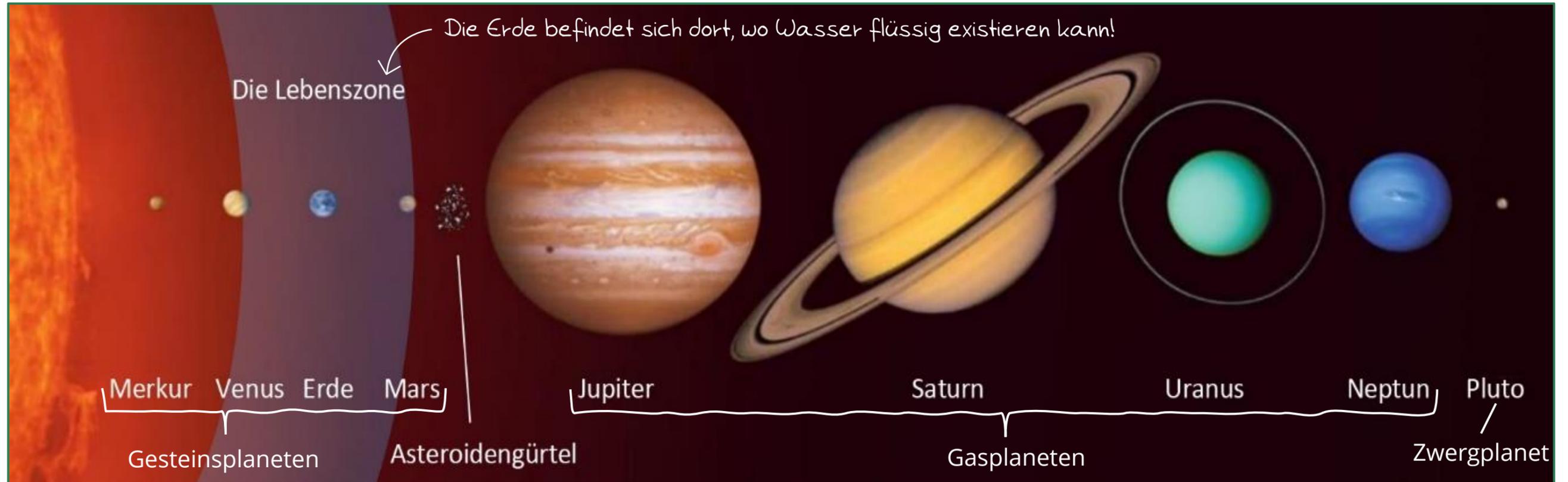


1. Die Erde im Sonnensystem

Was macht unsere Erde zu einem bewohnbaren Planeten?



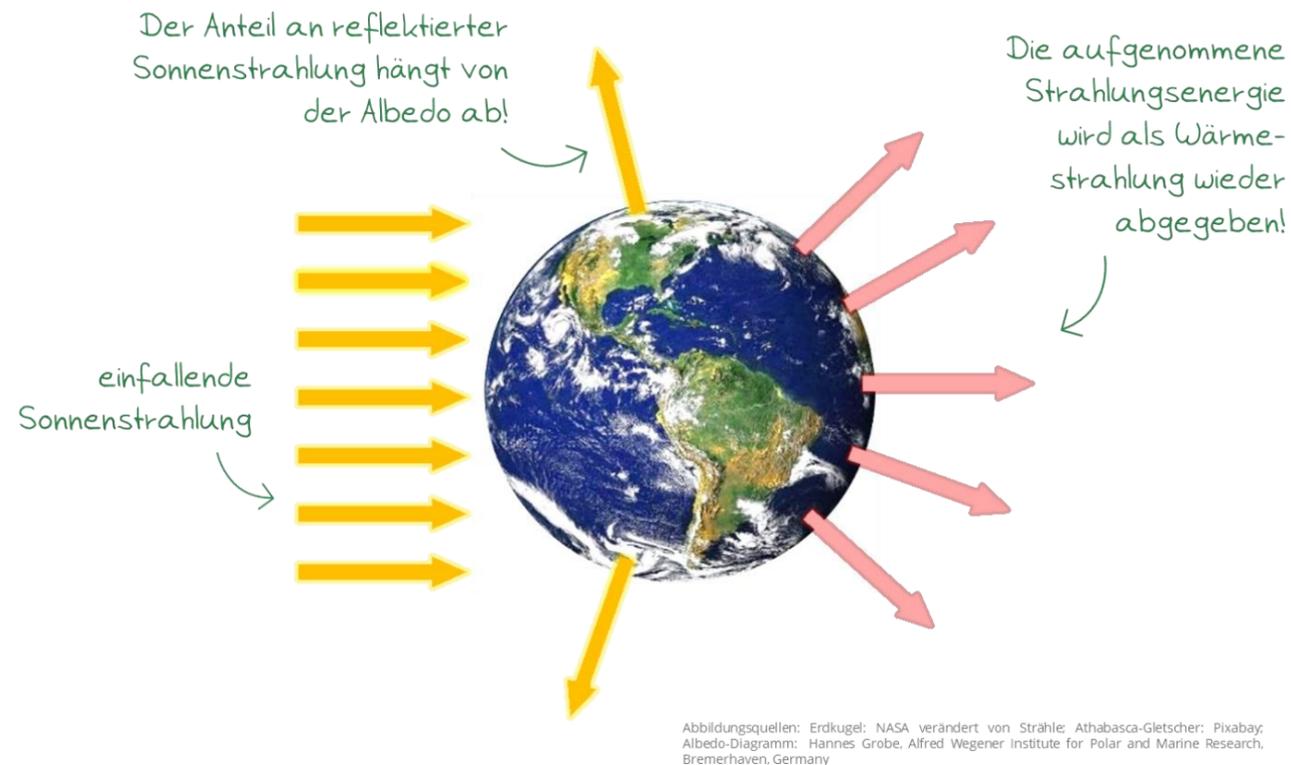
Abbildungsquellen: Sonne mit Planeten: NASA verändert von Scorza; Wasser auf der Erde: Perlman&Cook; Magnetisches Schutzschild: NASA; Erde und Mond: NASA

Hintergrund:

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



Warum erwärmt sich die Erde nicht immer weiter?



Hintergrund:

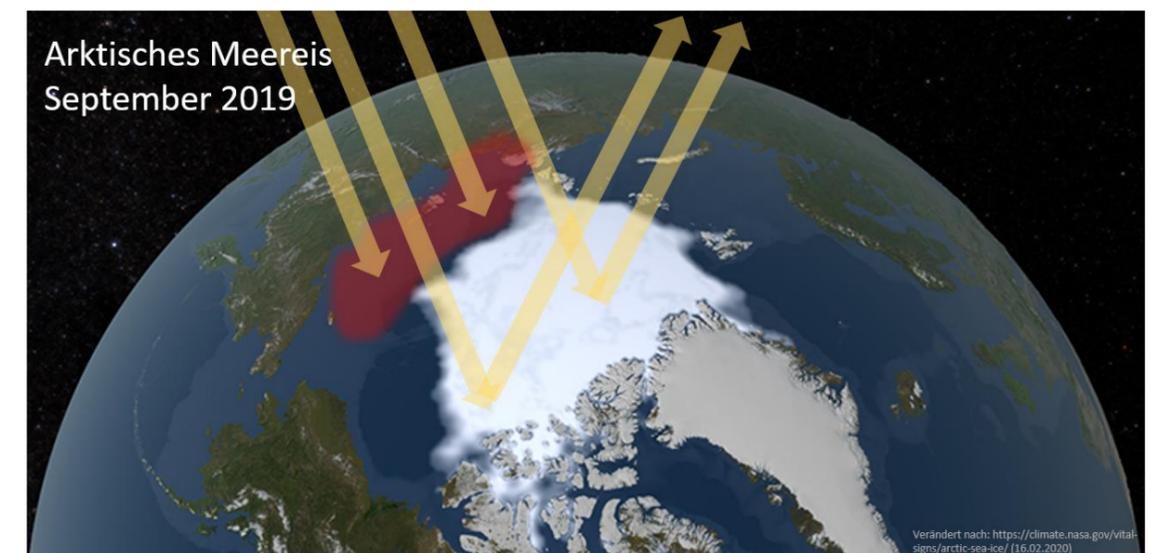
Je wärmer ein Körper ist, desto mehr Energie gibt er in Form von thermischer Strahlung ab (vergleiche z. B. kaltes und glühendes Eisen). Wird ein Körper bestrahlt, wird er immer wärmer und strahlt damit auch stärker wieder ab. Sind die aufgenommene und abgestrahlte Energie in einem gewissen Zeitraum gleich, befindet er sich im Strahlungsgleichgewicht und hat eine Gleichgewichtstemperatur erreicht. Die Erde sowie alle Planeten befinden sich im Strahlungsgleichgewicht.

Welche Rolle spielen Eisflächen für das Klima auf der Erde?

Hintergrund:

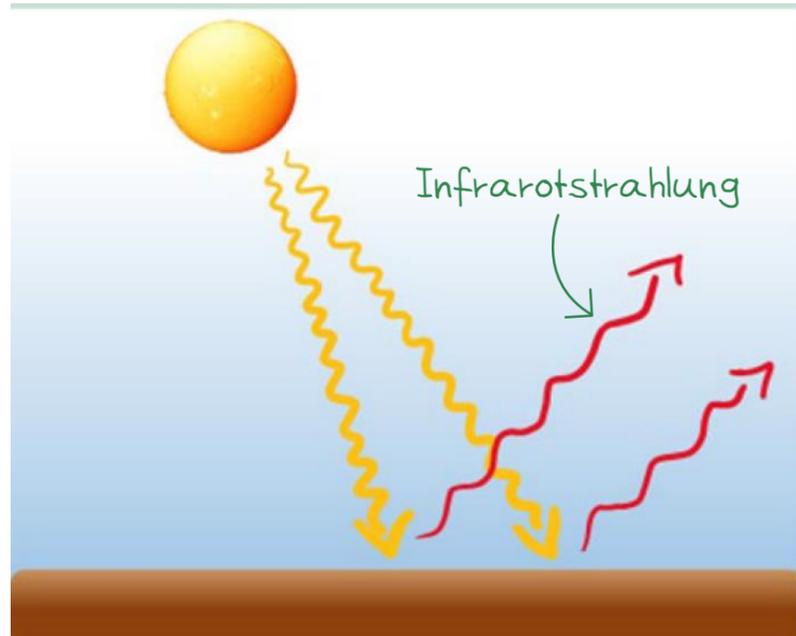
Helle Flächen auf der Erde, wie z.B. Eis und Schnee, reflektieren das einfallende Licht der Sonne stärker als z. B. Wasser oder der Erdboden. Dieses Rückstrahlvermögen einer Oberfläche wird als Albedo α (lat. Weiße) bezeichnet. Für die gesamte Erde gilt $\alpha = 0,3$, d. h. ca. 30 % der einfallenden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

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



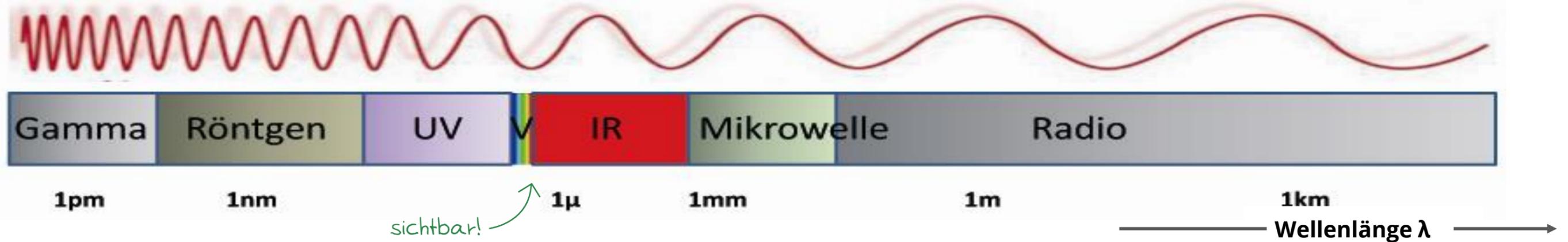
3. Die Erde, ein strahlender Planet

Kann man die unsichtbare Infrarotstrahlung sichtbar machen?



Hintergrund:

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



Hintergrund:

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



Aufnahme mit einer Wärmebildkamera



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

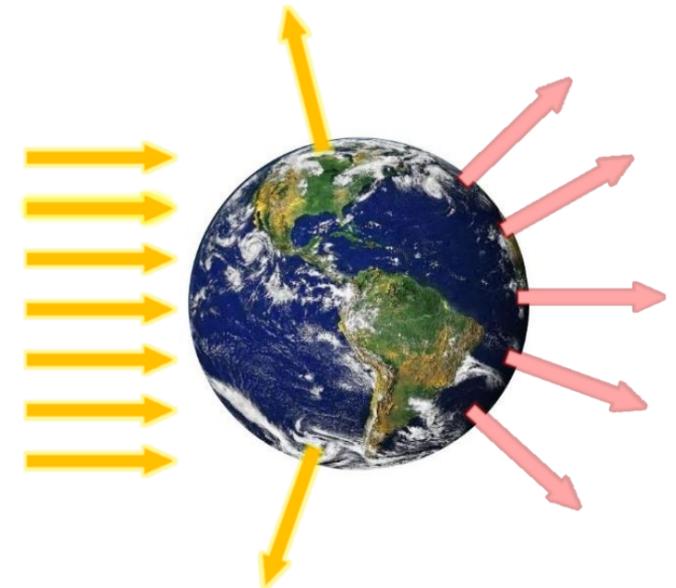


Je heißer das Eisen ist, desto heller und weißer glüht es!

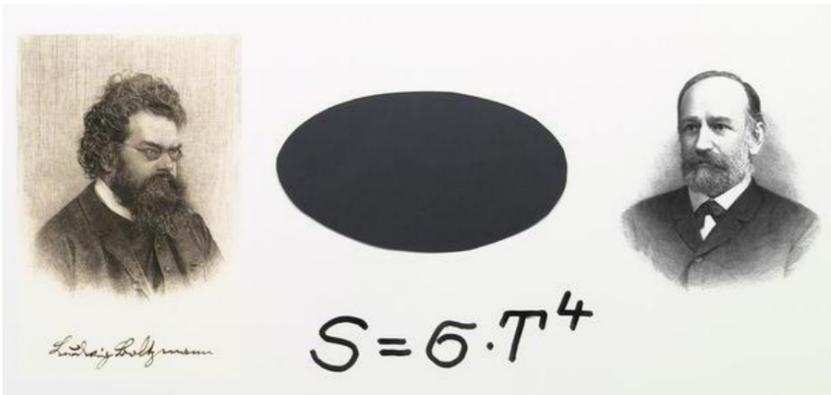
4. Treibhausgase als Stellschraube für die Erdtemperatur

Welche Auswirkungen hat die Atmosphäre auf die Temperatur der Erde?

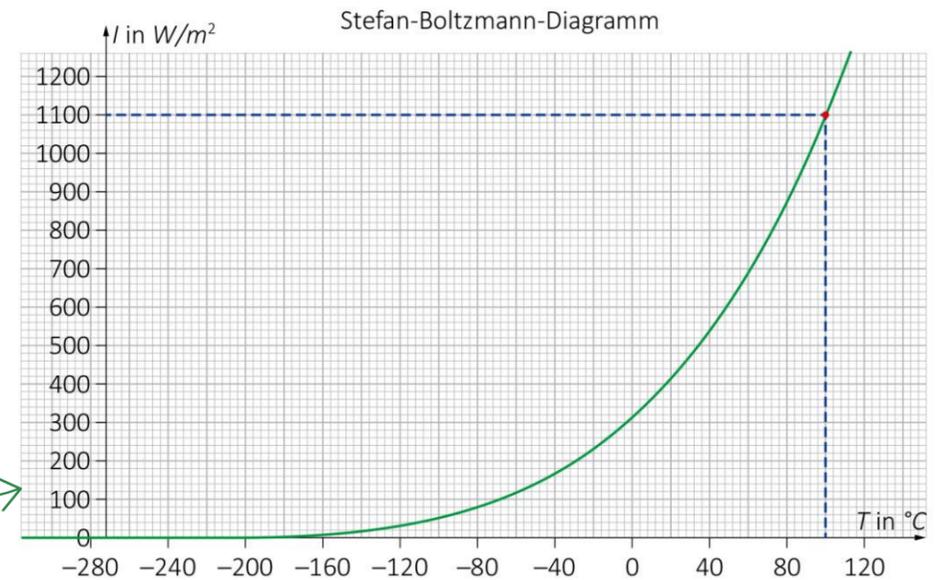
Die Strahlungsleistung der Sonne am Oberrand der Atmosphäre beträgt bei senkrechter Einstrahlung etwa 1366 W/m^2 , die so genannte Solarkonstante. Da die Erde jedoch nur zur Hälfte von der Sonne angestrahlt wird und eine Kugelgestalt besitzt, wird sie im Mittel nur von 340 W/m^2 (Watt pro m^2) angestrahlt. Ca. 30% der Sonnenstrahlung wird z. B. durch Eisflächen und weiße Wolken in Richtung All reflektiert. Die restliche Energie von 238 W/m^2 wird dann vom Erdboden absorbiert (aufgenommen) und in Form von unsichtbarer Wärmestrahlung (im Infrarotbereich) wieder abgestrahlt. Die abgestrahlte Energiemenge ist gleich der eingestrahnten Energiemenge – die Erde befindet sich im Strahlungsgleichgewicht!



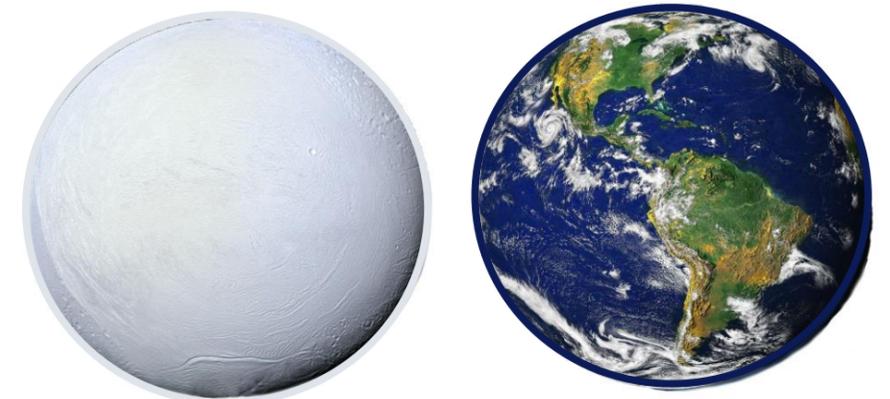
Unsere Frage lautet: Welche Temperatur hätte eine Erde ohne Atmosphäre und im Strahlungsgleichgewicht?



Die Antwort gibt uns **Das Stefan-Boltzmann-Gesetz**, das beschreibt, wie viel Energie ein Körper pro m^2 seiner Oberfläche pro Sekunde bei einer bestimmten Temperatur T abstrahlt. Dieses Gesetz kann in Diagrammform dargestellt werden (rechts). Dort können wir z.B. ablesen, dass kochendes Wasser eine Strahlungsintensität von 1100 W/m^2 abgibt.



Wir können nun im Diagramm die Temperatur der Erde im Strahlungsgleichgewicht und ohne Atmosphäre ermitteln: Sie wäre sehr kalt! Entsprechend dem Diagramm **-18 °C**! Ohne Atmosphäre wäre also die Erde eine weiße Eiskugel! Sie ist aber ein wunderschöner Planet mit einer mittleren Temperatur von **15 °C**! Woher kommt dieser Unterschied? Es ist bewiesen, dass die Wärmestrahlung der Erdoberfläche nicht komplett ins All abgestrahlt wird, sondern von den Treibhausgasen der Erdatmosphäre zu 76 % absorbiert wird und gleichmäßig in alle Richtungen wieder abgestrahlt wird – ca. die Hälfte in Richtung Weltall, die andere Hälfte in Richtung Erdboden. Letztere sorgt für einen Unterschied von **33 °C** und für viel mehr Wärme!



5. Die Wirkung von Treibhausgasen

Absorption in der Atmosphäre

Hintergrund:

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

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

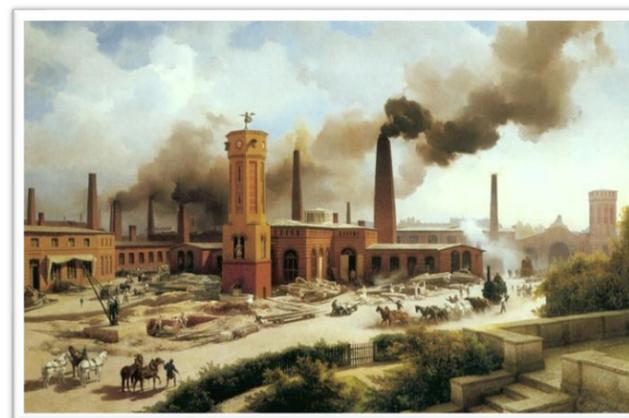


Menschengemachter Klimawandel

Durch den Menschen verursachter, extremer Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, seit der industriellen Revolution

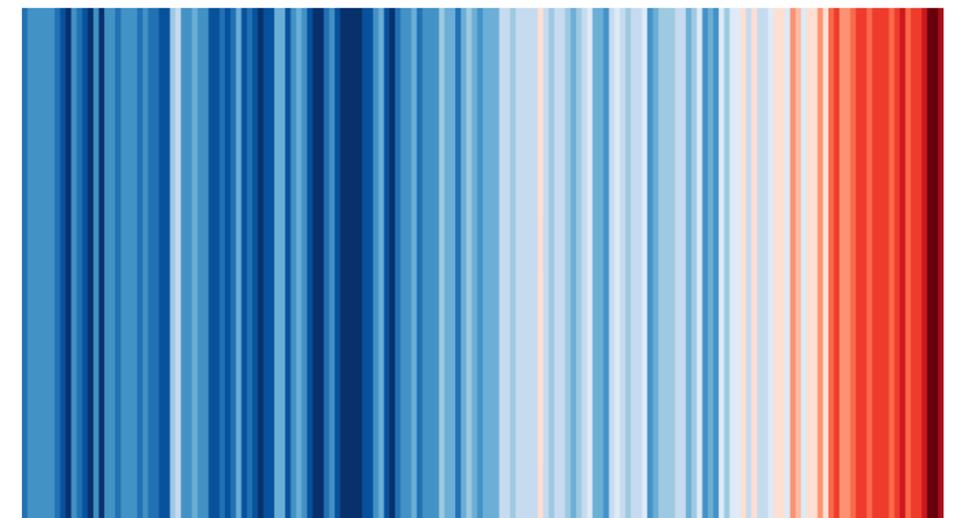


Quelle: climate.nasa.gov/evidence/



Karl Eduard Biermann 1847
Quelle: Preußen Kunst und Architektur, Wikimedia (11.02.2020)

Direkte Korrelation des extremen CO₂-Austoßes und der Temperaturerhöhung auf der Erde

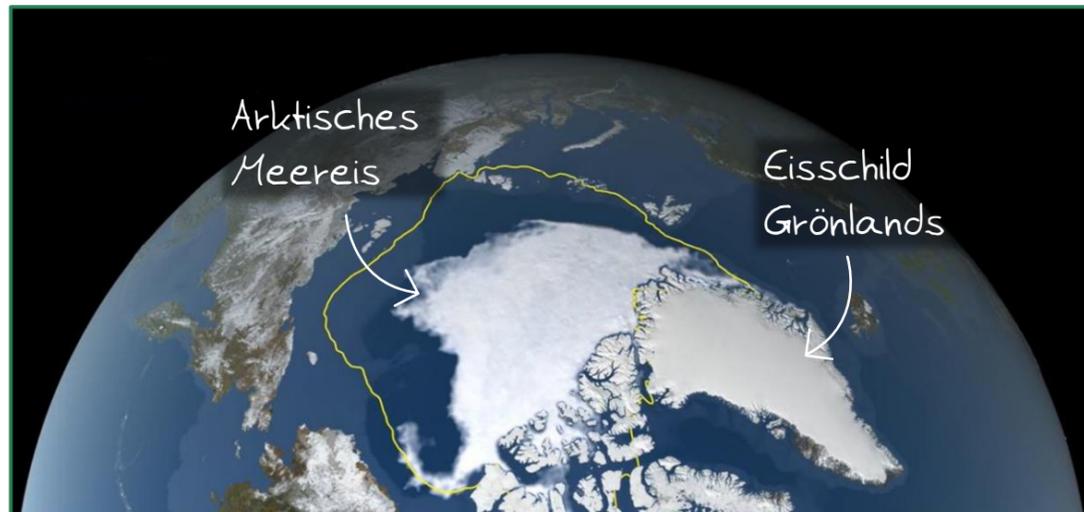


Annual global temperatures from 1850-2017
Quelle: <https://www.climate-lab-book.ac.uk/2018/warming-stripes/> (13.12.2020)

Welche Ursachen und Auswirkungen hat der Anstieg des Meeresspiegels?

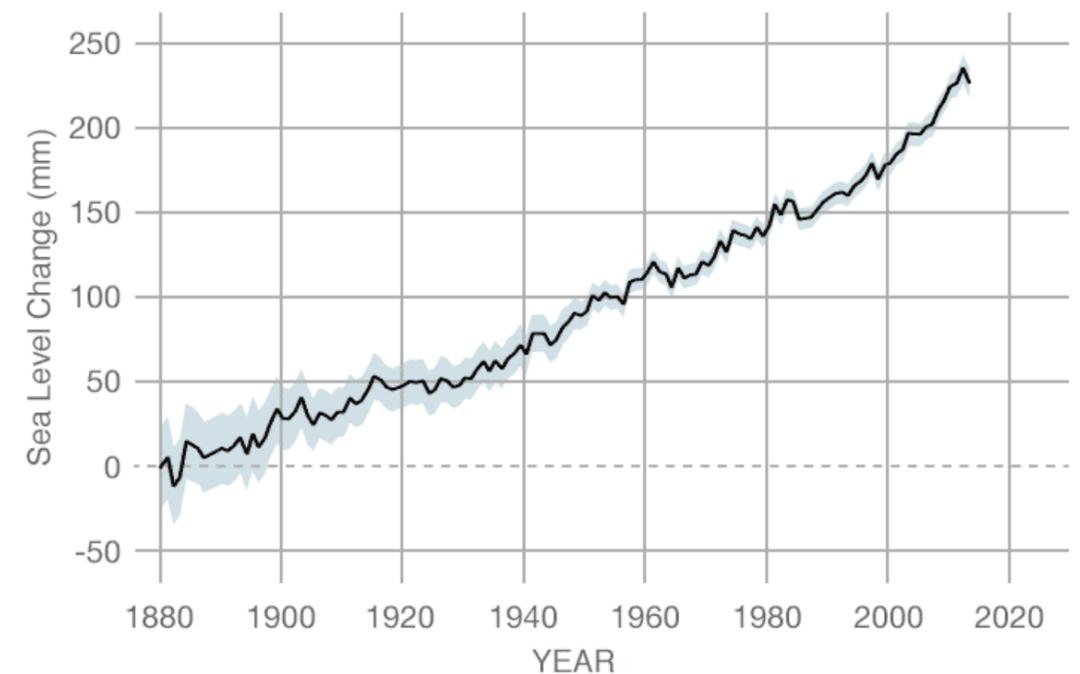
Hintergrund:

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



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!

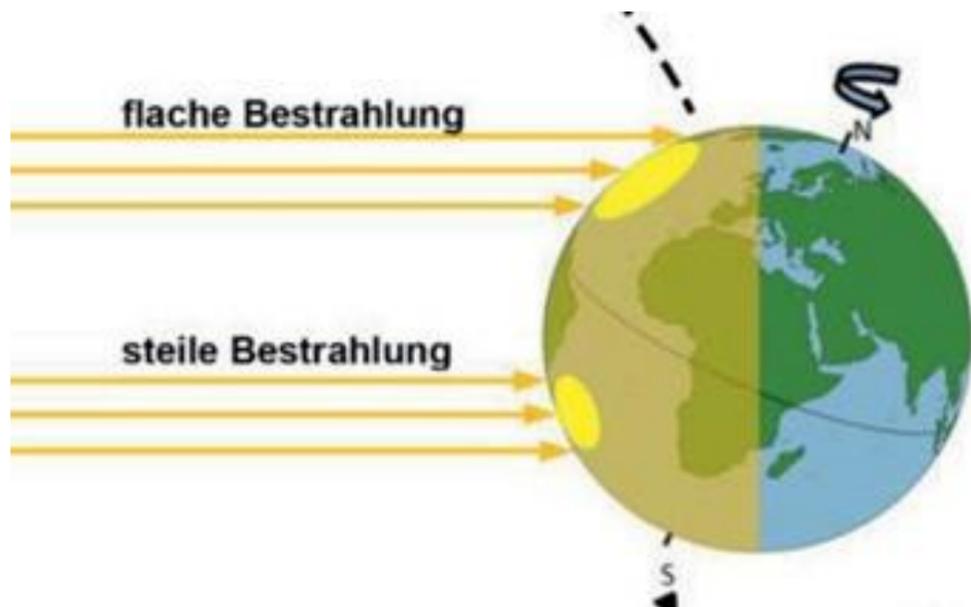


Bei einer Sturmflut erhebt sich das Meer mehrere Meter über den mittleren Wasserspiegel, welcher durch abschmelzende Festland-eismassen immer weiter ansteigt. Solche Extremwetterereignisse werden wegen des Klimawandels immer häufiger. Kurzfristig kann durch eine Erhöhung der Deiche das Land geschützt werden.

Welche Folgen hat eine Verschiebung der Klimazonen?

Hintergrund:

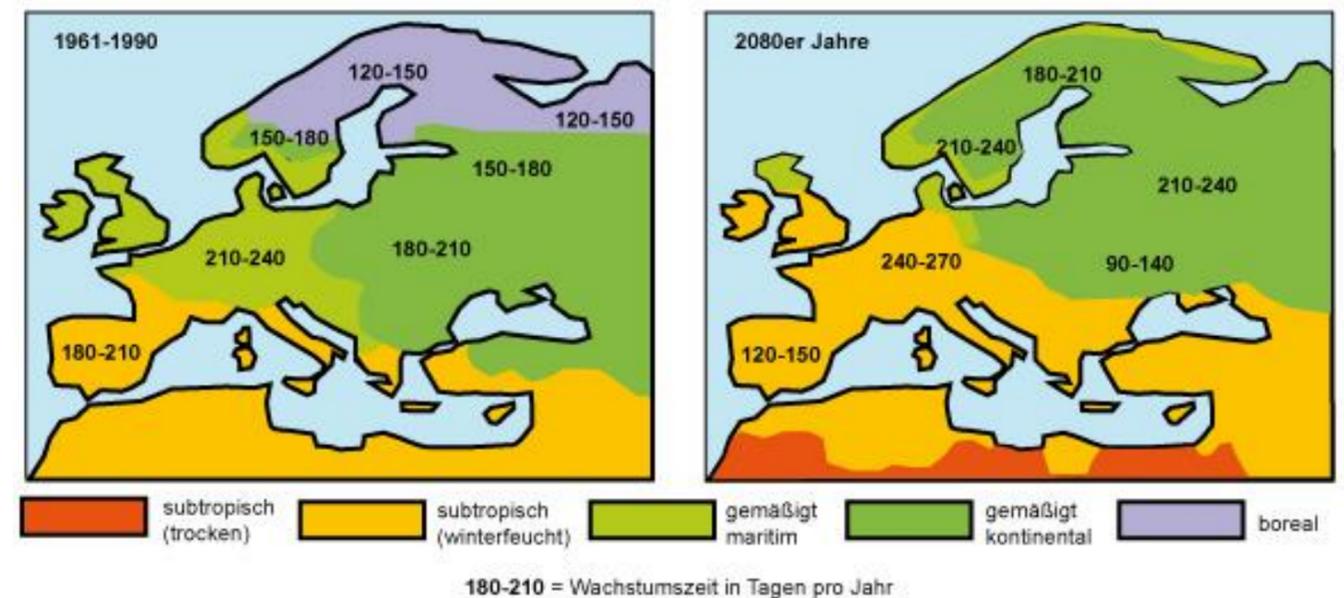
Die Klimazonen der Erde entstehen durch die unterschiedliche Intensität der Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit von der geographischen Breitenlage. In Äquatornähe ist der Einfallswinkel der Sonnenstrahlen ganzjährig relativ hoch und zu bestimmten Zeitpunkten sogar senkrecht zur Erdoberfläche. Mit zunehmender geographischer Breite erreichen die Sonnenstrahlen die Erdoberfläche unter einem immer flacher werdenden Winkel, so dass die eingestrahlte Energie auf eine immer größere Fläche verteilt wird (siehe Abbildung).



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!

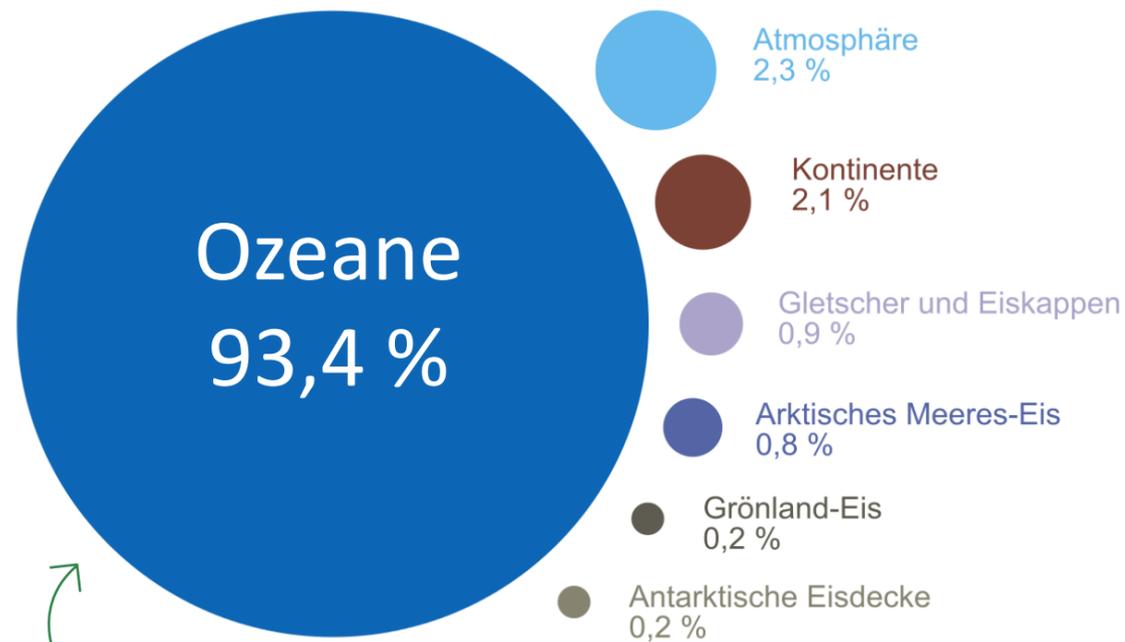
Abbildungsquellen: Verschiebung Klimazonen: bildungserver.hamburg.de; Kastanienblatt oben: Pixabay; Kastanienblatt braun: Wikimedia von Tomroo; Rosskastanienminiermotte: Wikimedia von soebe

Die Jahreszeiten entstehen durch die Neigung der Erdachse von $23,5^\circ$ relativ zur Bahnebene der Erde um die Sonne, der sogenannten Ekliptik. So ist die Nordhalbkugel im Sommer eher zur Sonne hin- und im Winter eher von ihr weggeneigt (in der Abbildung ist Winter auf der Nordhalbkugel).

8. Die Ozeane als Klimapuffer

Wie schützen uns die Ozeane vor einem noch stärkeren Klimawandel?

Wohin fließt die globale Erwärmung?



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

Hintergrund:

Etwa 2/3 der Erdoberfläche sind mit flüssigem Wasser bedeckt und das hat Auswirkungen auf das Erdklima. Denn Wasser ist ein sehr effektiver Wärmespeicher: Eine bestimmte Wassermasse kann deutlich mehr Energie pro Kelvin Temperaturerhöhung aufnehmen als z. B. die gleiche Masse an Luft. So erwärmt sich ein Kilogramm Wasser bei einer Energiezufuhr von 4,2 kJ um 1 K. Wasser hat demnach eine Wärmekapazität von 4,2 kJ/kgK. Luft und trockene Erde hingegen haben eine Wärmekapazität von ca. 1 kJ/kgK. 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, und damit auch den Meeren, zusätzliche Energie zugeführt.

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



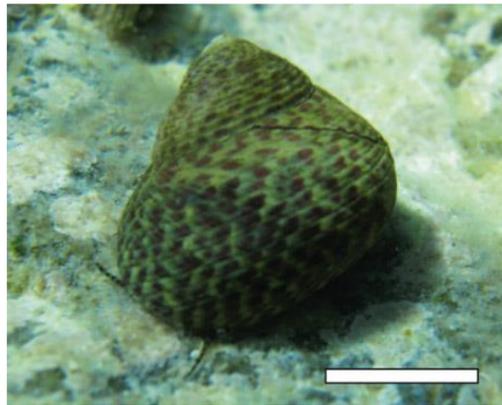
Führt man einem Kilogramm Luft zehn Kilojoule an Energie zu, erwärmt es sich um zehn Kelvin, 1 kg Wasser hingegen nur um 2,3 K!

Die Ozeane entziehen der Atmosphäre aber nicht nur Wärmeenergie, sondern auch CO₂, welches sich im Wasser löst. Die Ozeane puffern so den menschengemachten Treibhauseffekt doppelt ab – jedoch mit schwerwiegenden Folgen!

9. Die Versauerung der Ozeane

Warum werden mit dem Klimawandel auch die Ozeane sauer?

Gepunktetes Schneckenhaus bei einem pH-Wert von 8,2 noch intakt



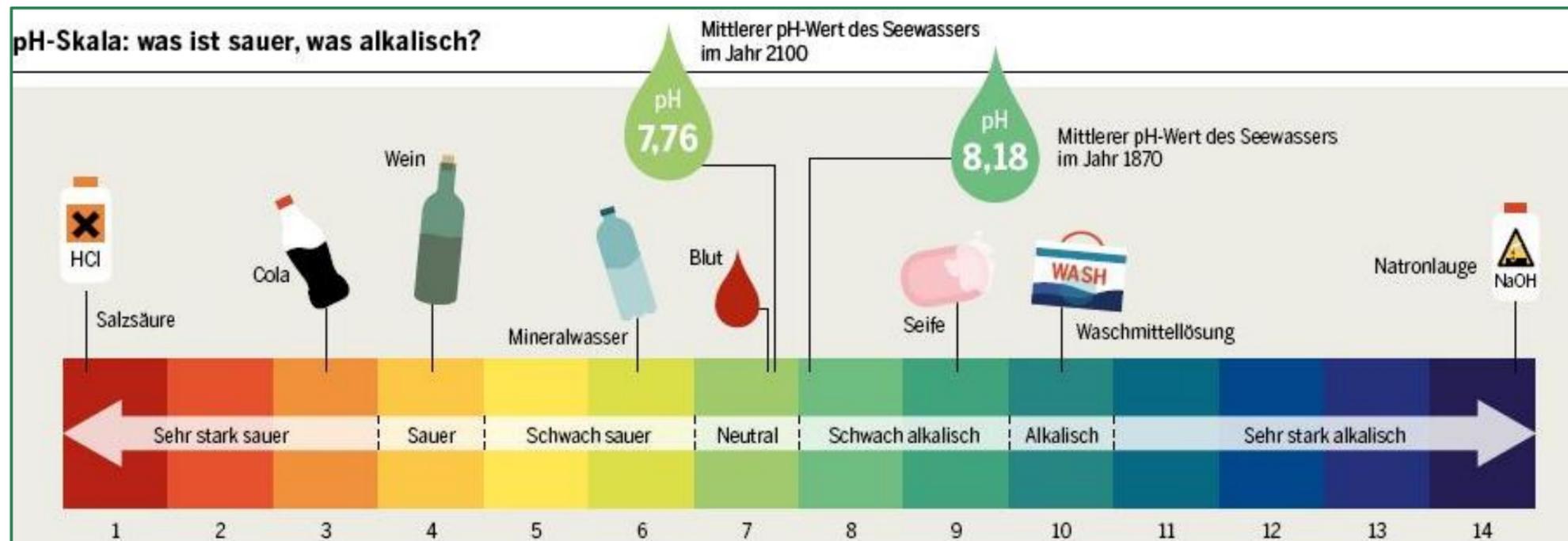
Schneckenhaus bei einem pH-Wert von 7,3 zeigt deutliche Auflösungserscheinungen



Hintergrund:

Messungen des pH-Wertes in den Ozeanen zeigen eine zunehmende Versauerung des Wassers. Steigt in der Erdatmosphäre der Gehalt des Treibhausgases CO_2 (beispielsweise durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe), wird dieses auch vermehrt im Meerwasser gelöst und reagiert dort zu Kohlensäure ($H_2CO_3 + CO_3^{2-} \rightleftharpoons 2 HCO_3^-$). Dies hat fatale Konsequenzen für das Leben dort lebender Algen und Tiere, die an das zunehmend saure Milieu nicht angepasst sind.

Außerdem werden z. B. die Schalen von Kalkalgen dünner (siehe Abb.) und Korallen verlieren ihr Kalkskelett.



Messungen des pH-Wertes in den Ozeanen zeigen eine zunehmende Versauerung des Wassers..

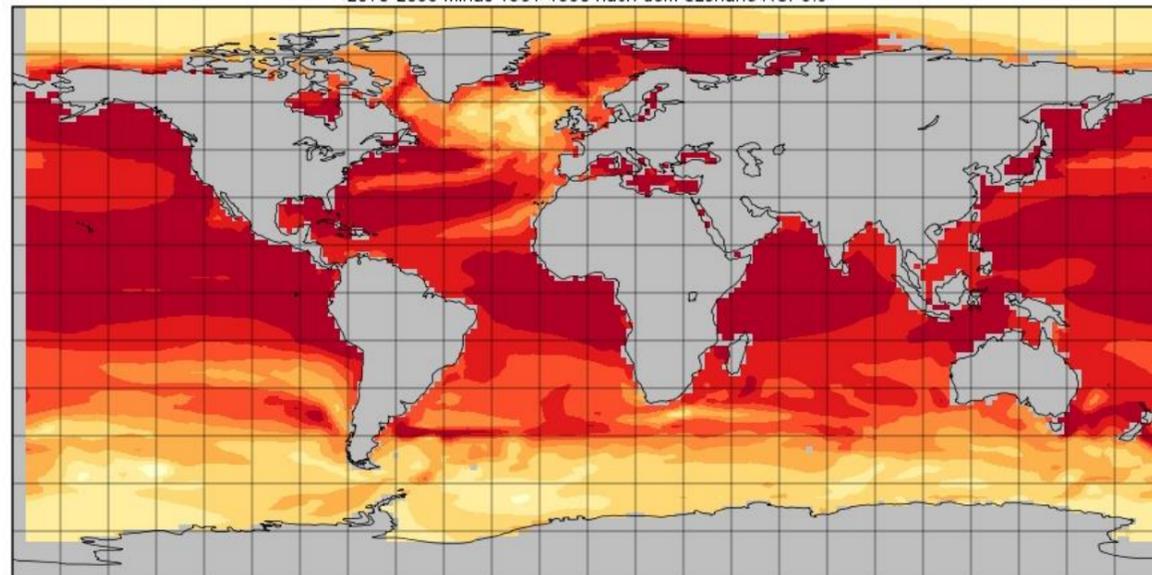


Warum verstärkt eine Erwärmung der Ozeane die globale Erwärmung?

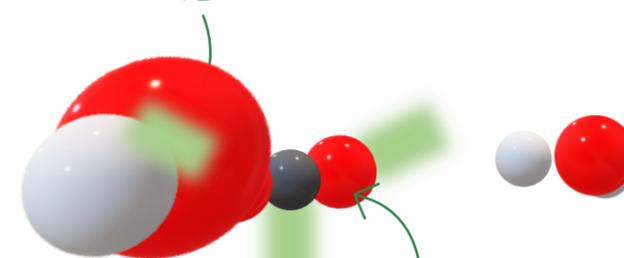
Hintergrund:

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

Veränderung der Meeresoberflächentemperatur im Jahresmittel
2070-2099 minus 1961-1990 nach dem Szenario RCP8.5

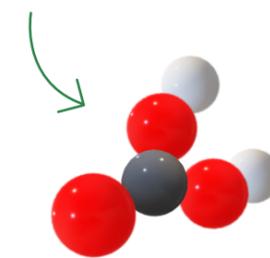


Die CO₂-Moleküle sind nur sehr schwach an H₂O-Moleküle gebunden!



Gelöstes CO₂-Molekül

Ein kleiner Teil der gelösten CO₂-Moleküle reagiert mit Wasser zu Kohlensäure (H₂CO₃)



Bei einer Flasche Mineralwasser kann man beobachten, dass das gelöste CO₂ durch Schütteln oder Wärmezufuhr wieder frei wird!

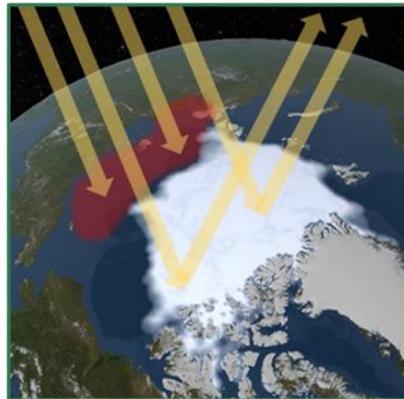
Rückkopplungsprozesse und Teufelskreise

Hintergrund:

Beim „Kippen“ mit einem Stuhl kann man sich, indem man sich an einen Tisch abdrückt, in eine Schiefelage bringen. Drückt man nicht mehr gegen den Tisch, kehrt man wieder in seine Ausgangsposition zurück. Doch wehe man stößt sich einmal auch nur ein kleines bisschen zu viel ab... Das Klimasystem der Erde verhält sich leider ähnlich und könnte in naher Zukunft, wenn auch nur eine Gigatonne zu viel an Treibhausgasen ausgestoßen wird, unwiderruflich kippen



Abschmelzende Eisflächen



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

Permafrost



In ihm sind Jahrtausende alte Kohlenstoff- und Methanablagerungen eingefroren.

Methanhydrate in den Ozeanen



Bis zu einigen Tausend Gigatonnen in Ozeansedimenten am Meeresboden.

Wasserdampf



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

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

12. Kipppunkte: Achillesferse im Klimasystem

Hintergrund:

Das globale Klimasystem der Erde wird durch die Wechselwirkung zwischen den Hauptbestandteilen des Klimasystems bestimmt: **Hydrosphäre** (Wasser), **Atmosphäre** (Luft), **Kryosphäre** (Eis und Schnee), **Pedosphäre** (Böden), **Lithosphäre** (Gestein) und die **Biosphäre** (Lebewesen). Die globale Erderwärmung setzt Prozesse in Gang, die diese unterschiedlichen Elemente auf verschiedene Arten beeinflussen und verändern. Einige dieser Prozesse sind selbstverstärkend: So führt z.B. die globale Erwärmung zur mehr Verdunstung von Wasser; und da Wasserdampf ein Treibhausgas ist, erhöht sich dadurch die Temperatur der Atmosphäre, was wiederum zu vermehrter Wasserverdunstung führt.



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!



Wegen dieser selbstverstärkenden Rückkopplungsprozesse kann das Erdklimasystem, wenn eine bestimmte Schwelle überschritten wird, in den unkontrollierbaren Zustand einer Heißzeit übergehen. Man spricht von einem Kipppunkt. „Kippen“ bedeutet dann, dass diese Veränderungen, da sie sich selbst immer mehr verstärken, dann weder aufzuhalten noch rückgängig zu machen sein werden. Die Umweltauswirkungen der Kipppunkte sind weitreichend und könnten die Lebensgrundlagen vieler Millionen Menschen gefährden.