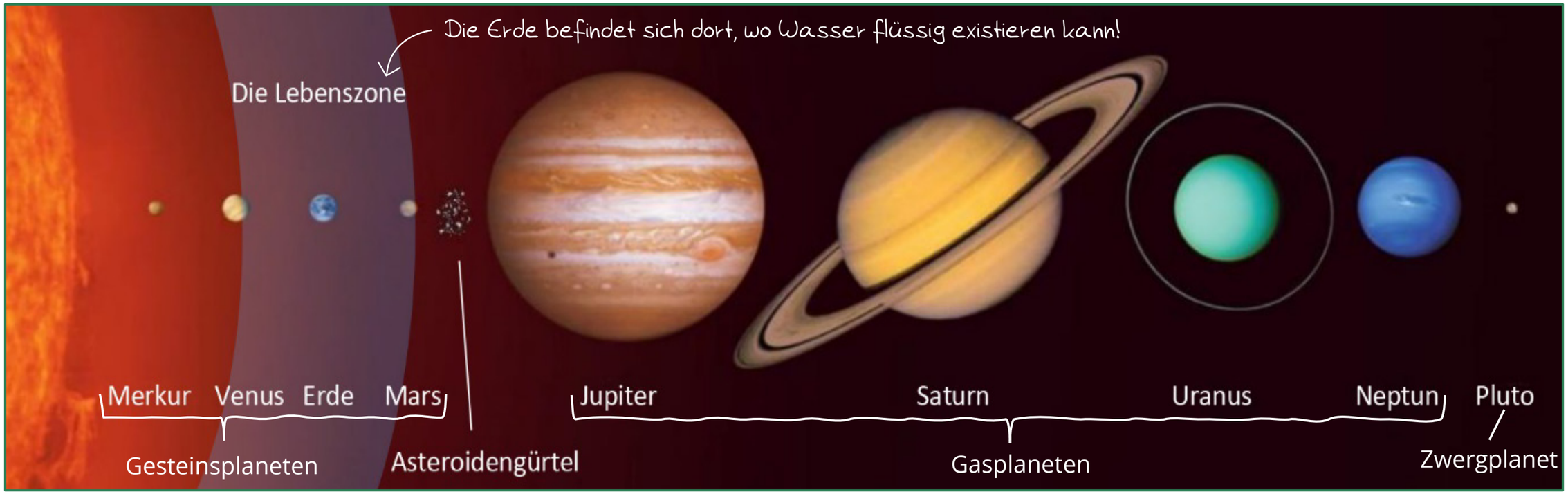
1. Die Erde im Sonnensystem

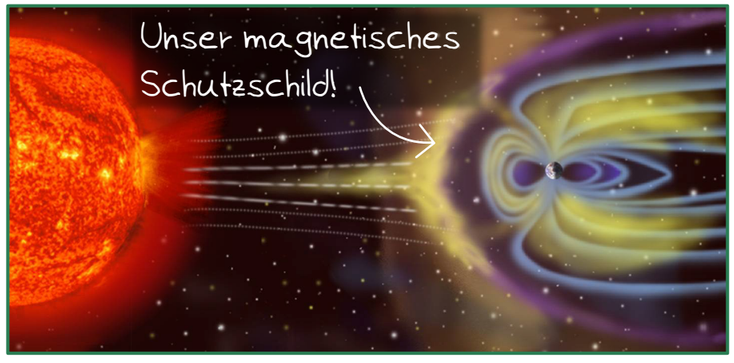
Was macht unsere Erde zu einem bewohnbaren Planeten?



Um alle Sterne und damit auch um unsere Sonne existiert eine sogenannte Lebenszone - ein Bereich, in dem Wasser flüssig existieren kann.
Die Erde und der Mars befinden sich in dieser Lebenszone, jedoch ist nur die Erde bewohnbar. Warum?

Abbildungsquellen: Sonne mit Planeten: NASA verändert von Scorza; Wasser auf der Erde: Perlman&Cook; Magnetisches Schutzschild: NASA; Erde und Mond: NASA

Wie alle Gesteinsplaneten entstand die Erde zunächst ohne Wasser, welches sich erst nach und nach durch Asteroideneinschläge anlagerte!
Unter den Gesteinsplaneten war nur die Erde schwer genug und weit genug von der Sonne entfernt, um das Wasser auch zu halten.



Aufgrund ihres flüssigen Kerns besitzt die Erde ein Magnetfeld, das sie vor dem Sonnenwind, also vor energiereichen geladenen Teilchen, schützt. Diese werden vom Magnetfeld zu den Polen abgelenkt und treten dort in die Erdatmosphäre ein (Polarlichter).

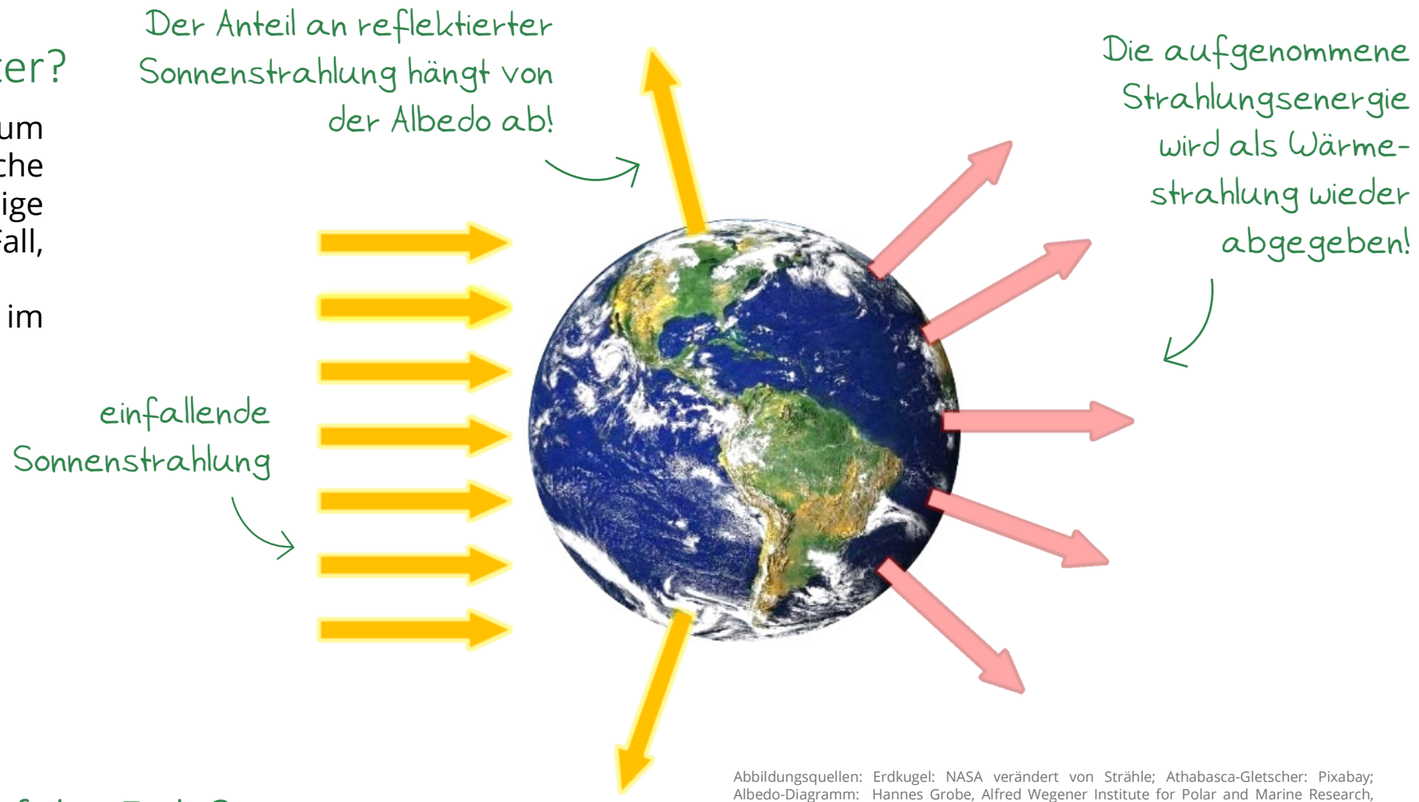
Die Erde besitzt einen Mond, der ihre Rotationsachse stabilisiert und die Rotation im Laufe der Erdgeschichte verlangsamt hat. Wir haben daher relativ milde Sommer und Winter sowie relativ geringe atmosphärische Windgeschwindigkeiten auf unserem Planeten.

2. Die Erde, ein Planet wird bestrahlt

Warum erwärmt sich die Erde nicht immer weiter?

Die einfallende Sonnenstrahlung wird zum Teil reflektiert und zum Teil absorbiert (also aufgenommen). Die von der Erdoberfläche absorbierte Sonnenstrahlung wird vollständig als langwellige Wärmestrahlung ins All zurückgestrahlt. Wäre dies nicht der Fall, wäre unsere Erde schon lange eine glühende Lavakugel.
Man sagt: Die Erde befindet sich mit ihrer Umgebung im *Strahlungsgleichgewicht*.

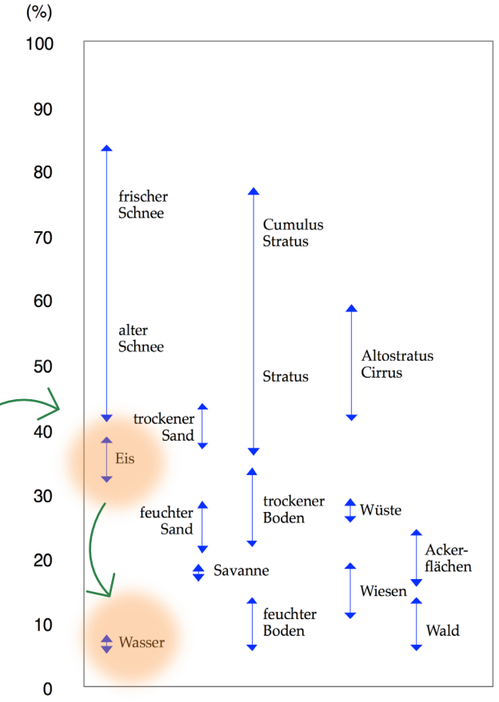
absorbierte Sonnenenergie
=
abgestrahlte Wärmeenergie



Abbildungsquellen: Erdkugel: NASA verändert von Strähle; Athabasca-Gletscher: Pixabay; Albedo-Diagramm: Hannes Grobe, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, Germany

Welche Rolle spielen Eisflächen für das Klima auf der Erde?

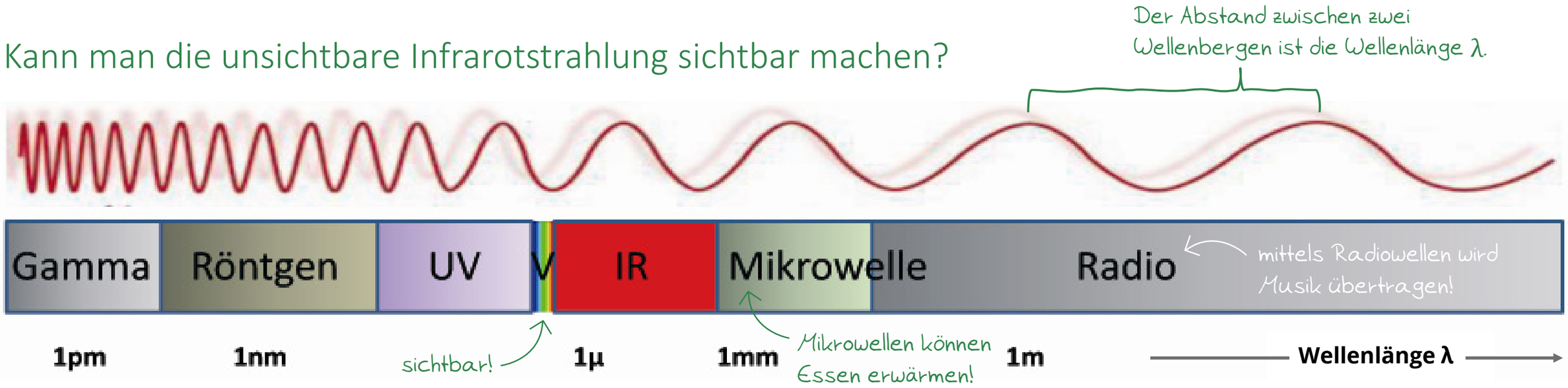
Helle Flächen auf der Erde (z.B. Eis und Schnee) reflektieren das einfallende Licht der Sonne stärker als dunkle Flächen (z.B. Wasser und Gestein). Das Maß für das Rückstrahl-vermögen einer Oberfläche wird *Albedo α* genannt. Für Neuschnee gilt z.B. α = 0,85 d. h. 85 % der einfallenden Strahlungsenergie werden reflektiert.



Schmilzt Eis, wird es zu Wasser - ist klar, hat aber schwer-wiegende Folgen, da Wasser Sonnenlicht kaum reflektiert!!

3. Die Erde, ein strahlender Planet

Kann man die unsichtbare Infrarotstrahlung sichtbar machen?

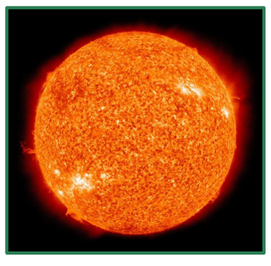


Radiowellen, das Sonnenlicht und die schädliche UV-Strahlung haben eines gemeinsam: Sie bestehen aus *elektromagnetischen Wellen*. Ein kleiner Teil dieser Strahlung im Bereich von ca. 430 bis 780 Nanometern ist für das menschliche Auge sichtbar!

Strahlung jenseits der Farbe Rot (Wellenlänge von 780 nm bis ca. 1 mm) wird *Infrarotstrahlung* (IR-Strahlung) genannt. Diese ist für das menschliche Auge unsichtbar, kann aber mit einer Wärmebildkamera sichtbar gemacht werden!

Abbildungsquellen: Glühbirne: Pixabay; Sonne: Pixabay; glühendes Eisen: Pixabay; Aufnahme Wärmebildkamera: pxhere.com

Alle Körper strahlen elektromagnetische Strahlung ab – auch du!



Aufnahme mit einer Wärmebildkamera

Je heißer das Eisen ist, desto heller und weißer glüht es!

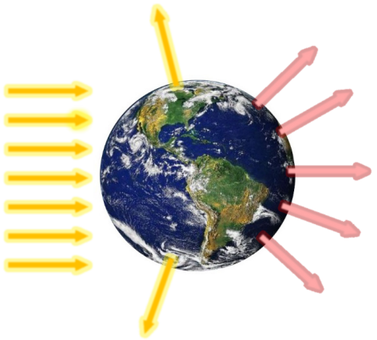
Alle Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts ($0\,K = -273{,}15\,°C$) geben elektromagnetische Strahlung ab. Je wärmer ein Körper ist, desto intensiver und kurzwelliger ist diese Strahlung. Bei sehr heißen Körpern (ab ca. 600 °C) liegt ein Teil der abgegebenen Strahlung im sichtbaren Bereich (z.B. bei glühendem Eisen, einer Glühbirne oder der Sonne).

Bei Temperaturen unter 600 °C wird der größte Teil dieser Strahlung im infraroten Bereich ausgestrahlt (z.B. bei einem Eiswürfel, dem menschlichen Körper, oder einem Wärmestrahler). Auch die von der Erde ausgehende Strahlung liegt im Bereich von 3 bis 60 Mikrometern (im Infrarotbereich) und ist daher für das menschliche Auge unsichtbar.

Die makroskopische Größe Temperatur ist auf atomarer Ebene mit einer Teilchenbewegung verknüpft. Die von einem warmen Körper emittierte elektromagnetische Strahlung wird *thermische Strahlung* oder auch *Wärmestrahlung* genannt.

4. Treibhausgase als Stellschraube für die Erdtemperatur

Welche Auswirkungen hat die Atmosphäre auf die Temperatur der Erde?



Ein Teil der einfallenden Sonnenstrahlung wird von der Erde reflektiert, der Rest absorbiert (aufgenommen). Die gleiche Menge an Energie, die so pro Zeit absorbiert wird, wird in Form unsichtbarer Wärmestrahlung wieder abgestrahlt (Strahlungsgleichgewicht).

Die Erdatmosphäre besteht aus Stickstoff (78%), Sauerstoff (21%), Argon (0,93%) und Spurengasen wie CO_2, Methan und Ozon (zusammen nur ca. 0,1%). Treibhausgase wie CO_2 und Methan absorbieren einen Teil der Wärmestrahlung des Erdbodens. Die Wiederabstrahlung erfolgt in alle Richtungen gleichmäßig. Ein Teil der Energie, die auf dem Weg ins Weltall war, wird auf diese Weise zur Erdoberfläche zurückgestrahlt.

Durch Treibhausgase in der Atmosphäre wird die Erde aufgeheizt!

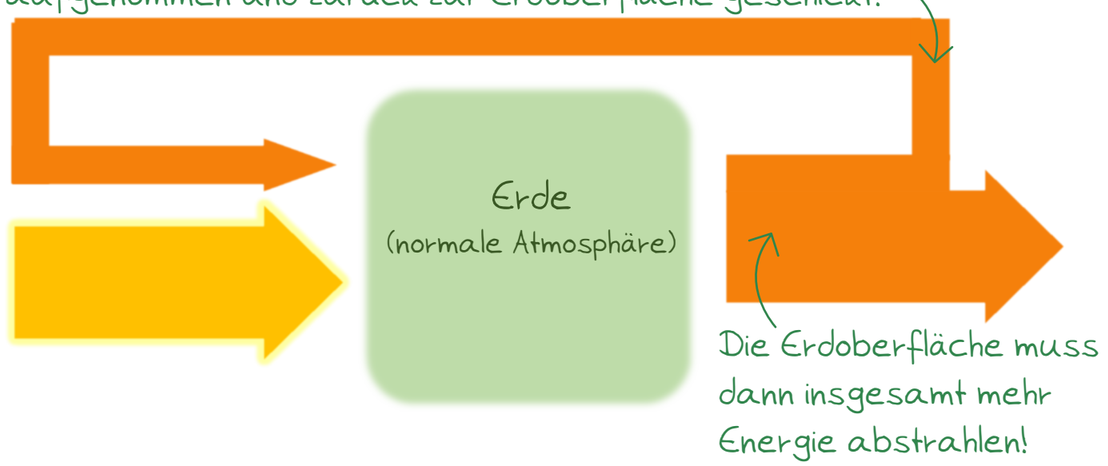
Je höher die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre ist, desto mehr Wärmestrahlung von der Erde wird dort absorbiert und desto stärker strahlt die Atmosphäre selbst auch in Richtung Erdboden!

Abbildungsquellen: Erdkugel: NASA verändert von Strähle; Erde mit Atmosphäre: NASA; Fabrik: Pixabay

Erde im Strahlungsgleichgewicht

zugeführte Energie (links) = abgeführte Energie (rechts)

Ein Teil der der Wärmestrahlung wird von der Atmosphäre aufgenommen und zurück zur Erdoberfläche geschickt!

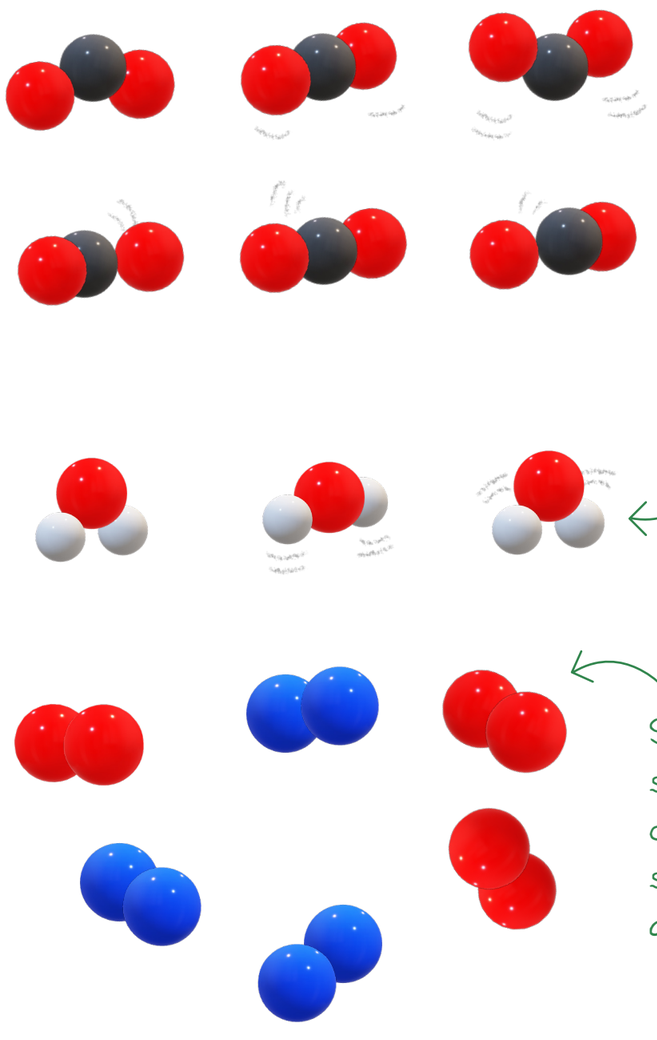


5. Die Wirkung von Treibhausgasen

Die Erdatmosphäre besteht hauptsächlich aus Stickstoff (78%), Sauerstoff (21%) und Argon (0,93%).
Andere Gase wie CO_2, Methan und Ozon kommen zwar nur in Spuren vor, haben aber eine große Wirkung!

Schwingende Moleküle

Treibhausgase wie CO_2, Wasserdampf oder Methan können die Infrarotstrahlung der Erdoberfläche aufnehmen, da sich durch Schwingen die Ladungen im Molekül verschieben. Die aufgenommene Strahlungs-energie wird dabei in Schwingungsenergie umgewandelt und anschließend unter anderem durch Stöße auch auf Teilchen in der Umgebung übertragen – die Atmosphäre erwärmt sich!



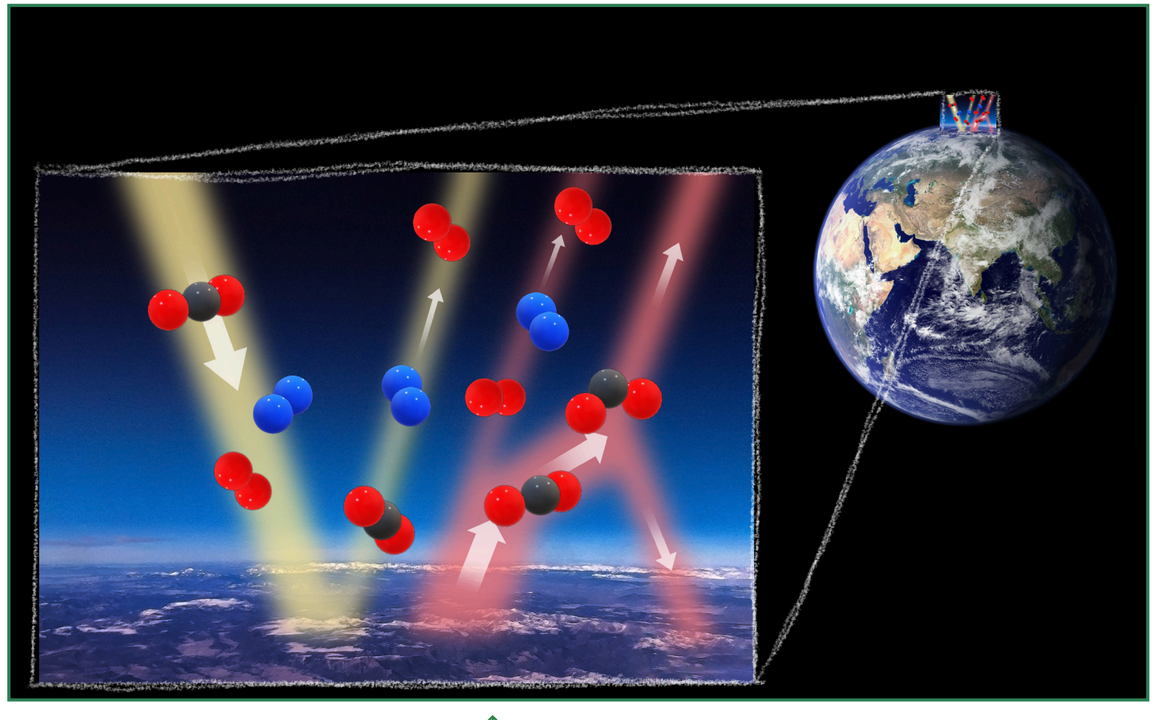
Zwei Schwingungs-arten eines CO_2-Moleküls!

So kann ein H_2O-Molekül schwingen!

Stickstoff und Sauerstoff sind keine Dipole und können daher durch Infrarot-strahlung nicht zum Schwingen angeregt werden!

Absorption in der Atmosphäre

Die Strahlung der Sonne durchdringt die Atmosphäre nahezu ungehindert. Auf der Erdoberfläche wird ein Teil (ca. 70%) der auftreffenden Strahlung absorbiert und in Form infraroter Wärmestrahlung in Richtung Weltall wieder abgestrahlt. Auf dem Weg durch die Atmosphäre haben nur Treibhausgase die Fähigkeit, diese langwellige Strahlung zu absorbieren und zum Teil in Richtung Erdboden zurückzuschicken.



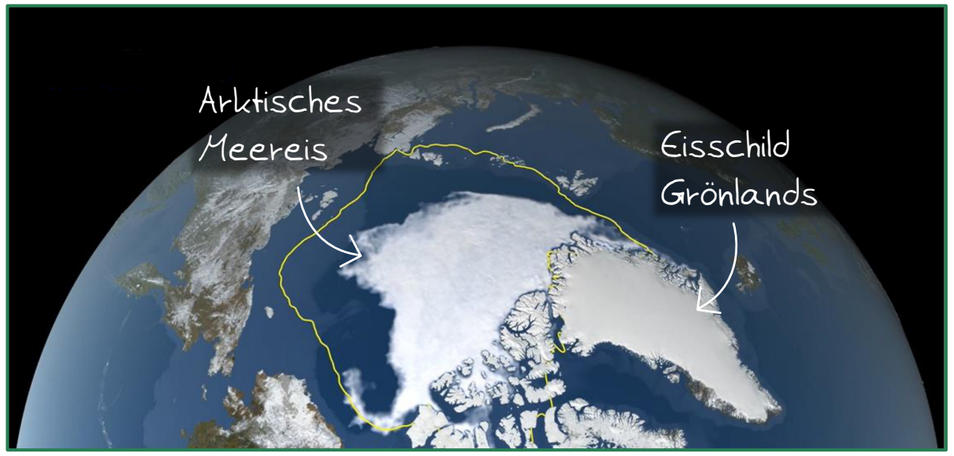
Nur die Treibhausgase absorbieren die Wärmestrahlung der Erde und senden sie zum Teil zur Erdoberfläche zurück!

Abbildungsquellen: Erde in Grafik: NASA

6. Der Anstieg des Meeresspiegels

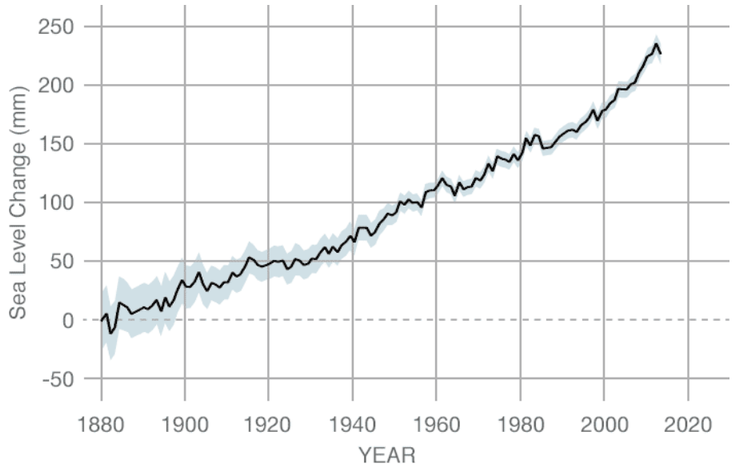
Welche Ursachen und Auswirkungen hat der Anstieg des Meeresspiegels?

Auf Grund der globalen Erwärmung schmelzen aktuell große Eismassen an Land wie z.B. der Grönländische Eisschild oder Gletscher in den Alpen ab. Zudem steigt die Wassertemperatur der Ozeane an, was im Wasser schwimmende Eismassen schneller abschmelzen lässt. Doch erstaunlicherweise führt abschmelzendes Eis nicht immer zu einem Anstieg des Meeresspiegels.



Im Bild ist die Ausdehnung des arktischen Meereises heute (weiße Fläche) und vor 30 Jahren (gelber Umriss) zu sehen.

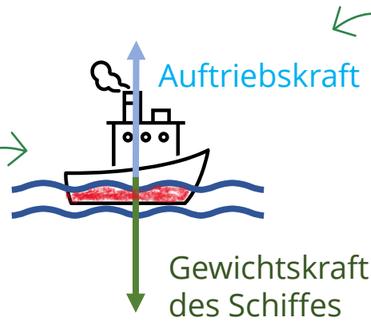
Der Weltklimarat rechnet in einem Spezialreport mit einem Anstieg des Meeresspiegels von bis zu 110 cm bis zum Jahr 2100 und bis zu 5,4 m im Jahr 2300!



Warum schwimmen Eisberge auf dem Wasser?

Wasser hat bei 4 °C seine größte Dichte. Gefriert flüssiges Wasser, nimmt es deutlich an Volumen zu, während seine Dichte deutlich abnimmt und somit ein Liter Eis leichter ist als ein Liter flüssiges Wasser. Und gemäß dem Prinzip von Archimedes ist die Auftriebskraft auf einen schwimmenden Körper genau so groß, wie die Gewichtskraft der vom Körper verdrängten Flüssigkeit. Damit kann begründet werden, dass die Spitze eines Eisberges stets über der Wasseroberfläche steht.

Ein Schiff schwimmt, da die Auftriebskraft (nach oben) gerade so groß ist wie die Gewichtskraft (nach unten)!



Die Auftriebskraft ist so groß wie die Gewichtskraft des Wassers, das vom Schiff verdrängt wird (hier rot markiert)!

Bei einer Sturmflut erhebt sich das Meer mehrere Meter über den mittleren Wasserspiegel, welcher durch abschmelzende Festlandeismassen immer weiter ansteigt. Solche Extremwetterereignisse werden wegen des Klimawandels immer häufiger. Kurzfristig kann durch eine Erhöhung der Deiche das Land geschützt werden. Wenn allerdings langfristig alles Inlandeis abschmilzt erhöht sich der Meeresspiegel um ca. 65 Meter!

Abbildungsquellen: Arktisches Meereis: NASA; Anstieg Meeresspiegel: NASA; Landesschutzdeich: wikimedia

7. Die Klimazonen und der Klimawandel

Welche Folgen hat eine Verschiebung der Klimazonen?

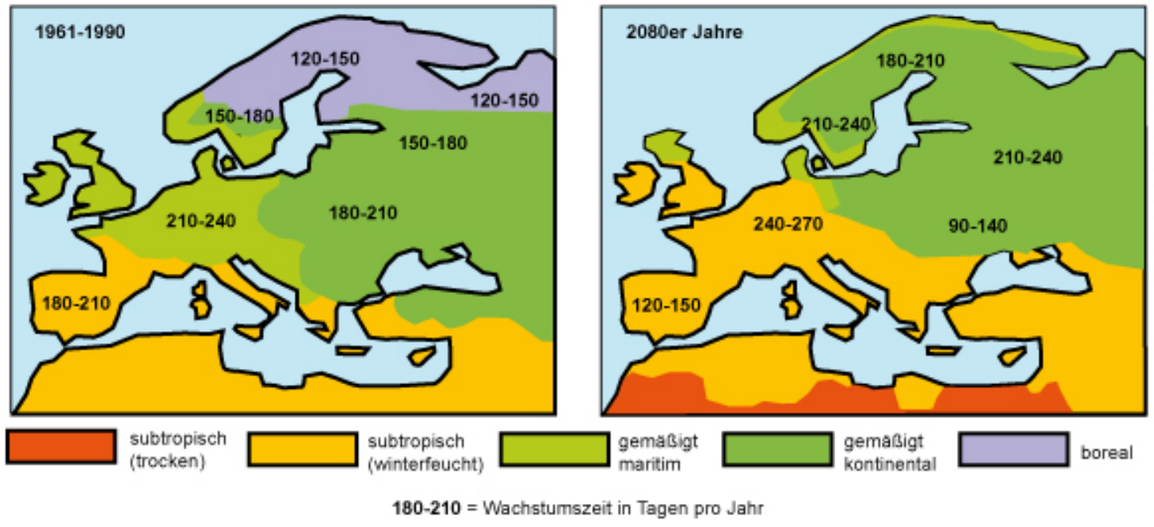
Auch in der erdgeschichtlichen Vergangenheit gab es bereits drastische Veränderungen des Klimas und damit einhergehend eine Verschiebung der Klimazonen – dies führte jedoch immer auch zu einem Aussterben von Tier- und Pflanzenarten!

Die aktuelle Verschiebung der Klimazonen geschieht in einem so rasanten Tempo, dass sich viele Tier- und Pflanzenarten nicht an die veränderten Bedingungen anpassen können.

Verschiebung der Klimazonen am Beispiel von Europa

In der Karte ist die Verschiebung der Klimazonen in Richtung Norden (auf der Nordhalbkugel) bis zu Ende dieses Jahrhunderts deutlich zu sehen.

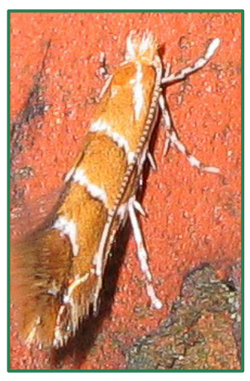
An ihren jetzigen Standorten sind heutige Bäume dann nicht mehr an das zukünftige Klima angepasst. In weniger als einem Jahrhundert kann sich aber z.B. in Bayern keine Vegetation entwickeln, wie wir sie aus Süd-Frankreich kennen.



Einer Studie zufolge wird das Klima in Madrid 2050 dem heutigen Klima in Marrakesch ähneln, das Klima in London im Jahr 2050 dem heutigen Klima Barcelonas!

Im Biergarten unter Kastanienbäumen sitzen?

Das könnte in Deutschland schon bald der Vergangenheit angehören. Zunehmende Sommerhitze und Trockenheit schwächen die Bäumen, die für ein solches Klima nicht gemacht sind. Milde Winter begünstigen hingegen die Verbreitung von Parasiten, die bislang in unseren Breiten nicht überleben konnten.



Die Miniermotte frisst Gänge in die Blätter, was zum Welken führt!

Abbildungsquellen: Verschiebung Klimazonen: bildungsserver.hamburg.de; Kastanienblatt oben: Pixabay; Kastanienblatt braun: Wikimedia von Tomroo; Rosskastanienminiermotte: Wikimedia von soebe

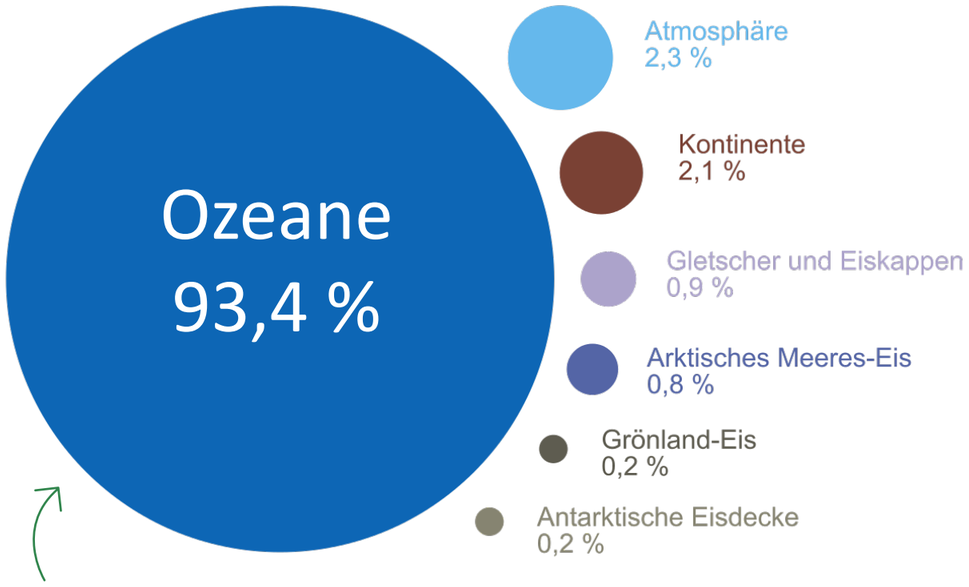
8. Die Ozeane als Klimapuffer

Wie schützen uns die Ozeane vor einem noch stärkeren Klimawandel?

Durch den vom Menschen verursachten Treibhauseffekt wird dem Klimasystem der Erde zusätzliche Energie zugeführt. Glücklicherweise sind etwa 73% der Erdoberfläche mit Wasser bedeckt.

Dieses Wasser hat aufgrund seiner großen Wärmekapazität ca. 93% dieser zusätzlich zugeführten Energie gespeichert - die globale Erwärmung wird somit stark abgepuffert!

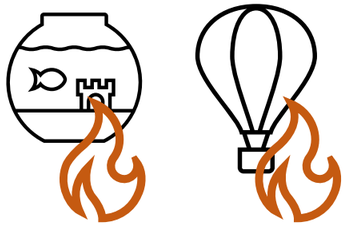
Wohin fließt die globale Erwärmung?



93% der zusätzlichen Energie im Klimasystem aufgrund des Treibhauseffekts fließen in die Ozeane!

Mittlere globale Meeresoberflächentemperatur für März 2016. Die Karte basiert auf Messungen mit dem MODIS-Spektrograf des Aqua-Satelliten der NASA. Der Farbbereich zeigt Temperaturen zwischen -2°C und +35°C an (NASA Near Earth Observations)

Wasser ist ein äußerst effektiver Wärmespeicher! Es kann viel Energie aufnehmen, ohne sich dabei stark zu erwärmen.



Führt man einem Kilogramm Luft zehn Kilojoule an Energie zu, erwärmt es sich um zehn Kelvin, 10 kg Wasser hingegen nur um 2,3 K!

Die Ozeane entziehen der Atmosphäre aber nicht nur Wärmeenergie, sondern auch CO_2, welches sich im Wasser löst. Die Ozeane puffern so den menschgemachten Treibhauseffekt doppelt ab – jedoch mit schwerwiegenden Folgen!

Abbildungsquellen: Wohin fließt die globale Erwärmung?: IPCC AR4 5.2.2.3; Meerestemperatur: NASA Near Earth Observations

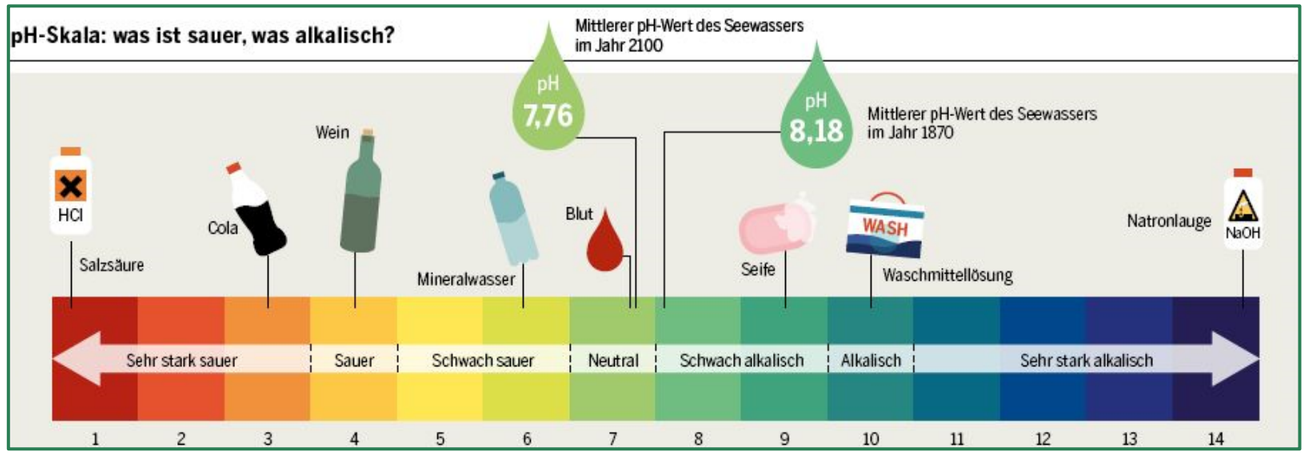
9. Die Versauerung der Ozeane

Warum werden mit dem Klimawandel auch die Ozeane sauer?

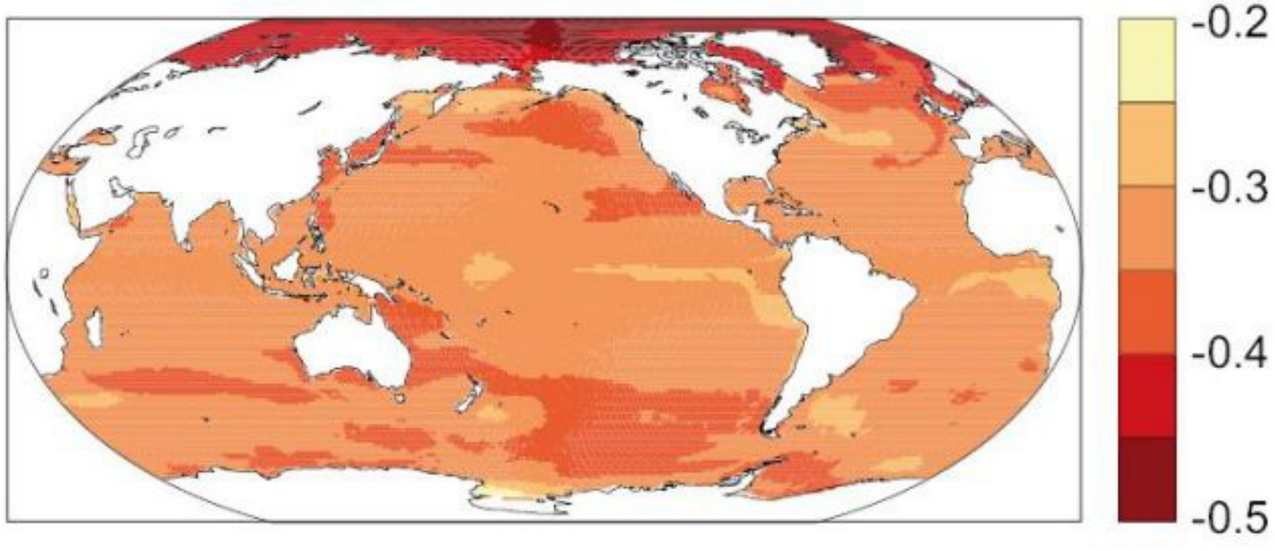
Messungen des pH-Wertes in den Ozeanen zeigen eine zunehmende Versauerung des Wassers. Steigt in der Erdatmosphäre der Gehalt des Treibhausgases CO2, wird dieses auch vermehrt im Meerwasser gelöst. Ein kleiner Teil davon reagiert dort zu Kohlensäure:

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$$

Wer eine Sprudelmaschine zuhause hat, kennt diese Reaktion bereits!



Verglichen mit den 1990er Jahren kann der pH-Wert bis zu den 2090er Jahre in Teilen der Weltmeere um bis zu 0,5 Punkte sinken:

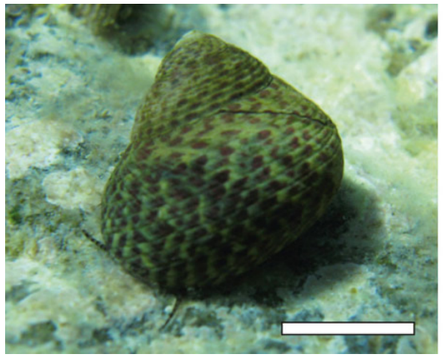


Welche Folgen hat diese Versauerung?

Kalkbildende Organismen wie Muscheln, Korallen, Seeigel, Seesterne und Muscheln sind auf eine hohe Sättigung an Carbonat-Ionen (CO_3^{2-}) im Meerwasser angewiesen. Ein erhöhter Kohlensäuregehalt im Meerwasser führt nun allerdings dazu, dass diese in Form von Hydrogencarbonat-Ionen (HCO_3^-) gebunden werden:

$$H_2CO_3 + CO_3^{2-} \rightleftharpoons 2\,HCO_3^-$$

Die Bildung von Kalk ($CaCO_3$) wird somit erschwert bzw. Kalkschalen lösen sich auf. Im linken Bild ist ein intaktes gepunktetes Schneckenhaus bei einem pH-Wert von 8,2 dargestellt. Das Schneckenhaus im rechten Bild bei einem pH-Wert von 7,3 zeigt bereits deutliche Auflösungsspuren.

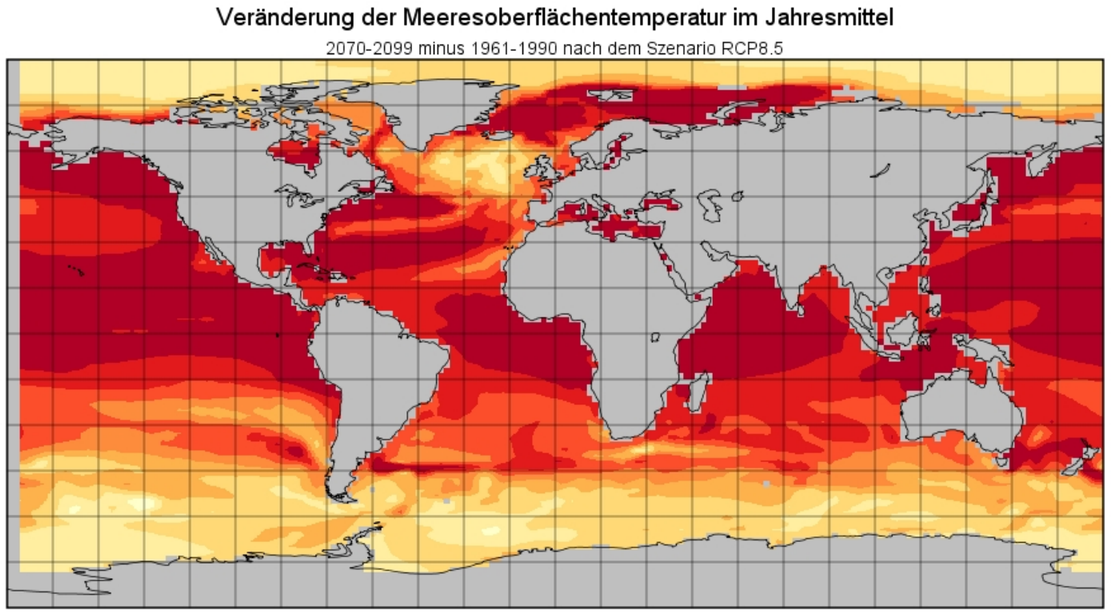


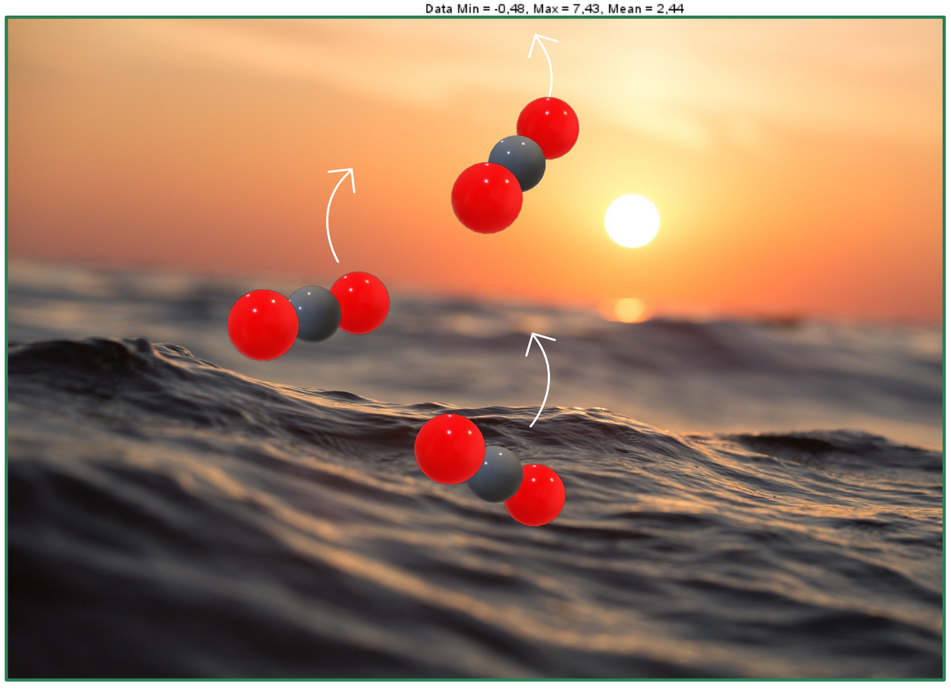
Die Folgen, die ein hoher Säuregehalt im Wasser auf Kalk hat, kann man beim Entkalken eines Wasserkochers erleben!

Abbildungsquellen: pH-Skala: Heinrich Böll Stiftung (2017) Meeresatlas. Daten und Fakten über den Umgang mit dem Ozean.; pH-Globus (IPCC (2013): Climate Change 2013, Working Group I: The Science of Climate Change, Figure 6.2.8; Schneckenhaus (Hall-Spencer et al. (2008) auf https://worldoceanreview.com/de/wor-1/meer-und-chemie/ozeanversauerung/ (12.10.2020))

10. Freisetzung von CO_2 durch die Ozeane

Warum verstärkt eine Erwärmung der Ozeane die globale Erwärmung?





Die Ozeane spielen eine Doppelrolle als Puffer der globalen Erwärmung:

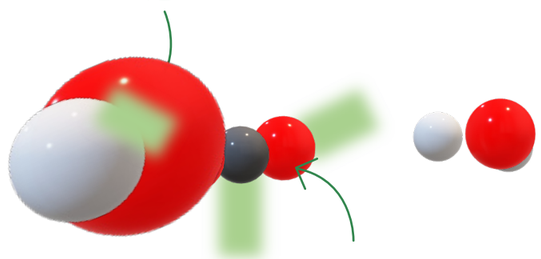
1. Sie speichern einen Großteil der durch den Treibhauseffekt zusätzlich eingebrachten Wärmeenergie (über 90%!).
2. Sie nehmen CO_2 aus der Atmosphäre auf und lösen es im Wasser (s. unten). So werden etwa 25% des menschlichen Ausstoßes gebunden!

Wenn jedoch die Temperatur des Wassers zunimmt, verlieren diese Puffer an Wirkung:

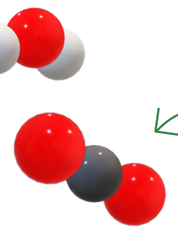
1. Warmes Wasser nimmt weniger Wärme auf, da die Temperaturdifferenz zur Umgebung abnimmt.
2. Warmes Wasser kann weniger CO_2 binden, was zu einer Freisetzung des Treibhausgases führt!

Zudem entsteht durch die erhöhten Wassertemperaturen verstärkt Wasserdampf. Da gasförmiges Wasser selbst ein Treibhausgas ist, führt dies zu einer zusätzlichen Verstärkung des Treibhauseffekts!

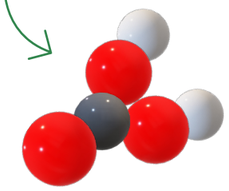
Die CO_2-Moleküle sind nur sehr schwach an H_2O-Moleküle gebunden!



Gelöstes CO_2-Molekül



Ein kleiner Teil der gelösten CO_2-Moleküle reagiert mit Wasser zu Kohlensäure (H_2CO_3)



Bei einer Flasche Mineralwasser kann man beobachten, dass das gelöste CO_2 durch Schütteln oder Wärmezufuhr wieder frei wird!

Abbildungsquellen: Veränderung der Meeresoberflächentemperatur im Jahresmittel: wiki.bildungsserver.de/klimawandel; Meer: Pixabay

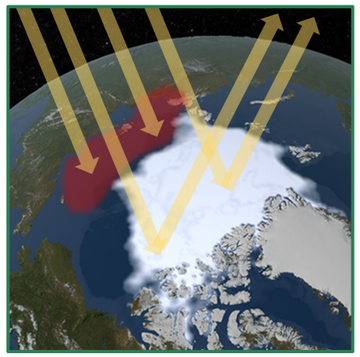
11. Kipppunkte – wenn das Klima kippt

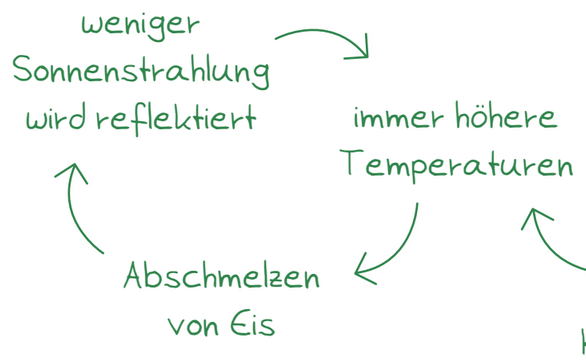
Rückkopplungsprozesse und Teufelskreise

Einige Rückkopplungsprozesse sind sehr angenehm: Je mehr Geld du auf deinem Konto hast, desto mehr Zinsen bekommst du dafür. Dies führt zu mehr Geld auf deinem Konto, worauf du dann wiederum noch mehr Zinsen bekommst… Andere Rückkopplungsprozesse sind dagegen wahre Teufelskreise! Hier einige Beispiele:

Abschmelzende Eisflächen

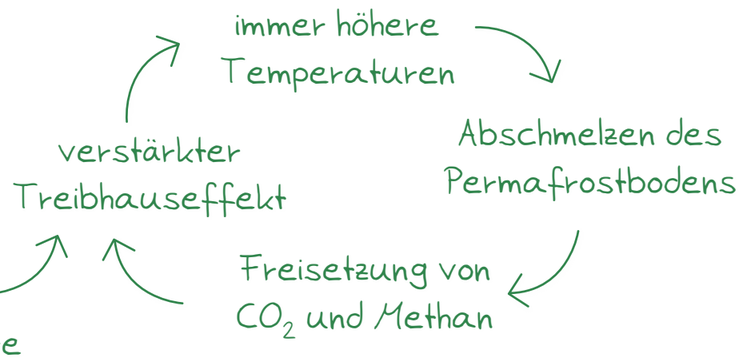
Unter abschmelzendem Eis kommen dunkle und damit stark absorbierende Flächen wie Wasser oder Gestein zum Vorschein.





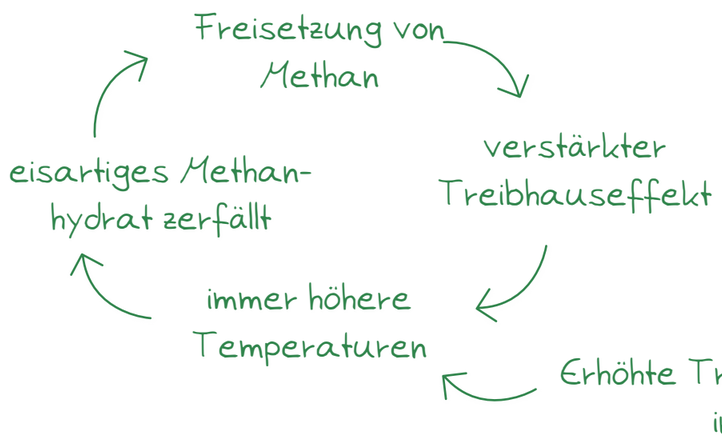
Permafrost

Permafrost ist dauerhaft gefrorener Boden (v. a. in der Arktis). In ihm sind Jahrtausende alte Kohlenstoffablagerungen eingefroren.



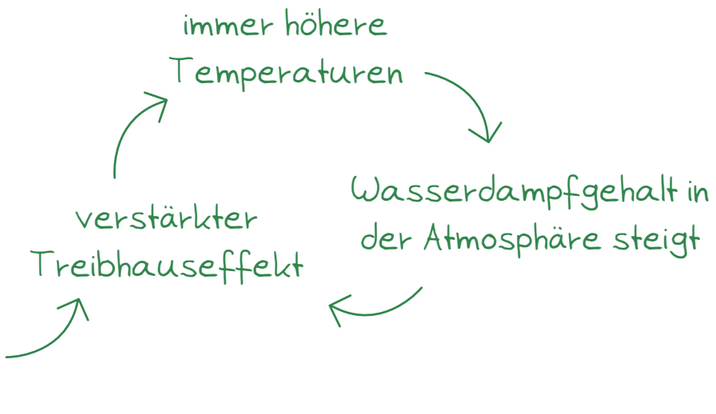
Methanhydrate in den Ozeanen

Bis zu einigen Tausend Gigatonnen Methan-hydrat lagern in Ozeansedimenten am Meeresboden.



Wasserdampf

Wärmere Luft kann mehr Wasserdampf speichern als kalte Luft und Wasserdampf ist ein starkes Treibhausgas.



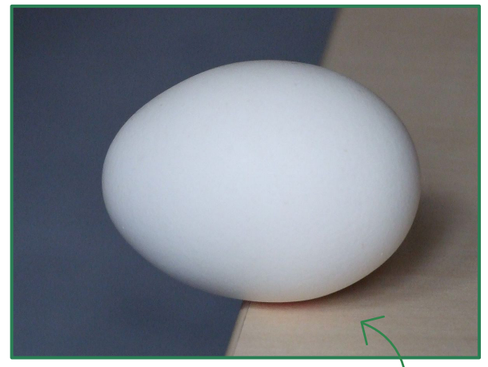
Abbildungsquellen: Arktisches Meereis: NASA verändert von Strähle; Gashydrat: Wikimedia von Wusel007; Permafrostboden: NASA; Geysir: Pixabay

12. Kipppunkte: Achillesferse im Klimasystem

Was ist ein Kipppunkt und wie wird er ausgelöst?

Der Klimawandel hat Prozesse zur Folge, die selbstverstärkend wirken, so genannte Rückkopplungsprozesse. Schmilzt beispielsweise das Eis der Arktis ab, wird weniger Sonnenstrahlung reflektiert, sodass sich das arktische Meer stärker erwärmt und somit noch mehr Eis abschmilzt. Wird eine bestimmte Schwelle überschritten, ist ein solcher Prozess nicht mehr aufzuhalten – ein Kipppunkt ist erreicht!

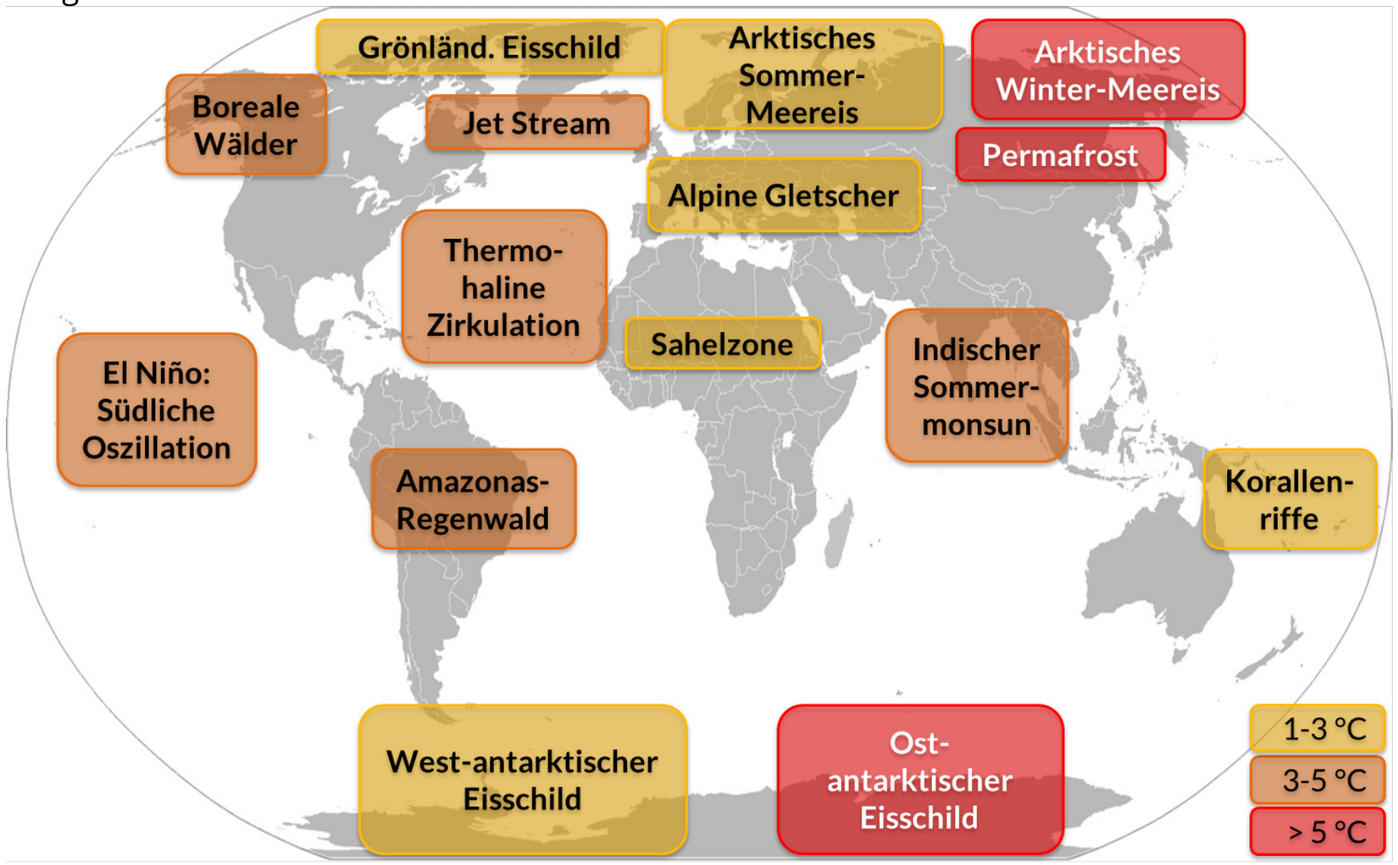
Selbst wenn die Temperatur nun wieder absinken würde, würde sich die ursprüngliche Eisbedeckung nicht automatisch wieder herstellen.
Besonders dramatisch ist, dass das Auslösen eines Kipppunktes und eine fortschreitende Temperaturerhöhung zu einer Kaskade sich gegenseitig auslösender Kipppunkte führen kann („Dominoeffekt“)!



Rollt ein Ei auf einem Tisch, wird bis zur Kante nichts passieren. Doch dann reicht ein kleiner Stupser aus und das Ei fällt unwiederbringlich auf den Boden!

Welche Kippelemente gibt es auf der Erde?

In der Karte sind die wichtigsten Kippelemente dargestellt, die das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) identifiziert hat. Beispielsweise hätte ein Rückgang der Nordischen Nadelwälder (Borealwälder) durch Wassermangel, Schädlinge und anderen Stress eine massive Freisetzung von Kohlendioxid und damit eine weitere Aufheizung des Klimas zur Folge, sodass dieser Prozess irgendwann nicht mehr aufzuhalten ist!



Wir sind höchstwahrscheinlich unter den letzten Generationen, die noch intakte tropische Korallenriffe erleben können – das Wasser wird zu warm!

Abbildungsquellen: Kipppunkte: G. Hagedorn & Felix Schreyer, CC BY-SA 4.0, after Steffen et al. 2018, Fig. 3, PNAS, https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115; Ei auf Kante: Wikimedia von Jovel