gerhard Hartmuth, Umweltpsychologe am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Leipzig.

B. Der eigene Einfluss wird unterschätzt

Manch andere wiederum verstecken sich hinter dem Argument, dass solange z. B. die USA und China ihren CO₂-Ausstoß nicht reduzieren und Millionen Autofahrer den Klimawandel beschleunigen, jegliche individuelle Anstrengung sinnlos sei. Das Gefühl, allein nichts ausrichten zu können zieht uns aus der Verantwortung – die Problematik wird an die Politik delegiert. Wenn wir jedoch Schülergruppen einladen, aktiv Klimaschutz zu betreiben, sich zu engagieren und sich evtl. auch an Vorbildern wie beispielsweise der schwedischen Schülerin Greta Thunberg²⁰ zu orientieren, dann kann eine Gruppendynamik und eine Identifikation mit Werten entstehen, die das individuelle Gefühl des Alleinseins überwinden kann.

C. Gewohnheiten

Tiefsitzende Verhaltensweisen sind ebenso ein Hindernis für umweltbewusstes Handeln. Eingespielte Verhaltensmuster werden nur selten hinterfragt und Tag für Tag auf Autopilot abgespult: sei es die Fahrt zur Schule oder zur Arbeit mit dem Auto, ein Kaffee zum Mitnehmen unterwegs, das Fleisch zum Mittagessen oder der Shopping-Ausflug am Wochenende. Daran etwas zu ändern ist schwierig, aber möglich. Alltagshandlungen sollten hinterfragt werden: „Wie viel CO₂ kostet das?“.

6.4. Umsetzung in der Schule

Mit Berücksichtigung der oben beschriebenen psychologischen Hürden kann in der Schule nun, sei es im Unterricht oder im Rahmen von Schulprojekten, gehandelt werden. Folgender Ablauf ist denkbar:

1. Den Klimawandel verstehen

Die Schüler/innen verstehen die wissenschaftlichen Ursachen und Zusammenhänge des Klimawandels und erkunden die Querverbindungen zwischen Physik, Chemie, Biologie und Geografie. Der Klimawandel als Thema eignet sich hervorragend zum fächerübergreifenden Arbeiten im MINT-Bereich. Hierbei soll dieses Handbuch mit den dazugehörigen Experimenten eine Hilfestellung sein.

Auch im Rahmen eines W-Seminars kann auf Grundlage dieses Handbuches erfolgreich gearbeitet werden. Durch die große Bandbreite an möglichen Seminarthemen können viele Interessen angesprochen werden.



Abbildung 46 – Eine Schülerin misst die Wärmeabsorption durch CO₂ (s. Aktivität 4). Tag der Physik 2018, LMU (Credits: Scorza)

2. Konkrete Beispiele zu den Auswirkungen des Klimawandels in der Region und in Deutschland recherchieren und diskutieren

Die Umweltministerien der Länder bieten in ihren Portalen Informationen über lokale Veränderungen und Auswirkungen des Klimawandels an (u. a. Abweichungen der Lufttemperatur vom 30-Jahres-Mit-

²⁰ Deren kurze Rede auf der Weltklimakonferenz in Katowice ist übrigens sehr sehenswert.

tel, Niederschläge, Grundwasserknappheit für die Landwirtschaft, Auftreten von Stürmen und Hitze- wellen). Des Weiteren bietet der Deutsche Wetterdienst mit seinem Klimaatlas²¹ anschauliche inter- aktive Karten, die es erlauben die Auswirkungen des Klimawandels in den einzelnen Bundesländern zu erkunden (siehe auch Abbildung 37 und Abbildung 38).

Zeugen des Klimawandels, wie z. B. Landwirte können interviewt werden, um direkt von Betroffenen zu erfahren, wie sich die Natur in den letzten Jahren verändert hat. Ebenso kann man beispielsweise den Arbeitsauftrag erteilen, Tageszeitungen auf regionale Ereignisse zu durchsuchen, die mit dem Klimawandel in Verbindung.

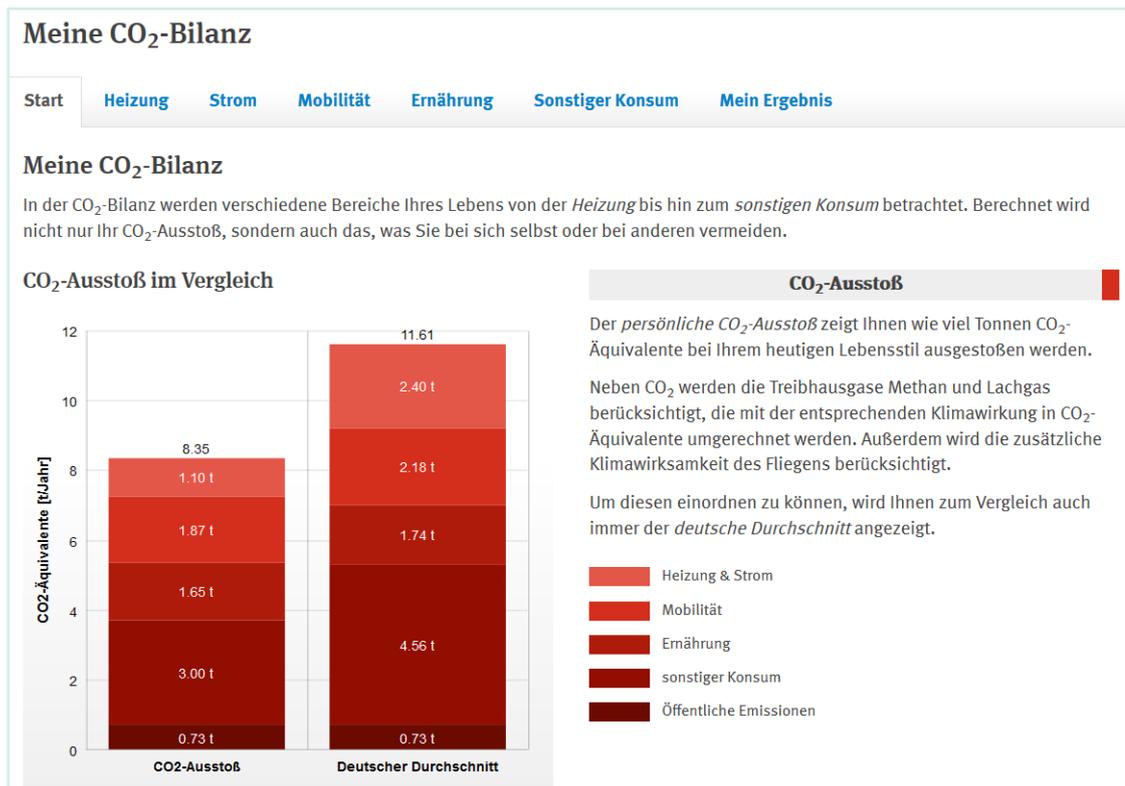


Abbildung 47 – CO₂-Rechner des Umweltbundesamtes. Vergleich der individuellen CO₂-Emission mit dem deutschen Durchschnitt nach Bereichen unterteilt (Quelle: www.uba.co2-rechner.de aufgerufen am 28.01.2019).

3. Die Notwendigkeit zum individuellen Handeln wecken

Im nächsten Schritt können die Schüler/innen den CO₂-Ausstoß in Deutschland vor dem Hintergrund des Pariser Klimaabkommens reflektieren. Soll der Anstieg der Erdtemperatur auf zwei Grad begrenzt werden, dürfen, nach Berechnungen des Öko-Instituts und Partnern zufolge,²² ab 2015 bis zum Jahr 2050 weltweit insgesamt maximal 890 Milliarden Tonnen CO₂-Äquivalent in die Atmosphäre ausgestoßen werden. Für Deutschland verbleiben bei einem Pro-Kopf-Schlüssel insgesamt 9,9 Milliarden Tonnen und unter Berücksichtigung der bisherigen Emissionen von 2015 bis 2017 ca. 217 Millionen Tonnen für das Jahr 2018. Im Jahr 2017 hat Deutschland aber, nach Zahlen des Umweltbundesamtes, insgesamt 905 Millionen Tonnen CO₂ ausgestoßen, der Tag an dem Deutschland sein Budget für 2018 aufbrauchte war der 28. März.

²¹ Die Adresse hierzu ist: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html.

²² <https://zukunft.erdgas.info/fileadmin/public/PDF/Presse/co2-tag-2018-faktenblatt.pdf> (aufgerufen am 28.01.2019).

Dieser Ansatz, das globale Problem Klimawandel herunterzubrechen, kann nun bis zur Einzelperson weitergeführt werden. Laut Daten des Umweltbundesamtes verursacht ein deutscher Durchschnittsbürger aktuell eine Emission von knapp 12 Tonnen CO₂ äquivalenter Treibhausgase. Ein Wert, der bis 2050 auf ca. eine Tonne reduziert werden muss, wenn Klimaschutzziele erreicht werden sollen. Anhand eines CO₂-Rechners können die Schüler/innen ihre persönliche CO₂-Bilanz berechnen, die dann als Startwert für das folgende Handeln benutzt werden kann (siehe Abbildung 47). Interessant ist hierbei auch eine Betrachtung der Emissionen in den einzelnen Bereichen (Heizung und Strom, Mobilität, Ernährung, sonstiger Konsum, öffentliche Emissionen) und jeweils möglicher Einsparpotenziale.

4. Konkret Handeln

Um die Schüler/innen zum Handeln zu motivieren, kann von einzelnen Schülern oder Schülergruppen berichtet werden, die durch ihr Engagement viel erreicht haben. Erwähnenswert sind hier beispielsweise Felix Finkbeiner, der „Plant for the planet“ ins Leben gerufen hat, Xiuhtezcatl (sprich „Schuh-tess-kat“) Martinez, der gemeinsam mit anderen Schülern die US-Regierung wegen ihrer Klimapolitik verklagt oder natürlich Greta Thunberg, die eine weltweite Protestwelle für Klimaschutz ins Rollen brachte. Verschiedene Autoren beschäftigen sich ebenfalls mit den oben beschriebenen Widersprüchen und legen dar, wie man konstruktiv mit ihnen umgehen kann und stellen Lösungsansätze und Handlungsmöglichkeiten vor (z.B. „Wenn nicht jetzt, wann dann?: Handeln für eine Welt, in der wir leben wollen“ von Harald Lesch und Klaus Kamphausen).



Abbildung 48 – Aktiv werden und Energie einsparen (Credits: Theis-Bröhl)

Im Rahmen des *Lehrernetzwerks Klimawandel* sollen konkrete Unterrichtsmodule, Materialien und Projektideen für verschiedene Jahrgangsstufen und Fächer erarbeitet und Schulen gesammelt zur Verfügung gestellt werden, um in Form fächerübergreifenden Arbeitens flexibel im Laufe eines Schuljahres eingesetzt werden zu können (siehe „Aufruf zur Mitwirkung!“). Hierbei wird die Hilfe engagierter Lehrerinnen und Lehrer benötigt!

Denkbar wären z. B. folgende Ansätze:

1. In Gruppenarbeit können verschiedene Möglichkeiten recherchiert und erarbeitet werden, wie man selbst aktiv am Klimaschutz mitwirken kann. Als Produkt kann beispielsweise eine Grafik wie in Abbildung 48 entstehen.
2. Die Schüler/innen schließen sich als Klasse zusammen, um in einem „Klimapakt“ für eine bestimmte Zeit gemeinsam ihre Verhaltensweisen zu reflektieren und dann anzupassen. Hier kann zur Motivierung mit dem Vorbildcharakter gearbeitet werden: Kann ich beweisen, dass man als Einzelperson klimaverträglich leben kann? Kann ich dazu beitragen, dass ich, meine Schule, mein Haushalt, mein Dorf oder Deutschland ein Vorbild in Sachen Klimaschutz wird? In der gemeinsamen Auseinandersetzung mit diesen Inhalten können sich so nach und nach neue Denkweisen und Verhaltensmuster in den Alltag einschleichen, die langfristig als Werte verinnerlicht werden.
3. Die Erstellung von Info-Grafiken, in denen z. B. die CO₂-Emission eines Hamburgers, einer Curry-Wurst und einem Teller Spaghetti mit Tomatensoße verglichen werden, stellen ein schönes Projekt dar. Was kostet mein Essen in „CO₂-Einheiten“?
4. Hinsichtlich von Verkehr und Mobilität kann auf die Ferien und Nach-Abiturreise hingewiesen werden. Denn jedes Jahr fliegen Tausende deutsche Abiturienten über die Ozeane, momentan gerne nach Neuseeland oder Australien – bei einem Ausstoß von 10,2 Tonnen CO₂ pro Passagier und pro Flug. Alternativen zu solchen Fernreisen können in den Abschlussklassen diskutiert werden: Wie wäre es Deutschland oder Ost-Europa zu erkunden, oder ein Freiwilliges Soziales Jahr in der Nähe zu machen?

10 Klimaretter-Tipps für Jedermann

Das Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz in Thüringen hat in einem Klimaretter-Sparbuch²³ *10 Klimaretter-Tipps* zusammengestellt. Hier eine leicht abgewandelte und für Schülerinnen und Schüler angepasste Version:

1. Nutze deine Muskelkraft und bleibe fit zu Fuß oder mit dem Fahrrad. Nutze den Nahverkehr und lass das Auto stehen. Wenn du ohne Flugreisen auskommst, kannst du zusätzlich mehrere Tonnen CO₂ pro Jahr sparen!
2. Wechselt zuhause zu einem Stromanbieter, der 100 % Ökostrom anbietet. Dies verbessert eure CO₂-Bilanz nicht nur maßgeblich, es fördert auch die Energiewende!
3. Werde Teilzeitvegetarier. Das ist gesund und verbraucht viel weniger Ressourcen als fleischreiche Ernährung. Nach einer britischen Studie verursachen Viel-Fleisch-Esser das 2,5-fache an CO₂ im Vergleich zu einem Veganer. Die Emissionen aus der Landwirtschaft sind nach der Energiewirtschaft und dem Mobilitätssektor (84,5 %) der zweitgrößte Verursacher von Treibhausgasen in Deutschland. Das liegt vor allem am Methanausstoß der Kühe für die Fleisch- und Milchproduktion und dem Einsatz von Düngern.
4. Der Konsum regionaler, saisonaler und biologischer Lebensmittel verbessert deine Bilanz zusätzlich und ist dabei boden- und umweltschonend sowie tierfreundlich. Ganz nebenbei würden weniger Lastwagen über die Autobahnen Europas fahren.
5. Heize planvoll. Eine Faustregel besagt: Wenn die Temperatur nur um 1 °C gesenkt wird, spart das bereits rund 6 % Energie. Die Raumtemperatur sollte nachts aber nicht auf weniger als 15 bis 16 °C gesenkt werden.
6. Kaufe mit Bedacht gezielt Dinge, an denen du lange Freude haben wirst. Nutze Second-Hand-Läden und Gebrauchtwarenbörsen im Internet. Repariere, verkaufe oder verschenke Dinge, statt sie wegzuerwerfen.
7. Prüfe, ob du und deine Familie wirklich ein Auto benötigen. Wenn ihr um eine Nutzung nicht herumkommt, prüfe, ob Größe, Verbrauch und Ausstattung für den Nutzen angemessen sind.
8. Lasse dein angelegtes Geld nur für Dinge arbeiten, die gut für Mensch und Natur sind und wechsle, wenn nötig die Bank. Geldanlagen und Girokonten gibt es auch bei ökologisch-ethischen Geldinstituten, die transparent zeigen, wofür ihr Geld verwendet wird.
9. Schöner wohnen: Die beste CO₂-Bilanz erreichst du in gut gedämmten, kleinen Wohnungen mit modernen Heiz- und Beleuchtungstechniken. Wenn deine Eltern Hausbesitzer sind, lohnt sich der Austausch der Heizungspumpe. Je früher sie diese auf den aktuellen Stand bringen, umso weniger Energie geht verloren.
10. Wasche richtig! Der Verzicht auf Vorwäsche und Trockner und das Waschen bei 40 statt 60 °C (bei 2–3 Ladungen pro Woche) spart dir bis zu 250 kg CO₂ im Jahr und jede Menge Stromkosten!

²³ Download unter www.thueringen.de/de/publikationen/pic/pubdownload1726.pdf.

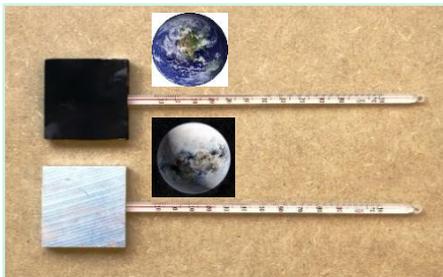
6.5. Aktivitäten

Die im Folgenden vorgestellten Aktivitäten können mit einfachen Mitteln als Schülerexperimente durchgeführt werden. Die Kosten für das Zusammenstellen aller Materialien, inklusive Koffer zur Aufbewahrung, betragen ca. 90 Euro.

Die Experimente mit den zugehörigen Arbeitsaufträgen sollten von Schüler/innen ab der 8. Jahrgangsstufe bearbeitet werden können.

In welcher Form und in welchem Rahmen diese Aktivitäten durchgeführt werden, bleibt bis auf Weiteres den Lehrkräften überlassen. Konkret auf bestimmte Jahrgangsstufen und Fächer abgestimmte Unterrichtseinheiten sollen im Rahmen des *Lehrernetzwerks Klimawandel* erarbeitet und zur Verfügung gestellt werden (siehe „Aufruf zur Mitwirkung!“).

Als Möglichkeit bietet sich mit den meisten Aktivitäten sicherlich ein Stationenlernen an, wobei die Arbeitsaufträge dann laminiert an den Stationen ausgelegt werden können.



(Credits von links nach rechts: Fischer, Scorza, Türk, Nielbock, Strähle (4x))

Aktivität 1

Größenverhältnisse im Sonnensystem

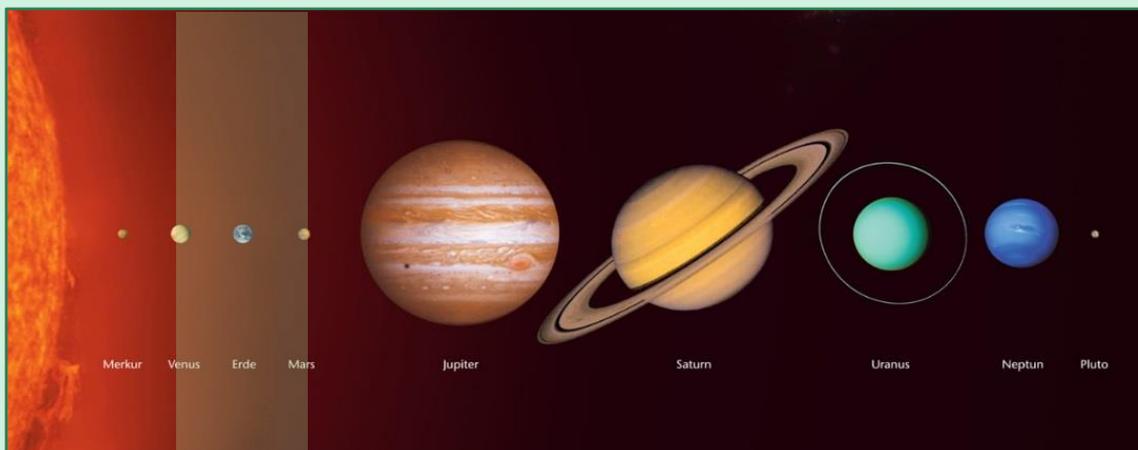
Cecilia Scorza, Olaf Fischer

Ziel:

Mit dieser Aktivität werden die Entfernungen und Größenverhältnisse im Sonnensystem anhand verschiedener Planetenmodelle verdeutlicht.

Hintergrund:

Unser Sonnensystem besteht aus einem Stern (der Sonne), acht Planeten, Zwergplaneten, vielen Monden (umkreisen die Planeten), Asteroiden und Kometen. Im Innersten befinden sich vier Gesteinsplaneten: Merkur, Venus, Erde und Mars. Danach folgen vier Gasplaneten: Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun, und zum Schluss der Zwergplanet Pluto. In der Lebenszone zwischen Venus und Mars kann Wasser in flüssiger Form existieren.



Das Sonnensystem und ihre Lebenszone (Credits: NASA/Scorza)

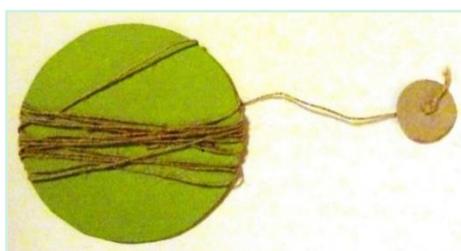
Materialien:

- ✓ 4 Pappscheibenmodelle
- ✓ Planetenmodelle aus Holz
- ✓ Maßband

Durchführung:

1. Erde und Mond

Die grüne Pappscheibe (1) hat einen Durchmesser von 10 cm und entspricht im ersten Modell der Erde, die braune Kartonscheibe dem Mond. Die Größenverhältnisse sind maßstabsgetreu wiedergegeben.



Pappmodell zur Demonstration der Entfernung Erde-Mond (Credits: Scorza)

- Schätze, bevor du die Schnur abwickelst: wie weit ist *in diesem Modell* der Mond von der Erde entfernt?
- Wickle die Schnur ab und überprüfe deine Vermutung.

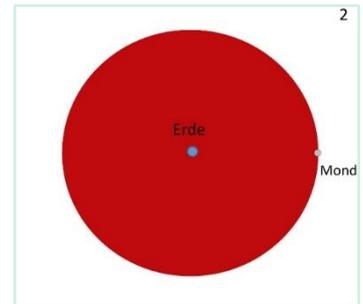
Die Apollo Astronauten haben dreieinhalb Tage und drei Nächte gebraucht, um diese Entfernung von fast 400.000 km zurückzulegen!

2. Mondumlaufbahn und Sonne

Um größere Entfernungen darstellen zu können, verkleinern wir im zweiten Modell den Maßstab so, dass der Abstand Erde–Mond auf 10 cm schrumpft. Im Mittelpunkt der roten Pappscheibe (2) denken wir uns die Erde, der Rand entspricht der Mondumlaufbahn.

- Schätze ab, welche Größe die Sonne in diesem Maßstab hätte und vergleiche dann mit der gelben Pappscheibe (3), welche der Größe der Sonne in diesem Maßstab entspricht!

Die Erde hätte in diesem Modell einen Abstand von 19 Metern zu Sonne!

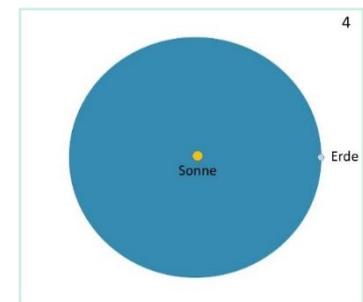


Größenvergleich Mondumlaufbahn
(Credits: Scorza)

3. Die Sonne und die Planeten

Wir schrumpfen den Maßstab weiter und legen diesmal den Abstand zwischen Sonne und Erde auf 10 cm fest. Dieser Abstand wird als Astronomische Einheit (AE) bezeichnet und entspricht ca. 150 Mio. km. Der Radius der blauen Scheibe entspricht einer AE.

- ! Lege die blaue Scheibe auf den Boden und bestimme die Modellabstände für die anderen Planeten (Tabelle). Platziere jeweils die Planetenkugeln und die Lebenszone in der richtigen Entfernung entlang einer Linie auf dem Boden. Hinweis: Die Größen der Planeten bzw. der Sonne sind in diesem Modell nicht mehr maßstabsgetreu!



Größenvergleich Erdumlaufbahn
(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	

Kopiervorlage zu Aktivität 1

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	

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	

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	

Aktivität 2

Cecilia Scorza, Olaf Fischer

Gleichgewichtstemperatur und Albedo der Erdoberfläche

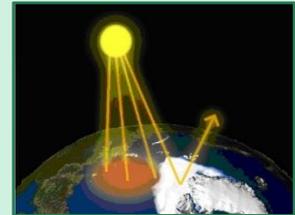
Ziel:

Mit diesem Experiment soll dargestellt werden, welchen Einfluss die Albedo auf die Temperatur auf der Erde hat.

Hintergrund:

Weißer Flächen wie Eis und Schnee reflektieren das einfallende Licht der Sonne viel stärker als z. B. Wasser oder der Erdboden. Ein Maß für dieses Rückstrahlvermögen wird mit der *Albedo* α gegeben. Für Neuschnee gilt z. B. $\alpha = 0,85$, d. h. 85 % des einfallenden Lichtes wird reflektiert.

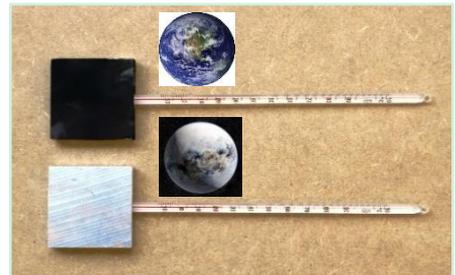
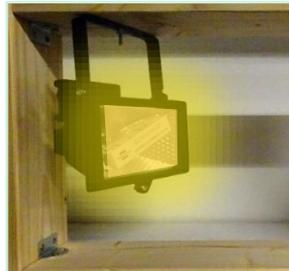
Je höher die Temperatur eines Körpers ist, desto mehr Energie gibt er in Form von Wärmestrahlung an seine Umgebung ab. Wird also einem vorerst kühlen Körper Strahlungsenergie zugeführt und er so erwärmt, strahlt er selbst auch immer mehr Energie ab und erreicht irgendwann eine *Gleichgewichtstemperatur*. Bei dieser nimmt er die gleiche Menge an Energie pro Sekunde auf, wie er selbst abstrahlt – er befindet sich im *Strahlungsgleichgewicht*.



Albedo der Erde (NASA)

Materialien:

- ✓ Strahler
- ✓ 2 Aluminiumblöcke (rußig und weiß bemalt)
- ✓ 2 Thermometer
- ✓ Stoppuhr



(Credits: Scorza, Fischer)

Durchführung:

In die beiden Aluminiumblöcke wird jeweils ein Thermometer gesteckt. Der eine stellt eine Erde ohne Eis- und Schneeflächen, der zweite die fast völlig vereiste „Schneeball-Erde“ dar. Beide Testkörper werden so unter dem Strahler platziert, dass sie mit gleicher Intensität bestrahlt werden.

→ Miss die Temperatur der beiden Blöcke alle 30 Sekunden und notiere die Ergebnisse in einer Tabelle.

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

→ Stelle die Ergebnisse grafisch in einem Diagramm dar.

! Diskutiere dein Messergebnis und erkläre dabei auch, warum die Temperatur der Aluminiumblöcke nicht immer weiter ansteigt. Verwende dabei die Begriffe *Albedo*, *Gleichgewichtstemperatur* und *Strahlungsgleichgewicht*.

Aktivität 3

Erwärmung verschiedener Luftschichten

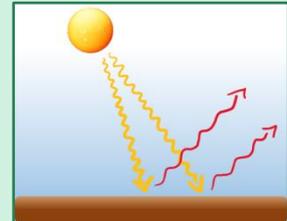
Markus Nielbock

Ziel:

Mit diesem Experiment soll gezeigt werden, dass die direkte Strahlung der Sonne die Luft nur schwach erwärmt; im Gegensatz zur vom Erdboden emittierten Wärmestrahlung.

Hintergrund:

Die relativ kurzwellige Sonnenstrahlung erreicht fast ungehindert den Erdboden, da sie kaum von der Atmosphäre absorbiert werden kann. Im Boden wird sie aufgenommen und trägt so zur Erwärmung der Erdoberfläche bei. Der Erdboden strahlt diese erhaltene Energie in Form von langwelliger Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung IR) zurück in Richtung Weltall. Auf dem Weg wird ein Teil dieser Wärmestrahlung dann von den Treibhausgasen der Atmosphäre absorbiert.



Kurzwellige Sonnenstrahlung und langwellige Wärmestrahlung (Credits: Scorza, Strähle)

Materialien:

- ✓ Strahler
- ✓ Becherglas mit schwarzer Pappe
- ✓ 2 Thermometer
- ✓ Stoppuhr



(Credits: Nielbock)

Durchführung:

- Befestige ein Thermometer knapp über dem Becherboden, das zweite auf halber Höhe.
- Erstelle eine Messtabelle um darin die Zeit, die Temperatur am Boden und die Temperatur auf mittlerer Höhe zu notieren.

Zeit in s	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
Temperatur Boden in °C											
Temperatur Mitte in °C											

- Platziere den Becher möglichst senkrecht unter dem Strahler, starte die Messung und notiere die Messwerte
- ! Fasse deine Beobachtungen kurz zusammen und erkläre diese anschließend.

Aktivität 4

Moritz Strähle

Die Absorption von Wärmestrahlung durch CO_2

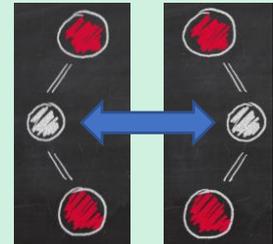
Ziel:

Mit diesem Experiment wird gezeigt, dass CO_2 ein Treibhausgas ist, das Wärmestrahlung absorbiert.

Hintergrund:

Treibhausgase besitzen eine besondere Eigenschaft: sie können Wärmestrahlung aufnehmen („absorbieren“) und werden hierdurch in Schwingungen versetzt. Die aufgenommene Strahlungsenergie wird dabei in Schwingungsenergie und schließlich in Form von Bewegungsenergie auf Teilchen in der Umgebung übertragen – das Gas erwärmt sich.

Jeder Körper, z. B. ein heißes Bügeleisen, aber auch die Erdoberfläche, strahlt Energie in Form von Wärmestrahlung ab. Hierbei gilt: Je wärmer der Körper ist, umso größer ist diese Strahlungsenergie. Der Energiefluss kann mit einem Infrarot-Thermometer gemessen werden (je höher er ist, desto größer ist die angezeigte Temperatur). Wird ein Teil der Energie auf dem Weg zum Thermometer abgefangen (wie z.B. durch Treibhausgase in der Atmosphäre), zeigt das Thermometer eine entsprechend niedrigere Temperatur an.



Biegeschwingung eines CO_2 -Moleküls (Credits: B. Mayer)

Materialien:

- ✓ Chipsdose mit zwei Löchern auf einer Seite, Frischhaltefolie und Haushaltsgummi
- ✓ Wärmestrahler (z. B. Wärmelampe oder Heizplatte)
- ✓ Zitronensäure (Pulver), Natron (Pulver) und Wasser
- ✓ Kolben mit Gummistopfen und Schlauch
- ✓ Infrarot-Thermometer



Absorption von Wärmestrahlung durch CO_2 (Credits: Strähle)

Durchführung:

- Dichte die Chipsdose an beiden Enden mit Frischhaltefolie ab und führe den Schlauch aus dem Kolben in das größere Loch der Dose. Die Löcher müssen nach oben zeigen. Mische im Kolben je 3 Esslöffel Zitronensäure und Natron (noch ohne Wasser).
- ! Miss durch die luftgefüllte Dose hindurch die Temperatur des Wärmestrahlers. Notiere den Messwert.
- Gib nun nach und nach vorsichtig etwas Wasser zur Säure-Natron-Mischung und schließe den Kolben sofort wieder. Die Chipsdose füllt sich nun mit dem entstehenden CO_2 , die verdrängte Luft kann durch das kleine Loch entweichen.
- ! Miss erneut die Temperatur durch die Dose hindurch und notiere den Messwert.

Auswertung:

- ! Der Versuch stellt ein Modell dar, mit dem bestimmte Vorgänge in der Natur dargestellt werden können. Gib an, welche Teile des Aufbaus welchen Objekten in der Realität entsprechen.
- ! Diskutiere deine Messergebnisse im Hinblick auf den erhöhten, von den Menschen verursachten, Ausstoß an CO_2 .

Aktivität 5

Der anthropogene Treibhauseffekt

Moritz Strähle

Ziel:

Mit diesem Experiment wird gezeigt, dass die Temperatur eines Körpers im Strahlungsgleichgewicht steigt, wenn die CO_2 -Konzentration in seiner Atmosphäre erhöht wird.

Hintergrund:

Zum Verständnis dieses Experiments sind zwei physikalische Prozesse wichtig:

1. Wird einem Körper (z. B. durch Sonneneinstrahlung) Energie zugeführt, erhöht sich seine thermische Energie und damit seine Temperatur. Ein anfangs kühle Bank in einem Park wird daher in der Sonne schnell wärmer.
2. Jeder Körper, z. B. ein heißes Bügeleisen, aber auch die Erdoberfläche, strahlt Energie in Form von Wärmestrahlung ab. Hierbei gilt: Je wärmer der Körper ist, desto mehr Energie strahlt er pro Sekunde ab. Da er dadurch Energie an die Umgebung abgibt, sinkt seine Temperatur.

Wird nun beispielsweise die Parkbank von der Sonne bestrahlt, erwärmt sie sich. Umso mehr sie sich erwärmt, desto mehr Energie strahlt sie aber auch wieder an die Umgebung ab. Am Punkt, an dem die eingestrahlte Energie und die abgestrahlte Energie gleich groß sind, erwärmt sich die Bank nicht weiter – sie hat ihre *Gleichgewichtstemperatur* erreicht und befindet sich im *Strahlungsgleichgewicht*.

Würde man nun allerdings die Parkbank zusätzlich mit einem Scheinwerfer bestrahlen, würde sie sich solange wieder weiter erwärmen, bis sich erneut eingestrahlte und abgestrahlte Energie die Waage halten.

Materialien:

- ✓ Strahler
- ✓ Plastikwanne
- ✓ schwarze Pappe
- ✓ Frischhaltefolie
- ✓ Zitronensäure (Pulver), Natron (Pulver) und Wasser
- ✓ Kolben mit Gummistopfen und Schlauch
- ✓ Thermometer (am besten digital)



Modellversuch zum Treibhauseffekt
(Credits: Strähle)

Durchführung:

- Vorbereitung: Die schwarze Pappe liegt in der Plastikwanne. Diese ist mit Frischhaltefolie so gespannt, dass der Inhalt vor Windzug geschützt ist, sie jedoch nicht ganz luftdicht abgeschlossen ist. Das Thermometer ist so angebracht, dass man damit die Temperatur ca. 1 cm über dem Boden messen kann. Der Strahler bestrahlt die Wanne senkrecht von oben.
- Mische im Kolben je 5 Esslöffel Zitronensäure und Natron (noch ohne Wasser) und führe den Schlauch in die Wanne ein.
- Miss über einen Zeitraum von ein paar Minuten mehrmals die Temperatur und überprüfe damit, ob sich bereits eine Gleichgewichtstemperatur eingestellt hat.
- ! Erkläre kurz in eigenen Worten, warum die Temperatur, trotz ständiger Energiezufuhr durch den Strahler, relativ konstant bleibt.

- Gib nun nach und nach vorsichtig etwas Wasser zur Säure-Natron-Mischung und schließe den Kolben jeweils sofort wieder mit dem Gummistopfen. Das relativ schwere entstehende CO_2 wird über den Schlauch in die Wanne geleitet und sinkt dort zu Boden.
- ! Entferne anschließend den Schlauch aus der Wanne und miss nach einigen Minuten erneut die Temperatur. Notiere kurz deine Beobachtungen.
- ! Bringe zur Erklärung der Beobachtungen die ausgeschnittenen Sätze in die richtige Reihenfolge und klebe sie dann auf.

Material zu Aktivität 5

1. Satzbausteine

Diese sendet, umso wärmer sie wird, immer mehr Wärmestrahlung aus.

Die Temperatur in Bodennähe nimmt zu.

Wird dann die CO₂-Konzentration im Becherglas erhöht, kann die Wärmestrahlung das Glas nicht mehr ungehindert verlassen, wird teilweise absorbiert und dabei in thermische Energie umgewandelt.

Bei einer bestimmten Temperatur (Gleichgewichtstemperatur) wird ein Strahlungsgleichgewicht erreicht: Die Pappscheibe nimmt ebenso viel Energie auf, wie sie abstrahlt.

Um wieder ein Strahlungsgleichgewicht zu erreichen, muss die Pappscheibe nun auch mehr Energie abstrahlen, was nur bei einer höheren Gleichgewichtstemperatur möglich ist.

Die Pappscheibe wird nun doppelt bestrahlt – vom Strahler und vom erwärmten CO₂.

Durch die Bestrahlung mit dem Strahler, erwärmt sich die Pappscheibe.

Da die Gasmischung in der Wanne erwärmt wird, strahlt sie nun selbst Wärmestrahlung, auch in Richtung Boden, ab.

2. Lösung

Durch die Bestrahlung mit dem Strahler, erwärmt sich die Pappscheibe.

Diese sendet, umso wärmer sie wird, immer mehr Wärmestrahlung aus.

Bei einer bestimmten Temperatur (Gleichgewichtstemperatur) wird ein Strahlungsgleichgewicht erreicht: Die Pappscheibe nimmt ebenso viel Energie auf, wie sie abstrahlt.

Wird dann die CO₂-Konzentration im Becherglas erhöht, kann die Wärmestrahlung das Glas nicht mehr ungehindert verlassen, wird teilweise absorbiert und dabei in thermische Energie umgewandelt.

Da die Gasmischung in der Wanne erwärmt wird, strahlt sie nun selbst Wärmestrahlung, auch in Richtung Boden, ab.

Die Pappscheibe wird nun doppelt bestrahlt – vom Strahler und vom erwärmten CO₂.

Um wieder ein Strahlungsgleichgewicht zu erreichen, muss die Pappscheibe nun auch mehr Energie abstrahlen, was nur bei einer höheren Gleichgewichtstemperatur möglich ist.

Die Temperatur in Bodennähe nimmt zu.

Kommentar zu Aktivität 5

Bei diesem Experiment dauert es eine Zeit, bis sich die gemessene Temperatur nicht mehr merklich ändert und sich eine Gleichgewichtstemperatur einstellt (ca. 20 Minuten). Es ist daher empfehlenswert, das Experiment entsprechend vorzubereiten und den Strahler vor Stundenbeginn einzuschalten. Alternativ kann aber auch dokumentiert werden, wie die Temperatur nach Einschalten des Strahlers steigt und sich allmählich eine Gleichgewichtstemperatur einstellt. Die erwartbare Temperaturdifferenz nach Zugabe von CO₂ liegt im Bereich von 2 bis 5 °C (siehe Abbildung 49).

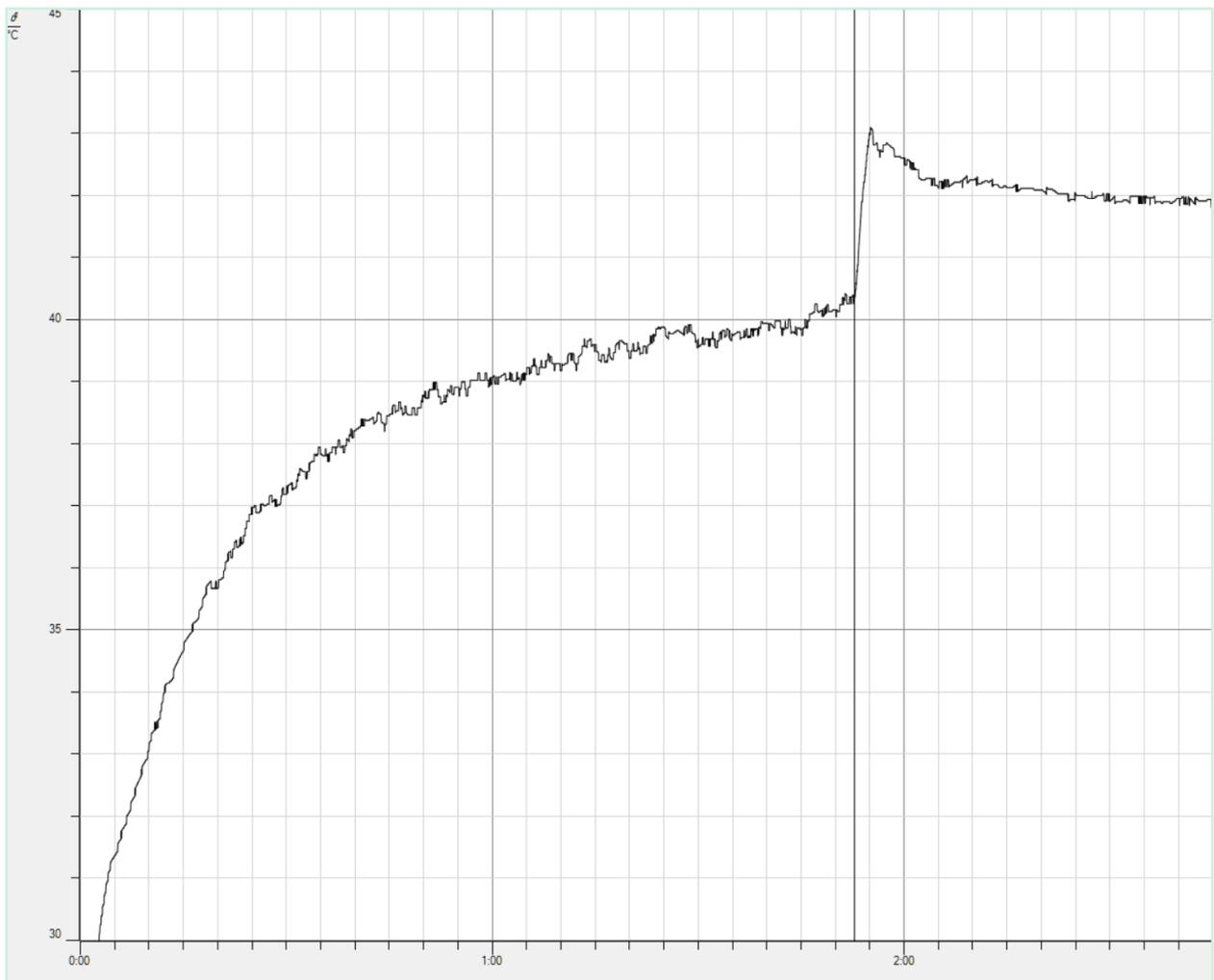


Abbildung 49 – Mit dem Messsystem CASSY aufgezeichnetes t - θ -Diagramm zum Experiment zum anthropogenen Treibhauseffekt (Credits: Strähle)

Das Spektrum des verwendeten Strahlers ist im Vergleich zum Sonnenspektrum ins Infrarote verschoben. Daher kann man, um den Anteil der vom Strahler kommenden Infrarot-Strahlung zu senken, einem Wasserfilter (wassergefüllte Glasschale) zwischen Strahler und Plastikwanne einbauen. Da die Argumentation über Strahlungsgleichgewicht und Gleichgewichtstemperatur aber auch trägt, wenn die Atmosphäre nicht nur vom Boden, sondern auch direkt von der Energiequelle erwärmt werden, wurde in dieser Version des Versuchs der Einfachheit halber darauf verzichtet.

Aktivität 6

Cecilia Scorza, Moritz Strähle

Wo die Wärme hingehet: Die Ozeane als Klimapuffer

Ziel:

Mit diesem Experiment wird gezeigt, dass einem bestimmten Wasservolumen, im Vergleich zum gleichen Volumen an Luft, sehr viel mehr Energie zugeführt werden muss, um seine Temperatur um einen bestimmten Wert zu erhöhen.

Hintergrund:

Wasser ist ein sehr effektiver Wärmespeicher: Eine bestimmte Wassermasse kann pro Kelvin Temperaturerhöhung deutlich mehr Energie aufnehmen als z. B. die gleiche Masse an Luft.

So erwärmt sich ein Kilogramm Wasser bei einer Energiezufuhr von $4,182 \text{ kJ}$ um 1 K . Wasser hat demnach eine *Wärmekapazität* von $4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$. Luft und trockene Erde hingegen haben eine Wärmekapazität von ca. $1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$. Es genügt also rund ein Kilojoule, um ein Kilogramm dieser Stoffe um 1 K zu erwärmen.

Durch den vom Menschen verursachten Treibhauseffekt wird der Erdoberfläche zusätzliche Energie zugeführt. Glücklicherweise sind etwa $2/3$ der Erdoberfläche mit Wasser bedeckt. Dieses Wasser kann, aufgrund der großen Wärmekapazität, sehr viel dieser Energie aufnehmen, ohne deutlich an Temperatur zuzunehmen. Die globale Erwärmung wird somit stark abgepuffert!



Unsere blaue Erde (NASA)

Materialien:

- ✓ Luftballon (gefüllt mit Luft)
- ✓ Luftballon (gefüllt mit Wasser)
- ✓ Kerze und Streichholz

Durchführung:

- Entzünde die Kerze. Bringe den luftgefüllten Ballon dicht über die Kerze und halte dir die Ohren zu :)
- Halte nun den mit Wasser gefüllten Ballon dicht über die Kerze und warte wieder einige Zeit ab.



Wassergefüllter Luftballon über einer Kerze
(Credits: Scorza)

Auswertung:

- ! Stelle kurz dar, warum der luftgefüllte Ballon platzt.
- ! Erkläre das Ergebnis des zweiten Teilversuches und warum sich die Temperatur des Luftballons kaum verändert.
- ! Durch den vom Menschen verursachten Treibhauseffekt wird der Atmosphäre zusätzliche Energie zugeführt. Erläutere, warum die Auswirkungen ohne unsere Ozeane noch viel deutlicher wären, als sie es heute bereits sind.

Aktivität 7

Cecilia Scorza, Marco Türk

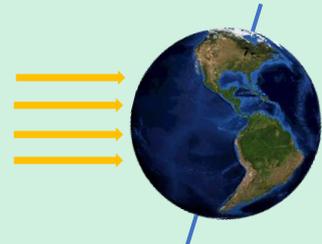
Die Sonnenstrahlung und die Klimazone der Erde

Ziel:

Mit diesem Experiment wird gezeigt, dass der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung die Klimazonen bestimmt.

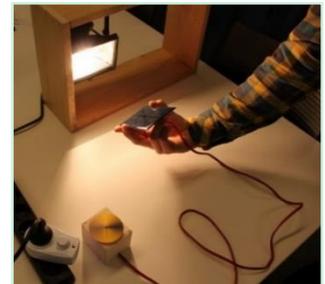
Hintergrund:

Die Sonne ist der Grund für die verschiedenen Klimazonen auf der Erde. Mit zunehmender geografischer Breite ist die Erdoberfläche stärker gegenüber der Sonnenstrahlen geneigt. Die Intensität wird dort auf eine größere Fläche am Erdboden verteilt. Auch die Jahreszeiten sind Folge der Neigung von $23,5^\circ$ der Erdachse relativ zur Bahnebene der Erde um die Sonne, der sogenannten Ekliptik.



Materialien:

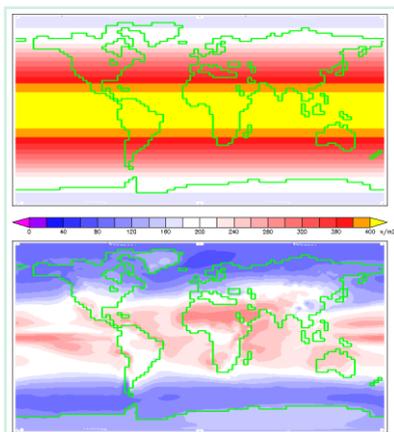
- ✓ Strahler
- ✓ Solarzelle mit Lüfter
- ✓ Erdglobus



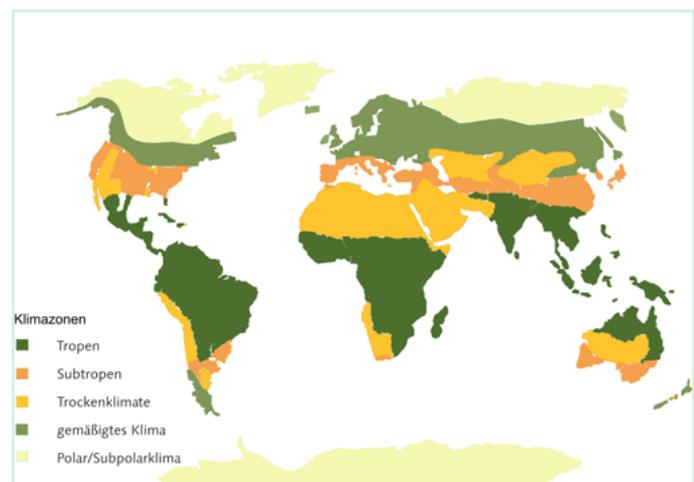
(Credits: Marco Türk)

Durchführung:

- Nimm die Solarzelle mit angeschlossenen Lüfter. Die Drehgeschwindigkeit zeigt an, wie hoch die einfallende Lichtintensität des Strahlers ist. Der Strahler repräsentiert die Sonne.
- Schalte den Strahler ein und halte die lichtempfindliche Fläche der Solarzelle etwa 5 cm entfernt in ihre Richtung. Der Motor sollte sich drehen. Verändere nun den Neigungswinkel der Solarzelle der Krümmung eines Erdglobus folgend und beobachte dabei die Drehung des Motors.
- ! Notiere deine Beobachtung und erkläre, wie dieses Experiment mit den Jahreszeiten und mit den Klimazonen der Erde zusammenhängt.



Jährlicher Mittelwert der Sonneneinstrahlung außerhalb der Erdatmosphäre (oben) und am Erdboden (unten) in W/m^2 (Credits: William M. Conolley)



Klimazonen der Erde (Quelle: ecobine.de)

Aktivität 8

Anstieg des Meeresspiegels

Markus Nielbock, Moritz Strähle

Ziel:

Es sind vor allem zwei Prozesse, die zum Anstieg des Meeresspiegels führen. Diese sollen mit den folgenden Experimenten nachvollzogen werden.

Hintergrund:

Temperatur im Teilchenmodell: Die Temperatur eines Körpers ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie seiner Teilchen.

Dichteanomalie des Wassers: Wasser hat bei 4 °C seine größte Dichte. Gefriert flüssiges Wasser, nimmt es deutlich an Volumen zu, die Dichte sinkt.

Archimedisches Prinzip: Die Auftriebskraft auf einen schwimmenden Körper ist genau so groß, wie die Gewichtskraft der vom Körper verdrängten Flüssigkeit.

Kräftegleichgewicht: Ein Körper an dem zwei Kräfte angreifen befindet sich im Kräftegleichgewicht, wenn die an ihm angreifenden Kräfte betraglich gleich groß sind und in entgegengesetzte Richtungen zeigen.

Materialien:

- ✓ kleiner Rundkolben
- ✓ Gummistopfen mit Loch
- ✓ Glasrohr
- ✓ wasserlöslicher Filzstift
- ✓ Becherglas
- ✓ Eiswürfel



(Credits: Strähle)



Durchführung:

Experiment 1:

- Fülle das Becherglas mit kaltem Wasser und gib einen Eiswürfel hinein. Markiere den Wasserstand mit dem wasserlöslichen Filzstift.

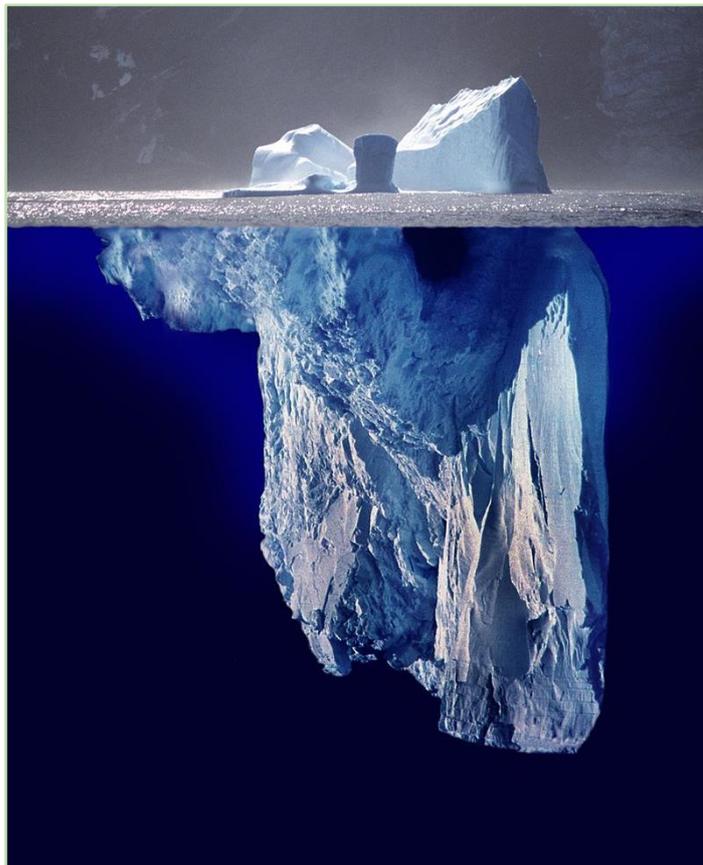
Experiment 2:

- Fülle den Kolben mit Wasser und verschließe ihn mit dem Gummistopfen und Glasrohr, sodass das Wasser im Rohr etwa bis zur Hälfte steht und sich keine Luftblasen bilden (evtl. einige Versuche nötig).
- Markiere den Wasserpegel mit einem Stift und erwärme das Wasser im Kolben mit deinen Händen.
 - ! Notiere deine Beobachtungen und schreibe anschließend eine kurze Erklärung dieses Phänomens mit Hilfe des Teilchenmodells auf.
 - ! Werte nun auch Experiment 1 aus, wenn der Eiswürfel schon zu einem großen Teil geschmolzen ist. Notiere hierzu kurz deine Beobachtung und beschreibe dann, in welchem der beiden Bilder das Schmelzen von Eis nicht zu einem Anstieg des Meeresspiegels führt.
 - *Zusatz: Erkläre deine Beobachtung aus Experiment 1 mit den Hinweisen zum Archimedisches Prinzip und zum Kräftegleichgewicht.

Bilder zu Aktivität 8



Großer Aletgletscher (Credits: Dirk Beyer)



Fotomontage eines Eisbergs (Credits: Uwe Kils)

Aktivität 9

Versauerung der Ozeane

Markus Nielbock, Moritz Strähle

Ziel:

Im folgenden Experiment wird gezeigt, dass die Lösung von CO_2 in Wasser den pH-Wert ändert.

Hintergrund:

Steigt in der Erdatmosphäre der Gehalt an gasförmigem CO_2 , beispielsweise durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe, wird dieses auch vermehrt im Meerwasser gebunden. Dieser Effekt kann mit dem menschlichen Atem nachgestellt werden: Luft enthält, bevor wir sie eingatmet haben, zu ca. 21 % Sauerstoff und 0,04 % Kohlendioxid. Während der Atmung wird Sauerstoff vom Blut aufgenommen und Kohlendioxid ausgeschieden. Die Ausatemluft enthält daher zu ca. 17 % Sauerstoff und zu 4 % Kohlendioxid.

Materialien:

- ✓ destilliertes oder entmineralisiertes Wasser
- ✓ hitzebeständiges Becherglas
- ✓ Universalindikator mit pH-Wert-Tafel
- ✓ Zitronensäure (Pulver), Natron (Pulver) und Wasser
- ✓ Kolben mit Gummistopfen und Schlauch



(Credits: Strähle)

Durchführung:

- Gib etwas Wasser in das Glas und anschließend einige Tropfen des Indikators, bis die Lösung grün erscheint.
- ! Vergleiche die Farbe des Wassers mit der pH-Tabelle des Indikators und bestimme den pH-Wert.
- Mische je einen Esslöffel Zitronensäure und Natron, gib vorsichtig etwas Wasser hinzu und leite das entstehende CO_2 mit dem Schlauch in das Wasser.
- ! Vergleiche wieder mit der pH-Tabelle des Indikators und beschreibe das Versuchsergebnis in einem Satz.
- ! Lese den Hintergrundartikel und beantworte die folgenden Fragestellungen in einem zusammenhängenden Text.
 - Inwiefern mildern die Ozeane den vom Menschen verursachten Klimawandel ab?
 - Welche Folgen hat dies für die Ozeane und Meerestiere?

Meer zu sauer für Miesmuscheln

| 29. November 2017

Quelle Text und Abbildungen: www.solarify.eu/2017/11/29/260-meer-zu-sauer-fuer-miesmuscheln (aufgerufen am 17.10.2018)

„Gigantisches Chemie-Experiment in den Weltmeeren“

„Gruselig“ nennt FAZ-Autor Ulf von Rauchhaupt, was die moderne Zivilisation mit ihren CO₂-Emissionen „auch veranstaltet“: „Ein gigantisches Chemie-Experiment in den Weltmeeren“. Langsam werde klar, was dabei herauskommt. Der Autor beschreibt einen nach acht Jahren intensiver wissenschaftlicher Tätigkeit eben zu Ende gegangenen deutschen Forschungsverbund zur Ozeanversauerung namens BIOACID (Biological Impacts of Ocean Acidification). Der untersuchte von 2009 bis 2017, wie marine Lebensgemeinschaften auf Ozeanversauerung reagieren und welche Konsequenzen dies für das Nahrungsnetz und die Stoff- und Energieumsätze im Meer sowie schließlich auch für die Wirtschaft und Gesellschaft hat.



Das Übermaß an Kohlendioxid, das die Menschen in die Atmosphäre pumpen, gelange zu einem Teil in die Meere und reagiere dort zu Kohlensäure. Trotz der immer intensiveren Klimadebatte war „das andere CO₂-Problem“ lange unerforscht geblieben. „Selbst die Berichte des Weltklimarats IPCC erwähnen das Thema erst seit 2007.“



Heute sei „die Ozeanversauerung das am stärksten wachsende geowissenschaftliche Forschungsfeld“, so von Rauchhaupt. Die Versauerung der Weltmeere sei nämlich die Kehrseite eines Effektes, ohne den die globale Erwärmung bereits noch gravierender wäre. Denn die Ozeane seien riesige C-Speicher

und enthielten 50-mal mehr Kohlenstoff als die Atmosphäre, wo die CO₂-Konzentrationen mittlerweile auf 400 ppm²⁴ geklettert seien: Von einer Million Luftmoleküle sind mittlerweile 400 Kohlendioxid. Vor Anbruch der Industrialisierung waren es 280, und ohne die Meere wären es heute bereits 455 ppm.

Für den Prozess der Ozeanversauerung sind zwei chemische Reaktionen besonders wichtig: Löst sich Kohlendioxid im Meerwasser, wird Kohlensäure gebildet. Wasserstoff-Ionen und Hydrogencarbonat werden freigesetzt. Ein Teil der Wasserstoff-Ionen reagiert mit Carbonat, und Hydrogencarbonat entsteht. Kalkbildende Organismen wie Muscheln, Korallen oder bestimmte Plankton-Arten scheiden Carbonat ab, um ihre Schalen und Skelette aufzubauen. Je mehr Carbonat durch die chemischen Reaktionen im Meerwasser verloren geht, desto aufwändiger wird die Kalkbildung – Grafik © Christoph Kersten / Rita Erven, GEOMAR

Immerhin hätten die Ozeane bisher 30 Prozent des anthropogenen CO₂ geschluckt; allerdings schreibt von Rauchhaupt, werde das Seewasser dadurch nicht in gleichem Maße in sauren Sprudel verwandelt: „Mit einem ursprünglichen pH von 8,2 sind die Ozeane von Natur aus leicht alkalisch. Das verdanken sie vor allem im Seewasser gelösten Salzen der Kohlensäure, den Carbonaten. Sie stammen überwiegend aus der Verwitterung von Gesteinen an Land und werden zusammen mit Ionen des Calciums beständig in die Meere gespült. CO₂ dagegen bildet in Wasser Kohlensäure, die sogleich Protonen abspaltet. Diese machten die See sofort sauer, würden sie nicht von den Carbonat-Ionen größtenteils abgefangen. Ozeanwasser ist, wie Chemiker das nennen, eine Pufferlösung.“ Ozeanversauerung bedeute nicht, dass sich das Meerwasser in eine Säure verwandle, sondern dass es zu wenig alkalisch werde, um noch gesund für die Meeresbewohner zu sein.



²⁴ Anmerkung: ppm steht für „parts per million“, also die Anzahl an CO₂-Molekülen pro eine Million Teilchen trockener Luft.

Aktivität 10

Freisetzung von CO₂

Markus Nielbock

Ziel:

In diesem Experiment soll der Einfluss der Temperatur auf den pH-Wert einer sauren Lösung gezeigt werden.

Materialien:

- ✓ saure Lösung aus Aktivität 9 in hitzebeständigem Becherglas
- ✓ Universalindikator mit pH-Wert-Tafel
- ✓ Heizplatte



Erwärmung einer sauren Kohlendioxidlösung (Credits: Nielbock)

Durchführung:

- ! Bestimme den pH-Wert der Lösung.
- Stelle das Glas mit der Lösung auf die Heizplatte und erhitze die Lösung, ohne dass sie zu sieden beginnt.
- ! Beobachte die Farbänderung und ermittle den pH-Wert.
- ! Fasse das Ergebnis kurz zusammen.
- ! Erkläre, was mit der folgenden Aussage gemeint ist:
„Die Aufheizung der Ozeane durch die Erderhitzung zieht eine weitere Erhitzung der Atmosphäre nach sich.“

Aktivität 11

Cecilia Scorza

Anzeichen des Klimawandels in Bayern auf der Spur

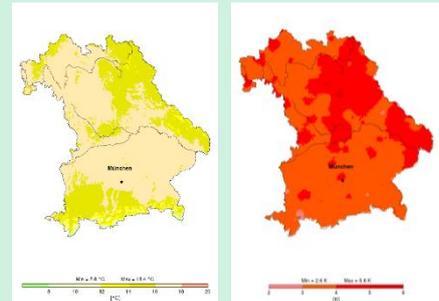
Ziel:

Anhand interaktiver Karten des Deutschen Wetterdienstes können deutliche Anzeichen des Klimawandels in Deutschland festgestellt werden, indem Abweichungen der Temperatur- und Niederschlagswerte der letzten Jahre vom Mittelwert der Jahre 1961-1990 identifiziert und graphisch dargestellt werden.

Hintergrund:

Als *Klima* bezeichnet man das langjährige, gemittelte Wettergeschehen an einem Ort, üblicherweise über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren. Vorhersagen von Klimamodellen zufolge gibt es aber durchaus eine direkte Verbindung von Klima und Wetter. So erhöht eine langfristige Zunahme der Temperatur durch den Klimawandel die Wahrscheinlichkeit von Extremwetterereignissen, wie stark vom Mittel abweichende Temperaturen und Niederschläge.

Diese Auswirkungen des Klimawandels sind in Deutschland regional sehr unterschiedlich. In manchen Teilen steigt beispielsweise im Frühling die Hochwassergefahr, im Sommer drohen Dürren und Hitzewellen. In Niederbayern wurde so im Sommer 2018 das Grundwasser knapp, so dass Wasser aus Oberbayern hingepumpt werden musste.



(Quelle: www.dwd.de/DE/klimaumwelt/)

Materialien:

- ✓ Computer mit Internetzugang
- ✓ Arbeitsblatt

Durchführung:

- Rufe den Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes auf:
https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html
- Wähle Bayern als Bundesland und die Lufttemperatur im August als Vergleichsgröße aus. Lade dann nacheinander die Karten der letzten sieben Jahre (Karte rechts). Vergleiche diese jeweils mit der Karte der Mittelwerte (Karte links) und notiere in die Tabelle jeweils die Abweichung der Lufttemperatur vom langjährigen Mittel für deinen Heimatort.
- Stelle die gesammelten Temperaturabweichungen graphisch dar. Wähle das Jahr auf der x-Achse und die Temperaturabweichung auf der y-Achse.
- Verfahre nun ebenso mit den Niederschlagswerten im November.
- Fasse deine Ergebnisse nun zusammen und werte sie aus. Beziehe in die Auswertung auch die angegebene Grafik ein

Arbeitsblatt zu Aktivität 11

1. Messdaten am Ort _____

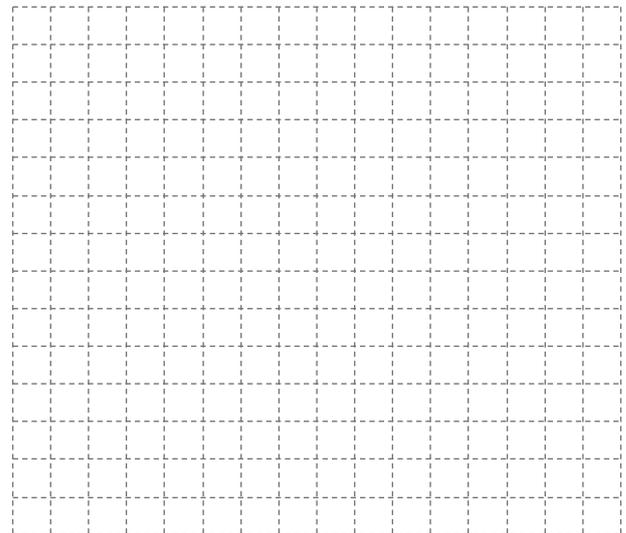
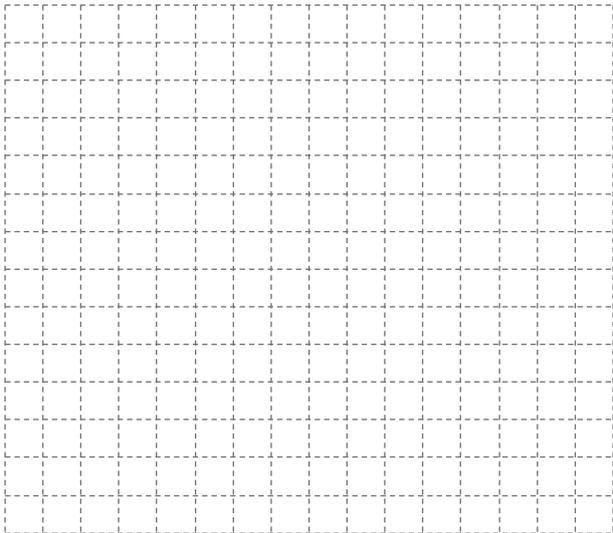
Temperatur im August

Abweichung in °C	Jahr
	2012
	2013
	2014
	2015
	2016
	2017
	2018

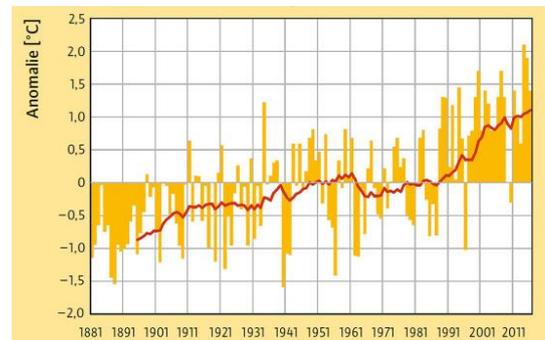
Niederschlag im November

Abweichung in %	Jahr
	2012
	2013
	2014
	2015
	2016
	2017
	2018

2. Grafische Darstellung



3. Zusammenfassung und Auswertung der Ergebnisse



Mittelwert der Temperaturabweichungen in Bayern
(Quelle: Deutscher Wetterdienst)

Aktivität 12

Cecilia Scorza

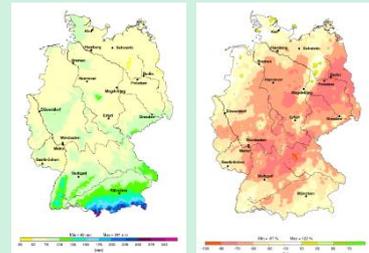
Anzeichen des Klimawandels in Deutschland auf der Spur

Ziel:

Anhand interaktiver Karten des Deutschen Wetterdienstes können deutliche Anzeichen des Klimawandels in Deutschland festgestellt werden, indem Abweichungen der Temperatur- und Niederschlagswerte der letzten Jahre vom Mittelwert der Jahre 1961-1990 identifiziert und graphisch dargestellt werden.

Hintergrund:

Als *Klima* bezeichnet man das langjährige, gemittelte Wettergeschehen an einem Ort, üblicherweise über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren. Vorhersagen von Klimamodellen zufolge gibt es aber durchaus eine direkte Verbindung von Klima und Wetter. So erhöht eine langfristige Zunahme der Temperatur durch den Klimawandel die Wahrscheinlichkeit von Extremwetterereignissen, wie stark vom Mittel abweichende Temperaturen und Niederschläge.



(Quelle: www.dwd.de/DE/klimaumwelt/)

Diese Auswirkungen des Klimawandels sind in Deutschland regional sehr unterschiedlich. In manchen Teilen steigt beispielsweise im Frühling die Hochwassergefahr, im Sommer drohen Dürren und Hitzewellen. So führte der Rhein im Sommer 2018 ein historisches Tiefwasser und heizte sich stellenweise auf bis zu 28 °C auf – in der Folge mussten tonnenweise an Sauerstoffmangel verendete Fische geborgen werden.

Materialien:

- ✓ Computer mit Internetzugang
- ✓ Arbeitsblatt

Durchführung:

- Rufe den Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes auf:
https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html
- Wähle die Lufttemperatur im August als Vergleichsgröße aus. Lade dann nacheinander die Karten der letzten sieben Jahre (Karte rechts). Vergleiche diese jeweils mit der Karte der Mittelwerte (Karte links) und notiere in die Tabelle jeweils die Abweichung der Lufttemperatur vom langjährigen Mittel für deinen Heimatort.
- Stelle die gesammelten Temperaturabweichungen graphisch dar. Wähle das Jahr auf der x-Achse und die Temperaturabweichung auf der y-Achse.
- Verfahre nun ebenso mit den Niederschlagswerten im November.
- Fasse deine Ergebnisse nun zusammen und werte sie aus. Beziehe in die Auswertung auch die angegebene Grafik ein

Arbeitsblatt zu Aktivität 12

1. Messdaten am Ort _____

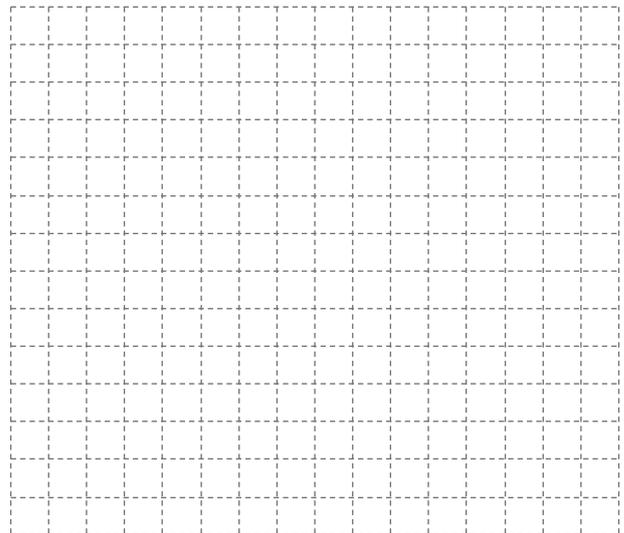
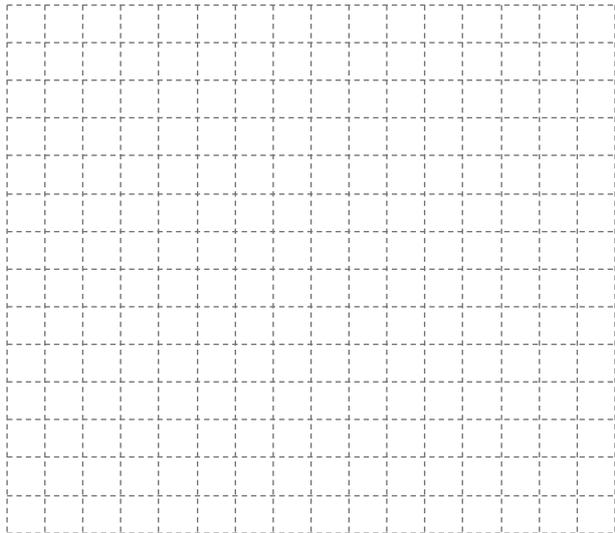
Temperatur im August

Abweichung in °C	Jahr
	2012
	2013
	2014
	2015
	2016
	2017
	2018

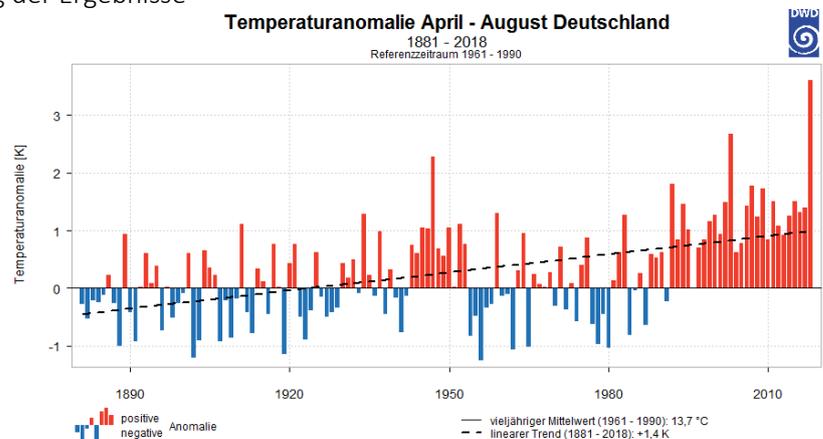
Niederschlag im November

Abweichung in %	Jahr
	2012
	2013
	2014
	2015
	2016
	2017
	2018

2. Grafische Darstellung



3. Zusammenfassung und Auswertung der Ergebnisse



(Quelle: Deutscher Wetterdienst: 2018 wärmster Sommer im Norden und Osten Deutschlands. Hintergrundbericht des Deutschen Wetterdiensts vom 6. September 2018. Abgerufen am 02.02.2019).

Literatur

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.

Buchal, C. und Schönwiese, C.D. (2010): Klima – Die Erde und ihre Atmosphäre im Wandel der Zeiten, Jülich/Frankfurt, Heraeus-Stiftung, Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren.

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, Komplet-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.

Umweltministerium/Bayern/1: www.stmuv.bayern.de/themen/klimaschutz/index.htm.

Umweltministerium/Bayern/2: www.stmuv.bayern.de/themen/wasserwirtschaft/niedrigwasser/index.htm.

WBGU (2007): Welt im Wandel – Sicherheitsrisiko Klimawandel. Hauptgutachten. Berlin. http://www.wbgu.de/wbgu_jg2007.html.