

Was wissen wir über das Klima?

Die Funktionsweise von Wetter und Klima

Die Strahlungsbilanz der Erde

Die Treibhauswirkung der Atmosphäre

Motivation / Gesamtfazit

Warum das Thema Klimawandel bei W+W

1/3

- Der Klimawandel ist weltweit in aller Munde. Wissenschaftler versuchen, das Klima zu verstehen und künftige Klimaveränderungen vorherzusagen.
- Die meisten stufen die Folgen dieser Veränderungen als bedrohlich für Mensch und Natur ein und fordern Regierungen auf, entsprechende Gegenmaßnahmen zu ergreifen.
- Die Politiker reagieren mit weltweiten Klimaabkommen mit Selbstverpflichtungen, die hauptsächlich darauf abzielen, den Ausstoß des Treibhausgases CO₂ zu verringern.
- Es gibt aber auch andere Stimmen, die die Aussagen des IPCC (Weltklimarat) kritisieren, den menschengemachten Anteil am Klimawandel anzweifeln oder die Klimamaßnahmen als ungeeignet bzw. schädlich einschätzen.
- Wort und Wissen wird immer wieder gefragt, zu diesem Themenkomplex eine Stellungnahme herauszugeben. Typische Fragen sind:
 - Welche Klimafakten sind unumstößlich und wo fängt die subjektive Interpretation an?
 - Findet Klimawandel über natürliche Klimaschwankungen hinaus statt?
 - Inwieweit ist der Mensch für den aktuell wahrgenommenen Klimawandel verantwortlich?
 - Sind die IPCC-Berichte wissenschaftlich fundiert und objektiv?
 - Wie zuverlässig sind Klimavorhersagen?

Motivation / Gesamtfazit

Warum das Thema Klimawandel bei W+W

2/3

- Zur Beantwortung dieser Fragen hat Wort und Wissen eine Klima-Arbeitsgruppe ins Leben gerufen.
- Diese Arbeitsgruppe, die **W+W KlimaAG**, hat sich der Herausforderung gestellt, auf diese Fragen möglichst neutrale, wissenschaftlich fundierte Antworten zu finden.
- Dies ist in der Tat eine große Herausforderung, da das Thema wissenschaftlich hochkomplex und dazu politisch und emotional sehr geladen ist.
- Das Klima wird von vielen Faktoren beeinflusst, die nichtlinear miteinander interagieren. Dies heißt nicht, dass das Klima nicht verstanden werden kann, aber es hat zur Folge, dass vereinfachte Betrachtungen schnell in die Irre führen können.
- Fast jeder hat zu dem Thema Klimawandel eine Meinung, aber zu oft beruht diese nicht auf wissenschaftlich fundierte Informationen, sondern auf persönliche Überzeugungen, die durch Darstellungen in den Medien gespeist werden.
- Im Internet kann man ungefiltert die unterschiedlichsten Meinungen zum Thema Klimawandel mit Überzeugung dargestellt finden von „Die Welt geht morgen unter“ bis „Es gibt keinen Klimawandel“.
- Ziel und Hoffnung der **W+W KlimaAG** ist es, hier eine solide Orientierungshilfe zu sein.

- Die **W+W KlimaAG** hat ihre Ergebnisse in mehreren Präsentationen zusammengefasst und stellt diese online zu Verfügung, siehe die Übersicht auf der nächsten Seite.
- Diese Ergebnisse sollen helfen, die eigentlichen Fakten zu erkennen, Falschaussagen zu entlarven und eine möglichst objektive Sicht auf das Thema Klimawandel zu bekommen.
- Allgemeine Begriffserklärungen und Verweise:
 - **Wetter und Klima**
Wetter beschreibt den *momentanen Zustand der Atmosphäre* (z.B. Temperatur, Druck, Dichte, Wind).
Klima ist per Definition der *30-Jahre Durchschnitt* des atmosphärischen Zustandes.
 - **Globales Klima**
Es gibt verschiedene Klimazonen, *das über die Erde gemittelte Klima* wird als **globales Klima** bezeichnet.
 - **Klimaerwärmung**
Genau genommen kann sich das Klima nicht erwärmen, sondern: *Die globale Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche nimmt zu und infolgedessen die thermische Energie der Erdatmosphäre.*
In diesem Sinne wird der inzwischen gängige Begriff **Klimaerwärmung** in den Ergebnispräsentationen der **W+W KlimaAG** verwendet.
 - **IPCC AR6** Verweise beziehen sich auf den 6. Sachstandbericht der Arbeitsgruppe 1 des Weltklimarats:
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf

Motivation / Gesamtfazit

Klimawandel findet statt – kein Grund zur Panik

- Das Klima wandelt sich im Laufe der Zeit aufgrund bekannter natürlicher Einflussfaktoren
- Die Vergangenheit zeigt: Die Erde verkraftet erhebliche Klimaschwankungen
- Globaler Temperaturanstieg hat Vor- und Nachteile, Weltuntergangsstimmung ist nicht angebracht
- Der aktuell beobachtete schnelle Klimawandel ist maßgeblich vom Menschen mit verursacht
- Weitere Forschung ist notwendig, z.B. um Wolkenbildung und CO₂-Senken besser zu verstehen
- Es ist sehr fragwürdig, ob der Mensch das Klima kontrollieren und bestimmen kann
- CO₂-Reduktion um jeden Preis ist weder technisch noch wirtschaftlich umsetzbar
- Beidseitige starke Lobbys verzerren wissenschaftliche Ergebnisse und kapern die Klimadebatte
- Folglich ist es unrealistisch zu erwarten, dass Klimaziele politisch umgesetzt werden
- Viel sinnvoller ist es, Industrie und Wirtschaft nachhaltig an Klimaveränderungen anzugleichen
- Verantwortungsvolles Handeln ist angebracht, auch unabhängig vom Klimawandel
- Klimarettung oder Leugnung des Klimawandels wird für viele zur Ersatzreligion
- Christen haben den Auftrag, als Hoffnungsträger auf den einzig wahren Retter hinzuweisen

Ergebnisdokumentation der W+W KlimaAG

Online verfügbar unter www.wort-und-wissen.org/artikel/klimawandel

W+W KlimaAG - Übersichtspräsentation.pdf

W+W KlimaAG - Bekannte Klimafakten.pdf

W+W KlimaAG - Ursachen Klimawandel.pdf

W+W KlimaAG - Unsere Verantwortung.pdf

W+W KlimaAG - Klimamodellierung.pdf

W+W KlimaAG - Temperaturrekonstruktion.pdf

W+W KlimaAG - IPCC, der Weltklimarat.pdf

Inhaltsaufgabe

- Wetter, Klima und Atmosphäre
- Die Strahlungsbilanz der Erde
- Die Wirkungsweise von Treibhausgasen
- Anzeichen für eine Erderwärmung
- Zusammenfassung

Inhaltsaufgabe

- Wetter, Klima und Atmosphäre
 - Die Strahlungsbilanz der Erde
 - Die Wirkungsweise von Treibhausgasen
 - Anzeichen für eine Erderwärmung
 - Zusammenfassung

Die Funktionsweise des Wetters

- Wetter und Klima sind vielseitige Phänomene.
- Das System aus Sonne, Ozeanen, Landmassen und Atmosphäre wird von vielen miteinander wechselwirkenden Prozessen bestimmt.
- Zum Verständnis von Wetter und Klima sind wichtig:
 - Aufbau der Atmosphäre
 - Strahlungsbilanz der Erde
 - Großräumige Zirkulation der Atmosphäre
 - Entstehung und Dynamik von Wolken
 - Wirkungsweise von Treibhausgasen

Grundlagen zu Wetter und Klima



Die Funktionsweise des Wetters

Grundbegriffe

- Die Temperatur T ist ein Maß für die mittlere Geschwindigkeit der Moleküle in einem Gas.
- Die Temperatur hat die Einheit °C (Celsius) oder K (Kelvin), wobei gilt: $T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$.
- Die Dichte ρ ist die Masse einer Volumeneinheit des Gases und hat folglich die Einheit kg/m^3 .
- Die Temperatur T eines Gases ist physikalisch mit seiner Dichte ρ verknüpft:
 - Je höher die Temperatur eines Gases ist, desto schneller bewegen sich die Moleküle.
 - Dadurch erhöht sich der mittlere Abstand der Moleküle untereinander, d.h. die Dichte wird geringer.
- Luft ist ein Gas, bestehend aus einer Mischung verschiedener Moleküle.
- Durch die Bewegung der Moleküle übt ein Gas Druck aus.
- Der Luftdruck beschreibt, welche Kraft Luft auf eine Einheitsfläche ausübt und wird in der Einheit Pascal $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$ angegeben.
- Der Gasdruck ist um so höher, je höher die Temperatur und je höher die Dichte des Gases.
- Dieser Zusammenhang wird auf der nächsten Seite näher beschrieben.

Die Funktionsweise des Wetters

Zustandsgleichung

- Die Zustandsgleichung* eines idealen Gases** verknüpft den Druck mit Dichte und Temperatur:

$$p_d = \rho_d R_d T$$

- R_d ist die spezifische Gaskonstante, welche vom jeweiligen Gas abhängt und d steht für „dry“ (trocken).
- Die obige Zustandsgleichung bezieht sich folglich auf eine trockene Erdatmosphäre, also ohne Wasserdampf.
- Um die feuchte Erdatmosphäre zu beschreiben, wird zusätzlich zum Luftdruck p_d der Dampfdruck e verwendet. Dieser gibt den Druck von Wasserdampf an und wird mit v indiziert „vapour“ (Dampf):

$$e = \rho_v R_v T$$

- Nach dem Gesetz von Dalton ist der Gesamtgasdruck p die Summe der Partialdrücke p_d und e

$$p = p_d + e = (\rho_v R_v + \rho_d R_d) T$$

* Eine Zustandsgleichung beschreibt den Zusammenhang verschiedener sogenannter Zustandsgrößen eines Systems, in diesem Fall Temperatur, Dichte und Druck.

** Das Modell des "idealen Gases" beschreibt ein Gas, in dem die Teilchen als Punkte (also Kugeln ohne Durchmesser) betrachtet werden, die nur durch elastische Stöße (analog zu Billardkugeln) miteinander wechselwirken. Die Erdatmosphäre kann in sehr guter Näherung als ideales Gas beschrieben werden.

Die Funktionsweise des Wetters

Wasserdampf

- Luft kann bei einer gegebenen Temperatur T_0 und einer gegebenen Druck p_0 nur eine bestimmte Menge Wasserdampf aufnehmen.
- Der Dampfdruck e , bei dem die maximale Wassermenge erreicht ist, wird als Sättigungsdampfdruck über Wasser bei der Temperatur T_0 bezeichnet, $e_s(T_0)$.
- Mit Hilfe dieser Größen können nun die **spezifische** und **relative Feuchte** definiert werden.
- Die **spezifische Feuchte** q ist der Quotient der Dichten für trockene Luft ρ_d und Wasserdampf ρ_v

$$q = \rho_v / \rho_d$$

- Die **relative Feuchte** f hingegen ist ein Maß für den Sättigungsgrad feuchter Luft, also der Quotient aus dem aktuellen Dampfdruck und dem Sättigungsdampfdruck über Wasser

$$f = e / e_s$$

- Da e_s temperaturabhängig ist, gilt für eine bestimmte Temperatur τ , auch Taupunkt genannt, dass die relative Feuchte 1 ist, bzw. 100% beträgt. Der Taupunkt ist jedoch kein fester Temperaturwert, weil er vom Luftdruck abhängt.



Die Funktionsweise des Wetters



Foto von [Andy Watkins](#) auf [Unsplash](#)

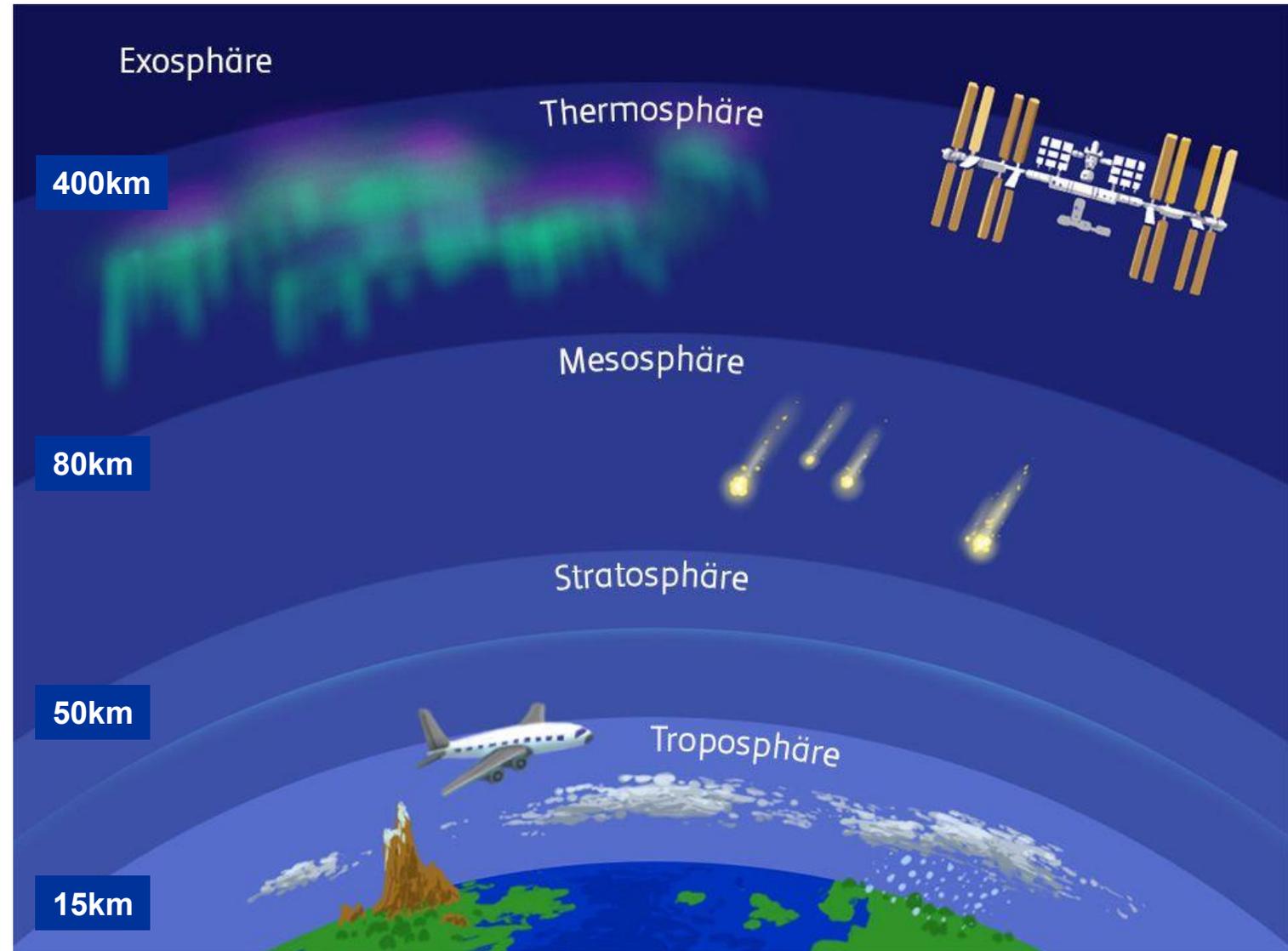
Wetterprognose

- In operationellen Wettervorhersagezentren wie dem Deutschen Wetterdienst (DWD) werden mit numerischen Wettermodellen täglich Vorhersagen für Druck, Temperatur, relative Feuchte u.a. erstellt.
- Diese Vorhersagen reichen je nach Modelllauf von wenigen Stunden bis hin zu mehreren Wochen in die Zukunft und werden für eine Vielzahl von geographischen Punkten berechnet.
- Dies steht im Kontrast zu Klimaprognosen, bei denen nicht der Zustand des Wetters an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit berechnet werden soll, sondern die Statistik über diese Wetterzustände in der Zukunft.
- Die Präsentation „W+W KlimaAG – Klimamodellierung.pdf“ beschreibt die Wirkungsweise von Prognosemodellen für Wetter und Klima.

Die Erdatmosphäre

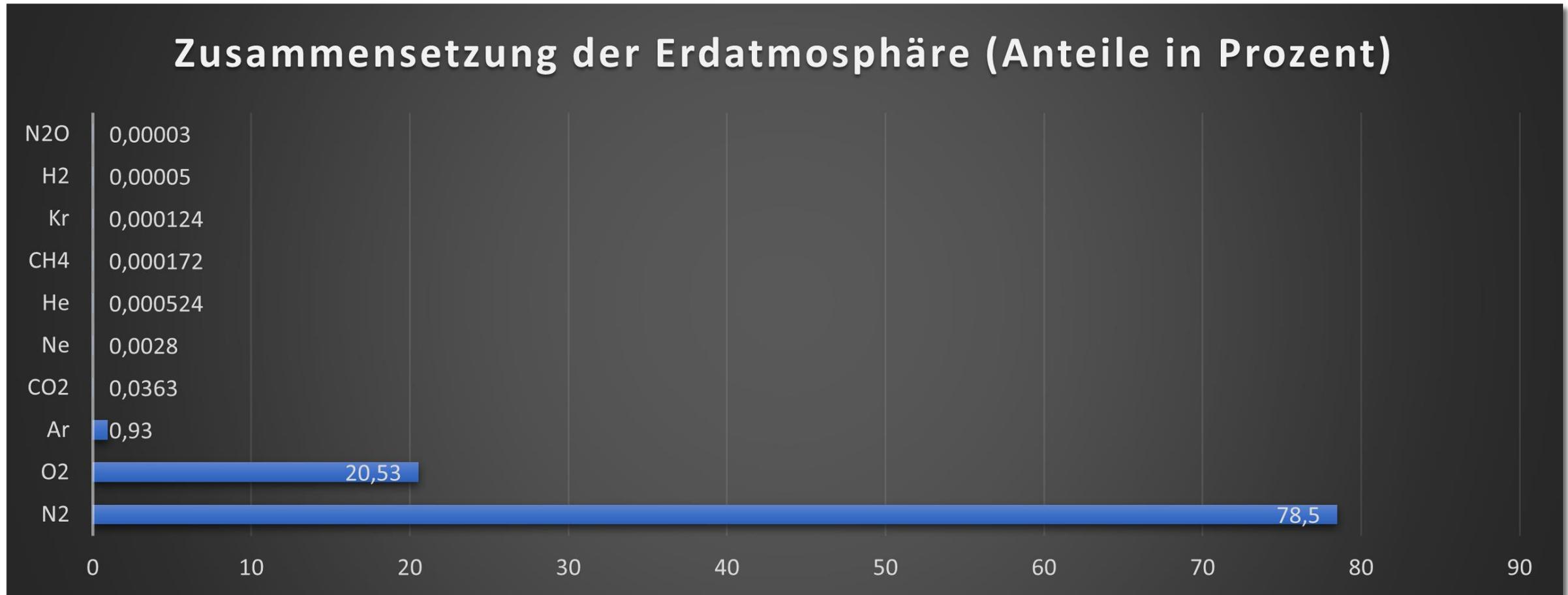
- Die Erdatmosphäre besteht aus unterschiedlichen Schichten und ist insgesamt über 400 km dick, siehe Bild.
- Die für das Wetter relevanten Prozesse spielen sich vorwiegend in der Troposphäre ab, die abhängig vom Breitengrad zwischen 8 km und 18 km dick ist.
- In der Stratosphäre befindet sich die Ozonschicht, welche die hochenergetischen, für das Leben schädlichen Anteile der solaren UV-Strahlung abhält.

Aufbau in Sphären



Die Erdatmosphäre

Chemische Zusammensetzung



Zusammensetzung der Erdatmosphäre. Die Anteile der Spurengase sind links angegeben (Eigene Darstellung).

Die Erdatmosphäre

Chemische Zusammenstellung

- Die Hauptbestandteile der Troposphäre sind Stickstoff mit 78,5% und Sauerstoff mit 20,53%.
- Wasserdampf hat einen flexiblen Anteil, der von 0% bis 4% variieren kann.
- Argon macht 0,93% aus und alle anderen Bestandteile zusammen ergeben weniger als 0,1%.
- Wichtig in Zusammenhang mit dem Klima sind diese anderen Bestandteile, die Spurengase.
- Einige der Spurengase in der Atmosphäre sind sogenannte Treibhausgase.
- Dazu zählen Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und andere Stickoxide.
- Auch Wasserdampf (H₂O) ist ein wichtiges Treibhausgas, allerdings kein Spurengas.
- Manche Treibhausgase haben nicht ausschließlich natürlichen, sondern auch anthropogenen Ursprung, d.h. ihr Gehalt in der Atmosphäre erhöht sich durch menschliches Zutun.
- Neben den natürlich vorkommenden Treibhausgasen gibt es Treibhausgase, die *nur* durch den Menschen dorthin gelangt sind. Ein Beispiel dafür sind Fluor-Chlor-Kohlen-(Wasser-)Stoffe.

Die Erdatmosphäre

Globale Zirkulation – Einführung

- Für Wetter und Klima spielt die globale atmosphärische Zirkulation eine große Rolle, insbesondere in meridionaler Richtung, d.h. zwischen dem Äquator und den Polen.
- Angetrieben wird die atmosphärische Zirkulation vom Energieüberschuss am Äquator, da dort die Sonneneinstrahlung am stärksten ist.
- Die Zirkulation entsteht, um dieses Ungleichgewicht auszugleichen.
- Für eine nicht rotierende Erde bestünde diese Zirkulation aus einer Zelle* pro Halbkugel, s. Abbildung auf der nächsten Seite.
- Am Äquator wird die Luft durch die Sonneneinstrahlung erwärmt, die dort stärker ist als bei höheren Breitengraden.
- Die warme Luft hat eine geringere Dichte und steigt auf, es bildet sich ein Tiefdruckgebiet, in dem durch die Abkühlung beim Aufsteigen Wolken entstehen und es vermehrt zu Regenfällen kommt.
- Entlang der Tropopause (die Grenze zwischen Troposphäre und Stratosphäre) strömt die warme Luft zu den Polen. Dabei kühlt sie ab und sinkt über den Polen ab, dort entsteht ein Hochdruckgebiet.
- Durch die Erwärmung beim Absinken kann die Luft dann wieder mehr Wasserdampf aufnehmen.

* Als Zelle wird in der globalen Zirkulation ein System bezeichnet, in welchem die Luft eine geschlossene Bewegung ausführt, oder einfacher gesagt: im Kreis strömt.

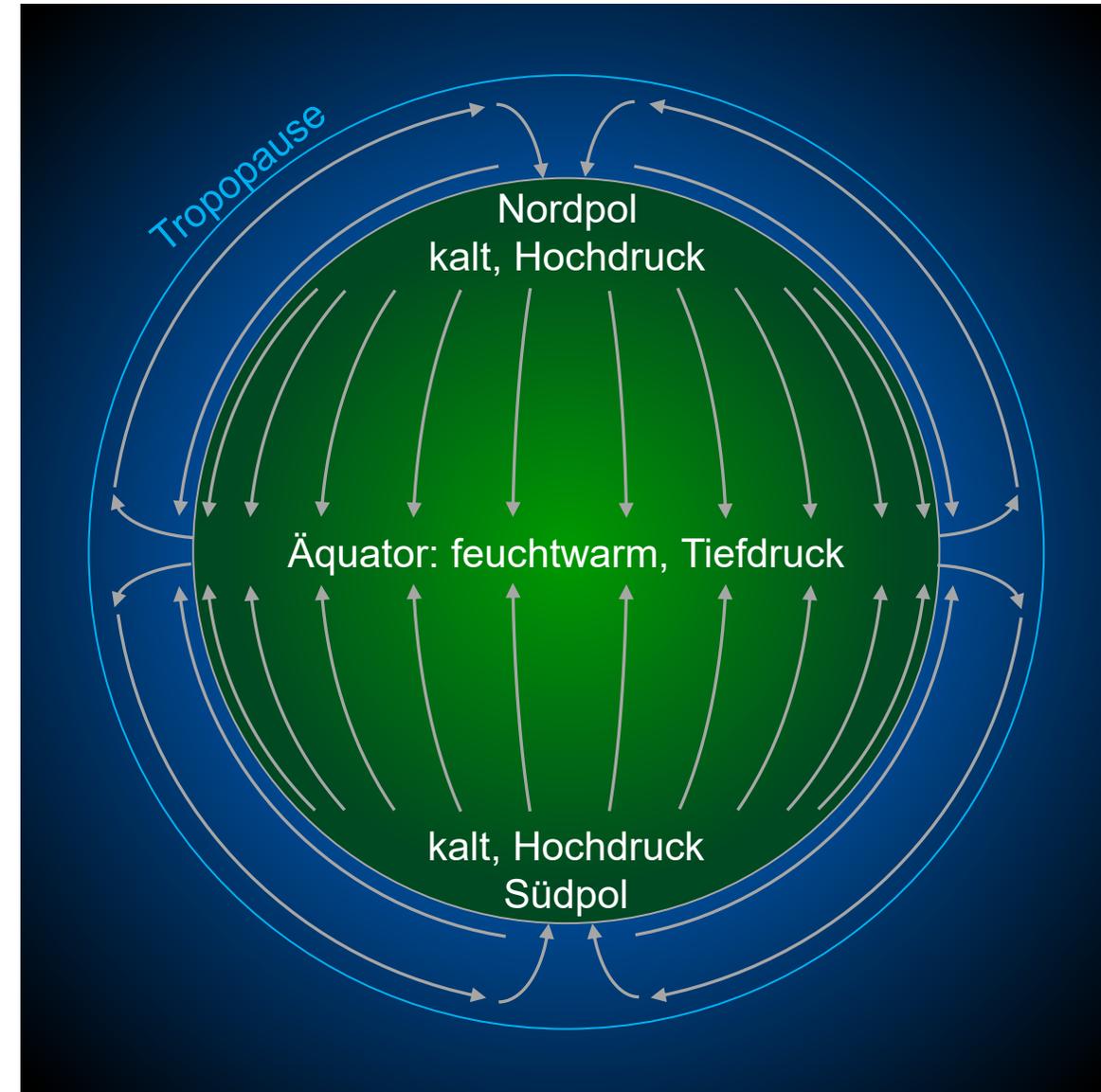
Die Erdatmosphäre

Globale Zirkulation – Einfaches Modell

Modell der globalen Zirkulation ohne Rotation der Erde

Am Äquator steigt erwärmte Luft auf und bewegt sich entlang der Tropopause in Richtung der Pole. Dabei kühlt sie ab.

An den Polen sinkt die kalte Luft ab und strömt in der unteren Atmosphäre vom Hochdruckgebiet im Polarbereich zurück zum Tiefdruckgebiet am Äquator.



Die Erdatmosphäre

Globale Zirkulation – Drei-Zellen-Modell

1/2

- Aufgrund der Erdrotation werden die Luftmassen auf ihrem Weg zu den Polen abgelenkt, was zu komplexeren Zirkulationssystemen führt.
- Die Strömungen in der Atmosphäre können mit einem Modell, das drei Zellen pro Hemisphäre annimmt, näherungsweise beschrieben werden, siehe Abbildung auf der nächsten Seite.
- Die Hadley-Zelle beginnt am Äquator, wo die von der Sonne erhitzten Luftmassen aufsteigen. So entsteht die äquatoriale regenreiche Tiefdruckrinne.
- Die Luftmassen, die dann in Richtung der Pole strömen, werden durch die Erdrotation nach Osten abgelenkt. Zwischen dem 25. und dem 35. Breitengrad sinken sie wieder ab, wodurch der subtropische Hochdruckgürtel entsteht.
- Die Polarzelle befindet sich, wie der Name verrät, in den polaren Regionen der Erde. Über den Polen kühlen die Luftmassen ab und werden somit dichter; das polare Hochdruckgebiet entsteht.
- Am Boden strömen die Luftmassen auseinander, wobei sie durch die Erdrotation wieder nach Osten abgelenkt werden.
- Da die Luft über den Polen absinkt, strömt in etwa 10 km Höhe Luft aus niedrigeren Breiten nach.
- Zwischen der Polar- und der Hadley-Zelle, also etwa zwischen dem 30. und dem 60. Breitengrad stellt sich die Ferrel-Zelle als Zirkulationsmuster ein.

Die Erdatmosphäre

Globale Zirkulation – Jetstreams

- An den Stellen, an denen Zirkulationszellen in der oberen Troposphäre aufeinandertreffen, entstehen Jetstreams. Sie ziehen sich als Starkwindbänder über mehrere Tausend Kilometer Länge, sind einige Hundert Kilometer breit und mehrere Kilometer hoch.
- Die Luft in einem Jetstream strömt nicht überall gleich schnell, kann aber Geschwindigkeiten von über 100 m/s erreichen.
- Wie auf der vorherigen Seite illustriert, gibt es zwei Jetstreams, den subtropischen Jetstream und den Polarfront-Jetstream.
 - Der subtropische Jet ist nahezu konstant bei einer Breite von 30° in einer Höhe von etwa 10 km bis 11 km.
 - Der Polarfront-Jetstream strömt auf einer Höhe von 10 km. Seine Ursache liegt in den großen Temperaturunterschieden zwischen subtropischen und subpolaren Luftmassen.
- Ein Jetstream verläuft nicht geradlinig auf Höhe eines bestimmten Breitengrades, sondern weicht in einer Art Wellenform deutlich nach Süden und Norden ab, was den Temperatur- und somit den Energieunterschied zwischen subpolaren und subtropischen Regionen ausgleicht.
- In diese wellenförmigen Strömungen sind die Hoch- und Tiefdruckgebiete der mittleren Breiten, und damit auch über Europa, eingebettet.

Der Unterschied zwischen Wetter und Klima

Definitionen

- Das Wetter an einem bestimmten Tag wird durch den lokalen Zustand der Atmosphäre bestimmt.
- Dabei sind die Größen Druck, Temperatur und Dichte und die globale Zirkulation von wesentlicher Bedeutung, sowie der Zustand der Atmosphäre an den Tagen davor.
- Wenn es z.B. in Dresden am 23. Juli 30°C warm war, wird es am nächsten Tag wohl kaum schneien.
- Beim Klima hingegen geht es um eine Langzeitstatistik der atmosphärischen Zustände. Dabei werden die Grundvariablen Druck, Temperatur und Dichte, die Zusammensetzung der Atmosphäre und die globale Zirkulation über lange Zeiträume betrachtet, und zwar über 30 Jahre hinweg.
- Diese Zeitspanne von 30 Jahren wird als klimatologische Referenzperiode bezeichnet, wobei auch immer der Zeitraum festgelegt wird. Aktuell wird der Zeitraum von 1991 bis 2020 verwendet.
- Für Klimaänderungen können durchaus kleine Änderungen der Grundvariablen relevant sein, insbesondere dann, wenn es um die Klimaänderung an einem Ort geht.
- Allerdings fällt eine lokale Änderung der Temperatur an einem Stichtag, z.B. am 23. Juli in Dresden, nicht ins Gewicht für die Entwicklung der mittleren globalen Temperatur über 30 Jahre hinweg.

Der Unterschied zwischen Wetter und Klima

Definition von Klimawandel

- Für einen spezifischen Punkt bedeutet Klimawandel die Änderung einer statistischen Verteilung.
- Für die gesamte Atmosphäre kann es zusätzlich systematische Änderungen in Zirkulationsmustern bedeuten.
- Abgesehen davon müssen für eine Langzeitstatistik des Wetters auch Phänomene in Betracht gezogen werden, die sich auf einer größeren Zeitskala ändern als die Grundvariablen.
- In diesem Zusammenhang spielen systematische Änderungen der globalen Zirkulation, der Sonneneinstrahlung oder der prozentualen Anteile der Treibhausgase in der Atmosphäre eine Rolle.
 - Beispielsweise können sich die Meeresströmungen oder die atmosphärische Zirkulation über Jahrzehnte hinweg langsam verändern. Das ist für die Wettervorhersage am nächsten Tag nicht ausschlaggebend, wohl aber für die Statistik des Wetters über Jahrzehnte hinweg und damit für das Klima.
- Die Wetterstatistiken zu analysieren, zu modellieren oder zu prognostizieren wird dadurch sehr vielschichtig, da unterschiedliche Vorgänge sich gegenseitig beeinflussen oder bedingen können.
 - So kann z.B. eine Erwärmung in den polaren Regionen dazu führen, dass dort der Schnee schmilzt. Dies verändert die Eigenschaften der Oberfläche und reduziert das Rückstrahlvermögen (Albedo). Eine Verringerung der Albedo bedeutet, dass mehr solare Strahlung absorbiert wird, was die Erwärmung der Oberfläche beschleunigt (nicht-linearer Feedback-Effekt).

Der Unterschied zwischen Wetter und Klima

Feedback-Effekte

- Verstärkende Effekte wie das Albedo-Beispiel auf der vorherigen Seite heißen positive Feedback-Effekte. Negative Feedback-Effekte hingegen wirken ihrer Ursache entgegen.
- Ein Beispiel für einen negativen Feedback-Effekt ist die vermehrte Entstehung von Wolken bei höherer Temperatur, da dann mehr Wasser verdunstet. Mehr Wolken bedeutet, dass weniger Sonneneinstrahlung direkt auf die Oberfläche gelangt – die Erwärmung wird dann tagsüber abgeschwächt.
- Wolken rufen nicht zwangsläufig negative Feedback-Effekte hervor. Beispielsweise verhindern Wolken nachts die Ausstrahlung der Erde, was ein positives Feedback entspricht.
- Insgesamt ist zurzeit unklar, wie Wolkenbildung und Wolkenwirkung insgesamt von der Klimaveränderung beeinflusst werden und ob Wolken global ein positives oder negatives Feedback haben.
- Im aktuellsten Report des Weltklimarats* wird netto von einem leichten positiven Feedback durch veränderter Wolkenbildung ausgegangen, allerdings ist weitere Forschung notwendig.

* IPCC Assessment Report 6, The Physical Science Basis, p. 95, Zitat:

The net cloud feedback is assessed to be $+0.42$ $[-0.10$ to $0.94]$ $W m^{-2} °C^{-1}$. A net negative cloud feedback is *very unlikely*.

Der Unterschied zwischen Wetter und Klima

Klima- vs. Wetterprognose

- Als Fazit ist festzuhalten, dass für Klimaprognosen Komponenten und Effekte zu beachten sind, die bei einer Wettervorhersage vernachlässigt werden können, z.B. die in Jahren bis Dekaden wiederkehrende großräumige Variabilitätsmuster in der Atmosphäre und den Ozeanen.
- Es werden zwar auch in Klimamodellen die Grundvariablen wie Temperatur, Druck und Dichte berechnet, jedoch gemittelt über längere Zeiträume und geographisch größere Regionen.
- Außerdem werden zusätzlich unterschiedliche Szenarien in Betracht gezogen, wie z.B. die Bevölkerungsentwicklung, die Weltwirtschaftsentwicklung, die Einhaltung von Abkommen zur Treibgasreduktion.
- Diese wirken sich alle auf die Emissionsentwicklung und damit auf die Zusammensetzung der Atmosphäre aus, können aber selbst nicht durch physikalische Gleichungen bestimmt werden.

Inhaltsaufgabe

- Wetter, Klima und Atmosphäre
- **Die Strahlungsbilanz der Erde**
- Die Wirkungsweise von Treibhausgasen
- Anzeichen für eine Erderwärmung
- Zusammenfassung

Die Strahlungsbilanz der Erde

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz

- Die Strahlungsbilanz der Erde beschreibt die Wechselwirkung zwischen der Sonneneinstrahlung auf die Erde und die Wärmeausstrahlung der Erde.
- Zum Verständnis dieser Strahlungsbilanz werden einige thermodynamische Begriffe eingeführt.
- Das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen emittierter Strahlung eines schwarzen Körpers* und seiner Temperatur:

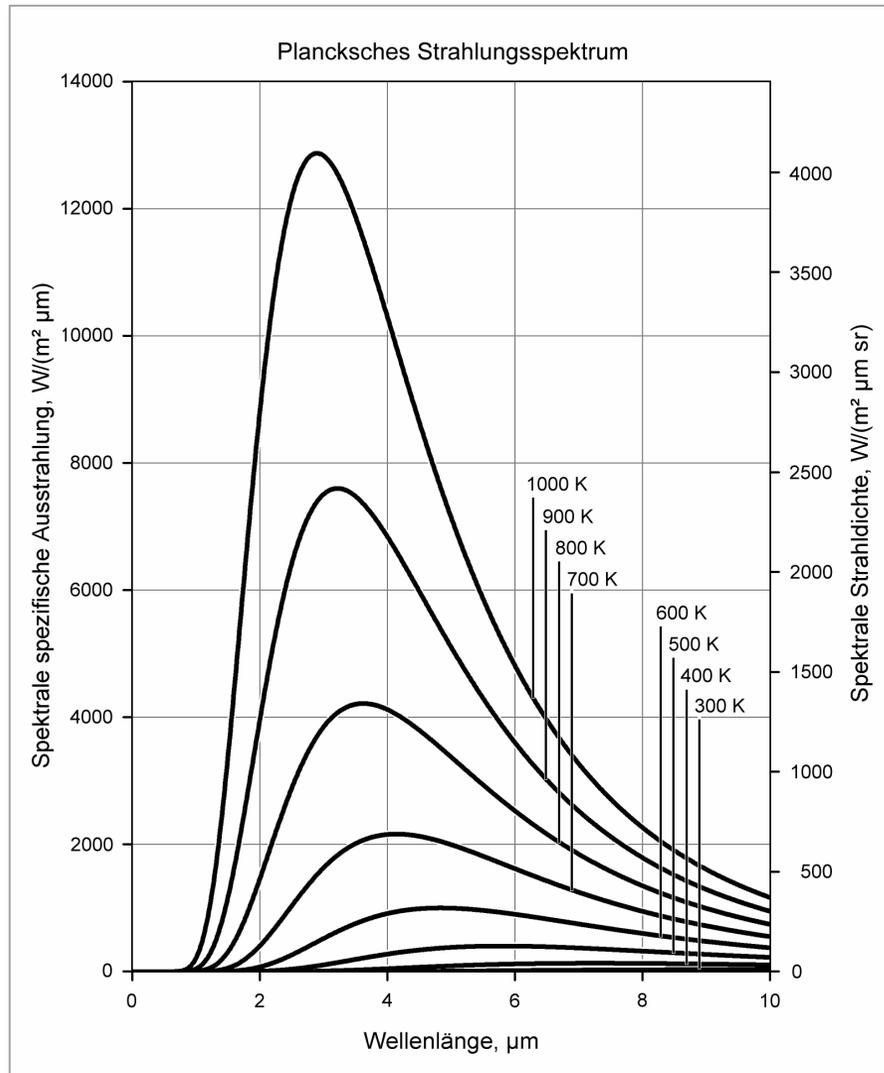
$$L = \sigma T^4$$

- Hierbei ist L die Strahlung in W/m^2 , $\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}^4$ die Stefan-Boltzmann-Konstante und T die Temperatur in K.
- Dieses Gesetz gilt für jeden schwarzen Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes.

* Ein „schwarzer Körper“ ist ein idealisiertes physikalisches Modell für ein strahlendes Objekt. Bei einem schwarzen Körper wird davon ausgegangen, dass es alle elektromagnetische Strahlung, d.h. Licht oder Wärmestrahlung, die auf ihn trifft, absorbiert. Er lässt weder Strahlung durch noch reflektiert er Strahlung. Allerdings emittiert er Strahlung, die von seiner Temperatur abhängt.

Die Strahlungsbilanz der Erde

Planck'sches Strahlungsspektrum



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BlackbodySpectrum_lin_150dpi_de.png

- In welchen Wellenlängen welcher Teil der Strahlung emittiert wird, gibt das Planck'sche Strahlungsgesetz an.
- Im Bild links ist das Planck'sche Strahlungsspektrum für verschiedene Temperaturen grafisch dargestellt.
- Deutlich zu erkennen ist, dass
 - die Gesamtstrahlungsmenge (die Fläche unter der jeweiligen Kurve) stark mit der Temperatur ansteigt, um genau zu sein mit der 4. Potenz der Temperatur (Stefan-Boltzmann-Gesetz).
 - die maximale Strahlung bei kürzerer Wellenlänge erreicht wird, wenn die Temperatur zunimmt.
- Weitere Informationen zum Planck'schen Strahlungsspektrum können in jedem Standardtextbuch der Physik nachgelesen werden, oder z.B. unter https://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches_Strahlungsgesetz

Die Strahlungsbilanz der Erde

Strahlung eines grauen Körpers

- Ein weiteres Modell in der Thermodynamik ist der „graue Körper“.
- Ein grauer Körper absorbiert nicht die komplette Strahlung, die auf ihn trifft, und folglich strahlt er weniger ab als ein schwarzer Körper mit der gleichen Temperatur.
- Laut dem Kirchhoff'schen Gesetz sind Absorptionsvermögen und Emissionsvermögen eines grauen Körpers gleich. Dies impliziert ein Strahlungsgleichgewicht.
- Das Absorptionsvermögen ε gibt an, welcher Teil der Strahlung absorbiert wird.
- Der Wertebereich von ε liegt zwischen 0 und 1: Bei 1 ist es ein schwarzer Körper, bei 0 wird die eintretende Strahlung vollständig reflektiert (Spiegel).
- Bei einem grauen Körper werden sowohl absorbierte als auch emittierte Strahlung durch das Stefan-Boltzmann Gesetz beschrieben. Daraus kann berechnet werden, welche Temperatur der Körper im Strahlungsgleichgewicht hat.
- Dieses Modell kann in guter Annäherung auf Strahlungsbilanz und Klimasystem der Erde angewandt werden. Kleinere Abweichungen ergeben sich u.a. daraus, dass zwischen eingehender Sonneneinstrahlung und ausgehender Erdwärmestrahlung kein absolutes Gleichgewicht herrscht.
- Das Ungleichgewicht entsteht dadurch, dass sowohl die Einstrahlung der Sonne als auch die Ausstrahlung der Erde nicht absolut konstant sind, sondern sich im Laufe der Zeit ändern.

Die Strahlungsbilanz der Erde

Modellierung der Erdatmosphäre

- Die Erde bezieht ihre Energie im Wesentlichen von der Sonneneinstrahlung; die Wärme des Erdkerns ist für die Betrachtung von Wetter und Klima nicht relevant.
- Ein Teil der Sonneneinstrahlung wird absorbiert, ein Teil von der Erdoberfläche reflektiert. Die Albedo α gibt an, wie groß der reflektierte Anteil im Vergleich zum einfallenden Licht ist.
- Je heller eine Oberfläche ist, desto größer ist ihre Albedo.
- Im Folgenden wird die Strahlungsbilanz der Erde schrittweise immer genauer modelliert:
 - Modell 1: Eine völlig durchlässige Atmosphäre (keine Treibhauswirkung)
 - Modell 2: Eine völlig opake (=dichte) Atmosphäre (maximale Treibhauswirkung)
 - Modell 3: Eine teilweise durchlässige Atmosphäre (tatsächliche aktuelle Treibhauswirkung)
- Dabei werden noch folgende Annahmen gemacht:
 - Die Erde kann als grauer Körper betrachtet werden.
 - Die Erde befindet sich in einem Strahlungsgleichgewicht.
 - Der Energietransport in der höheren Atmosphäre funktioniert ausschließlich über Strahlung.
- Diese Annahmen sind sehr gute Annäherungen für die Erdatmosphäre und folglich kann die Strahlungsbilanz der Erde mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben werden.

Die Strahlungsbilanz der Erde

Modell 1: Atmosphäre 100% durchlässig

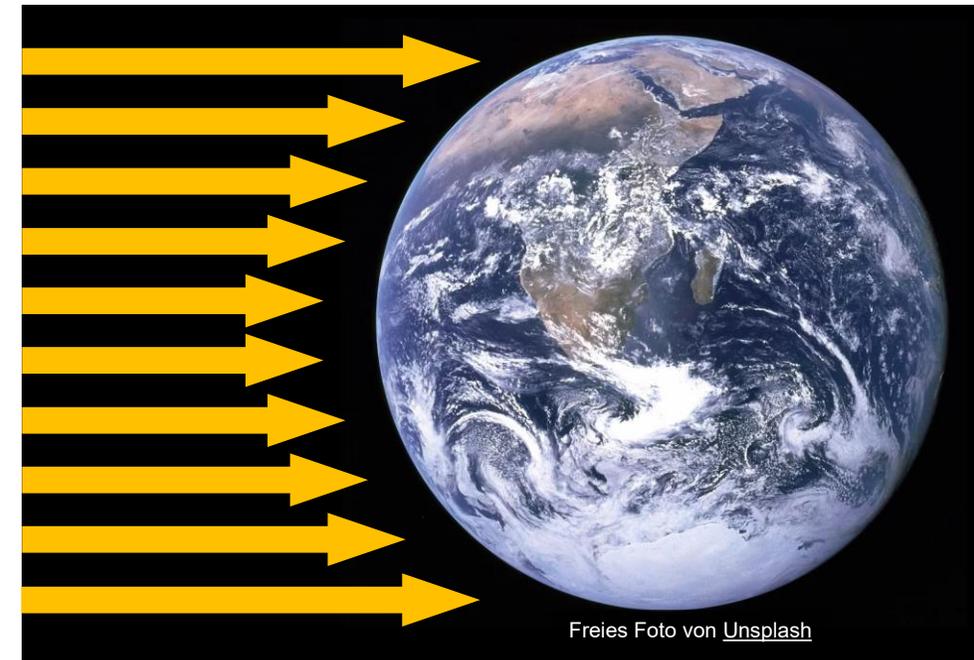
- Die Solarkonstante S_0 beträgt 1361 W/m^2 und beschreibt die Energiemenge der Sonne, die bei der Umlaufbahn der Erde pro Sekunde und pro m^2 gemittelt auf den Erdkreis trifft.
- Auf der gesamten Erdoberfläche trifft davon pro m^2 durchschnittlich $\frac{1}{4}$ an. Dies liegt daran, dass die Sonnenstrahlung eine Kreisfläche von πR^2 bescheint, während die Erde eine Gesamtoberfläche von $4\pi R^2$ hat (hier ist R der Radius der Erde).
- Die Erde strahlt davor 30% wieder direkt ab, dies ist die Albedo α der Erde. Die Sonnenstrahlung S , die die Erde effektiv erwärmt und die von der Erde als Wärme wieder abgestrahlt wird ist, ist somit

$$S = \frac{S_0}{4} (1 - \alpha) = \sigma T_e^4$$

- Umformung nach der Emissionstemperatur der Erde T_e gibt:

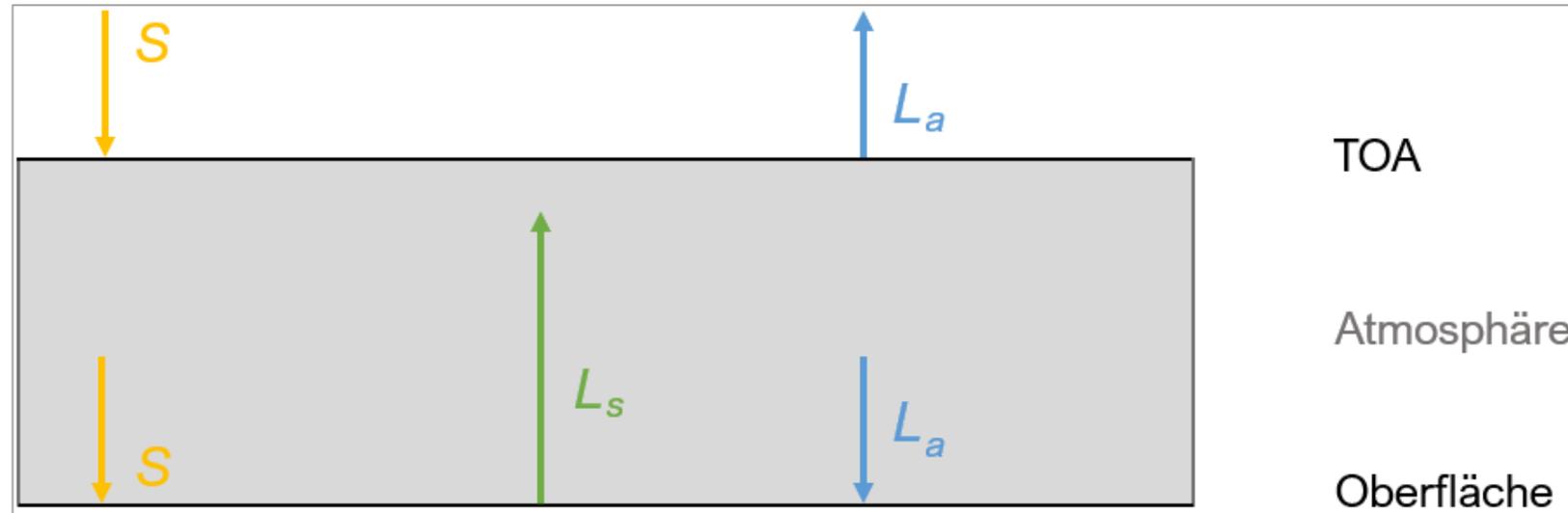
$$T_e = \left(\frac{S_0}{4\sigma} (1 - \alpha) \right)^{1/4} = 254,58 \text{ K} = -18,57 \text{ °C}$$

- Mit einer völlig durchlässigen Atmosphäre, bzw. ohne Atmosphäre, wäre T_e die mittlere Oberflächentemperatur der Erde T_s , die Treibhauswirkung wäre dann 0%.



Die Strahlungsbilanz der Erde

Modell 2: Atmosphäre 100% opak 1/2



S = Sonneneinstrahlung

L_a = Strahlung der Atmosphäre

L_s = Strahlung der Erdoberfläche

Siehe auch vorherige Seite

Strahlungsbilanz der Erde für eine „schwarze“, 100% opake Atmosphäre. Dies bedeutet, dass die Atmosphäre die Wärmestrahlung der Erde vollständig zerstreut und in keinem Frequenzbereich ungehindert durchlässt. Dies entspricht einer maximalen Treibhauswirkung von 100% (eigene Darstellung).

TOA (engl. „top of atmosphere“) bezeichnet das obere Ende der Erdatmosphäre. Da die oberste Schicht der Atmosphäre in Wirklichkeit kontinuierlich ins Vakuum übergeht, ist dies eine Art Hilfskonstrukt.

Dies bedeutet, dass die Steigung der Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche aufgrund des Treibhauseffektes nach oben begrenzt ist. Auf der nächsten Seite wird diese Obergrenze berechnet.

Die Strahlungsbilanz der Erde

Modell 2: Atmosphäre 100% opak 2/2

- Aus der Annahme des thermischen Gleichgewichts an der oberen und unteren Grenze der Atmosphäre folgen einige Zusammenhänge.
- So müssen die Einstrahlung der Sonne S und die bei TOA emittierte Strahlung L_a gleich groß sein:

$$S = L_a$$

- Da sowohl die solare Strahlung S als auch die atmosphärische Strahlung L_a auf der Erdoberfläche einfallen, muss die von der Oberfläche emittierte Strahlung L_s so groß sein wie die Summe aus solarer und atmosphärischer Strahlung:

$$L_s = L_a + S$$

- Kombiniert man beide Gleichungen ergibt sich:

$$L_s = S + S = 2S = \frac{S_0}{2} (1 - \alpha)$$

- Für die **maximale** Oberflächentemperatur der Erde T_s ergibt sich daraus unter erneuter Verwendung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes:

$$T_s = \left(\frac{S_0}{2\sigma} (1 - \alpha) \right)^{1/4} = 302,75 \text{ K} = 29,60 \text{ °C}$$

Die Strahlungsbilanz der Erde

Modell 3: Atmosphäre teilweise opak 1/4

- Bekanntlich liegt die mittlere globale Erdoberflächentemperatur zwischen den beiden Extremwerten $-18,6\text{ °C}$ (Modell 1) und $29,6\text{ °C}$ (Modell 2) bei aktuell $15,1\text{ °C}$, gemessen im Jahr 2023, siehe <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202313>
- Dies liegt daran, dass die Treibhauswirkung der Atmosphäre Teile der Wärmestrahlung zerstreut und Teile ungehindert durchlässt.
- Im 3. Modell nehmen wir an, dass die Atmosphäre einen Anteil ε der Wärmestrahlung zerstreut und folglich den Anteil $1 - \varepsilon$ ungehindert durchlässt.
- ε wird Absorptionsvermögen oder auch Treibhauswirkung genannt und die betrachteten Modelle 1 und 2 geben die Extremwerte $\varepsilon = 0 = 0\%$ (Modell 1) bzw. $\varepsilon = 1 = 100\%$ (Modell 2) an.
- An TOA, der Oberseite der Atmosphäre, strahlt die Erde nun zusätzlich zu L_a noch $(1 - \varepsilon)L_s$ aus: (siehe Grafik auf der nächsten Seite)

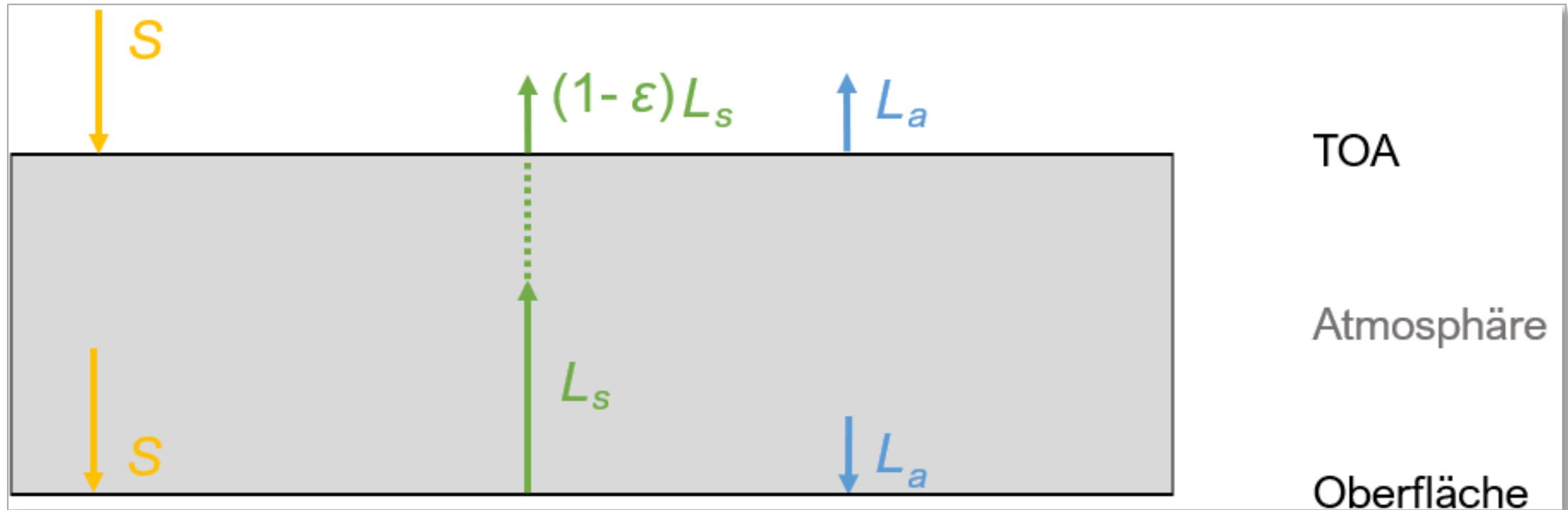
$$S = L_a + (1 - \varepsilon)L_s \quad \Rightarrow \quad L_a = S - (1 - \varepsilon)L_s$$

- An der Oberfläche ist das Strahlungsgleichgewicht wie zuvor

$$S + L_a = L_s \quad \Rightarrow \quad L_s = S + S - (1 - \varepsilon)L_s \quad \Rightarrow \quad L_s = 2S / (2 - \varepsilon)$$

Die Strahlungsbilanz der Erde

Modell 3: Atmosphäre teilweise opak 2/4



Strahlungsbilanz der Erde für eine „graue“, teilweise opake Atmosphäre (eigene Darstellung).

L_a ist die Strahlung der Atmosphäre, die sowohl nach oben als auch nach unten gerichtet ist.

L_s ist die Strahlung der Erdoberfläche, davon lässt die Atmosphäre den Anteil $(1 - \epsilon)L_s$ ungehindert durch.

Die Strahlungsbilanz der Erde

Modell 3: Atmosphäre teilweise opak 3/4

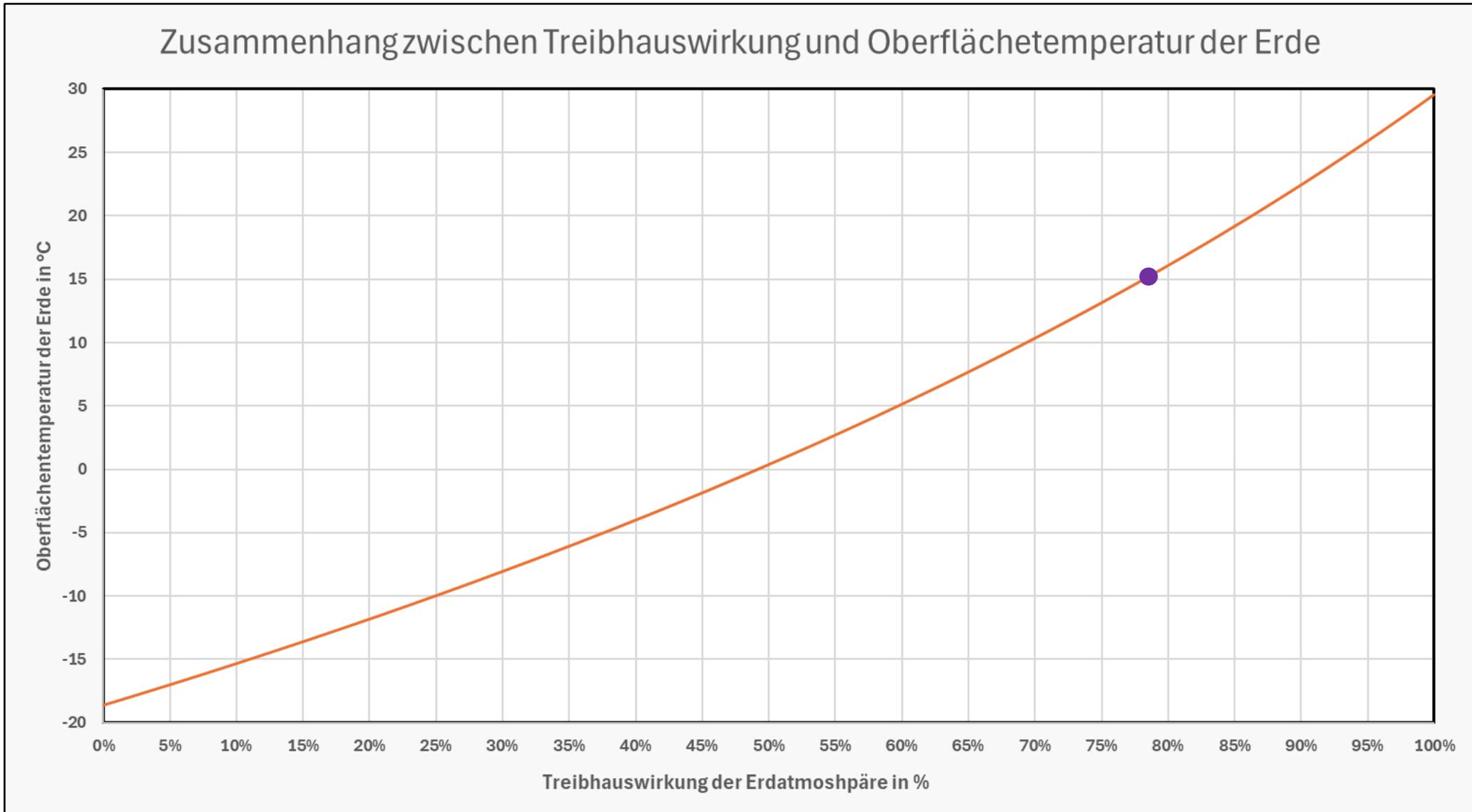
- Somit kann die Oberflächentemperatur mit Hilfe des Stefan-Boltzmann Gesetzes gefunden werden:

$$T_s = \left(\frac{2}{2 - \varepsilon} \right)^{1/4} T_e$$

- Auf der nächsten Seite ist die Erdoberflächentemperatur T_s in Abhängigkeit der Treibhauswirkung für den kompletten Wertebereich für ε von 0% bis 100% dargestellt.
- Der aktuell gemessene Wert von $T_s = 15,1 \text{ °C}$ wird für $\varepsilon = 78,3\%$ erreicht.
- Somit beträgt die aktuelle Treibhauswirkung der Erdatmosphäre 78,3%, wie auf der nächsten Seite mit ● eingezeichnet.
- Zusätzlich lässt sich mit diesem Modell die Sensitivität der Erdoberflächentemperatur T_s von der Solarkonstante berechnen. Die Solarkonstante schwankt durch den 11-Jahres-Zyklus der Sonne um etwa 1 W/m^2 . Selbst wenn es doppelt so viel wäre, ließe dies T_s nur um ca. $0,1 \text{ °C}$ schwanken.
- Folglich kann die Schwankung der Sonneneinstrahlung die aktuell wahrgenommene schnelle globale Erwärmung nicht erklären.

Die Strahlungsbilanz der Erde

Modell 3: Atmosphäre teilweise opak 4/4



Inhaltsaufgabe

- Wetter, Klima und Atmosphäre
- Die Strahlungsbilanz der Erde
- **Die Wirkungsweise von Treibhausgasen**
- Anzeichen für eine Erderwärmung
- Zusammenfassung

Die Wirkung von Treibhausgasen

Der Treibhauseffekt

- Wie viel Wärmestrahlung die Erdatmosphäre absorbiert, hängt von Aufbau und Zusammensetzung der Atmosphäre ab, inklusive Wolkenbildung.
- Die Atmosphäre der Erde kann mit einem Treibhaus verglichen werden. In einem Treibhaus kommt die Sonneneinstrahlung nahezu ungehindert durch die Scheiben und wird von den Pflanzen und der Erde innerhalb des Treibhauses absorbiert.
- Die Wärmestrahlung, die von den Pflanzen und der Erde emittiert wird, wird von den Scheiben des Treibhauses absorbiert und teils nach außen und teils wieder ins Treibhaus zurückgestrahlt.
- Wie wir gesehen haben, wird die Strahlungsbilanz der Erde durch ähnliche Effekte bestimmt.
- Der Effekt, den die Scheiben eines Treibhauses haben, haben auch Treibhausgase in der Atmosphäre, wie z.B. CO₂ oder Wasserdampf ebenso wie manche Wolken.
- Sie absorbieren thermische terrestrische Strahlung, remittieren einen Teil davon auf die Erde und emittieren thermische Strahlung in die Atmosphäre.

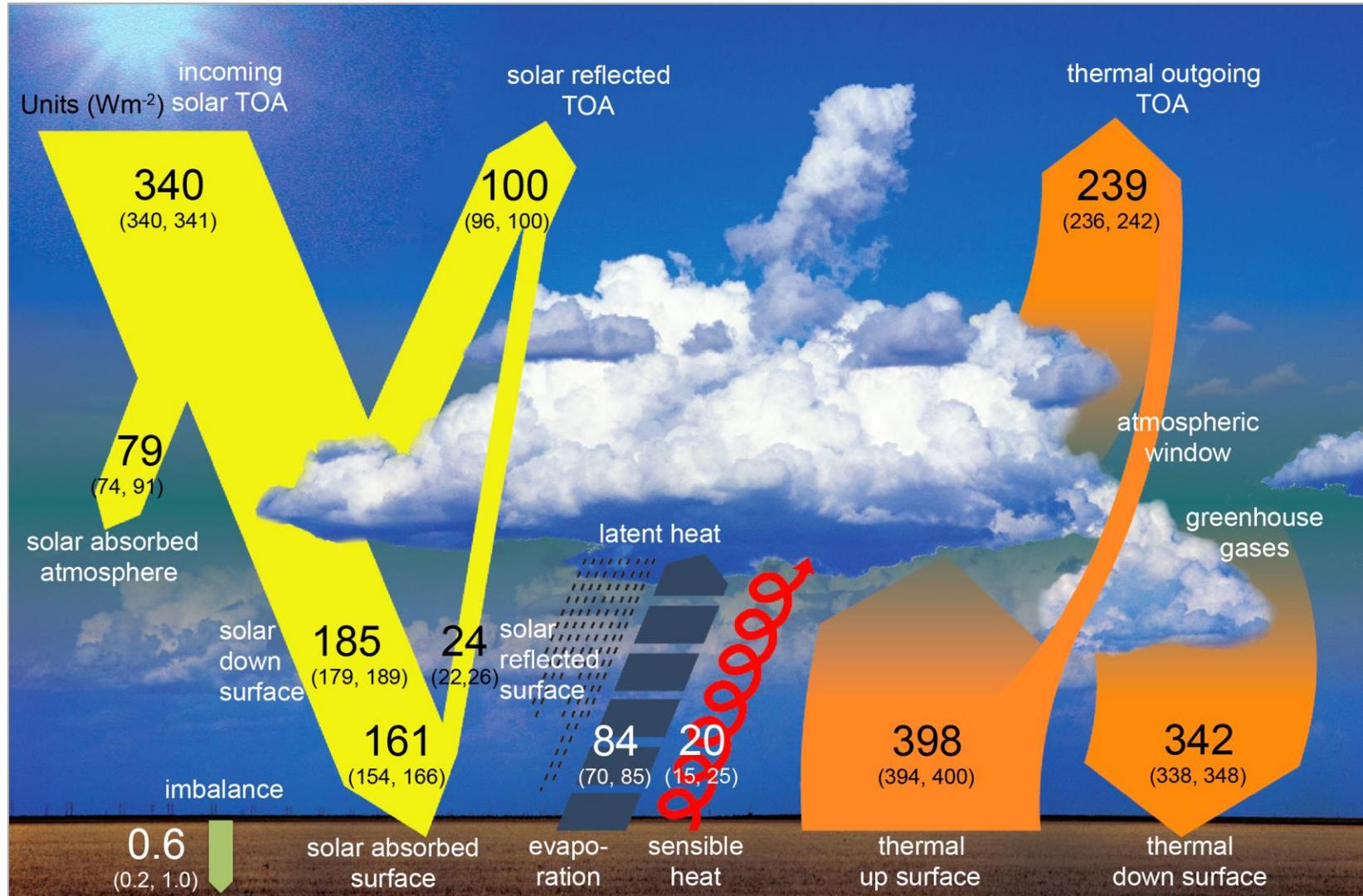
Die Wirkung von Treibhausgasen

Effekt von Wolken

- Ob bei Wolken der wärmende oder der kühlende Effekt dominiert, hängt davon ab, wie hoch oder niedrig sie sich in der Atmosphäre befinden.
- Wenn die Wolken eher hoch in der Atmosphäre sind, dominiert der wärmende Effekt, weil sie dann die thermische terrestrische Strahlung absorbieren.
- Sind Wolken aber in niedrigeren Teilen der Atmosphäre, dominiert der kühlende Effekt, weil sie dann die Sonnenstrahlung reflektieren und im "Treibhaus" Erdatmosphäre weniger Energie ankommt.
- Zu beachten ist an dieser Stelle, dass die Wolken in der Atmosphäre insgesamt einen kühlenden Effekt haben. Gäbe es gar keine Wolken, wäre es wärmer auf der Erde als es mit Wolken ist.
- Ob die *Veränderung* der Wolkenbildung im Rahmen des Klimawandels einen bremsenden oder verstärkenden Effekt hat, ist aktuell Forschungsgegenstand, siehe auch Seite 21.
- In der Abbildung auf der nächsten Seite ist schematisch dargestellt, wie der Strahlungshaushalt der Erde unter Berücksichtigung von Wolken und Treibhausgasen aussieht.

Die Wirkung von Treibhausgasen

Strahlungshaushalt der Erde



https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf Abbildung 2.11, Seite 181

Die Wirkung von Treibhausgasen

Gleichgewicht und Strahlungsantrieb 1/3

- Sowohl Treibhausgase als auch Aerosole* ändern das Strahlungsgleichgewicht in der Atmosphäre, wobei der Effekt von Aerosolen deutlich weniger klar ist als der von Treibhausgasen.
- Diese Unklarheit hat ihren Ursprung darin, dass der Effekt von Aerosolen mehr Faktoren einschließt als der Effekt von Treibhausgasen und deshalb schwieriger zu modellieren ist.
- Die Änderung des Strahlungsgleichgewichts in der Atmosphäre wird als Strahlungsantrieb bezeichnet und hat Auswirkungen auf das Klima.
- Wie der Strahlungsantrieb sich auf das Strahlungsgleichgewicht der Erde auswirkt, ist in der Abbildung auf der nächsten Seite beispielhaft zu sehen.
- Würden die Treibhausgase in der Atmosphäre instantan verändert, z.B. durch eine Verdopplung, so würde weniger thermische terrestrische Strahlung durch die Atmosphäre nach außen gelangen.
- Dadurch wird die einfallende solare Strahlung nicht mehr vollständig ausgeglichen, – es entsteht ein Strahlungsantrieb.

* Aerosole sind flüssige oder feste Schwebeteilchen in einem Gas. Weitere Informationen unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Aerosol>

Die Wirkung von Treibhausgasen

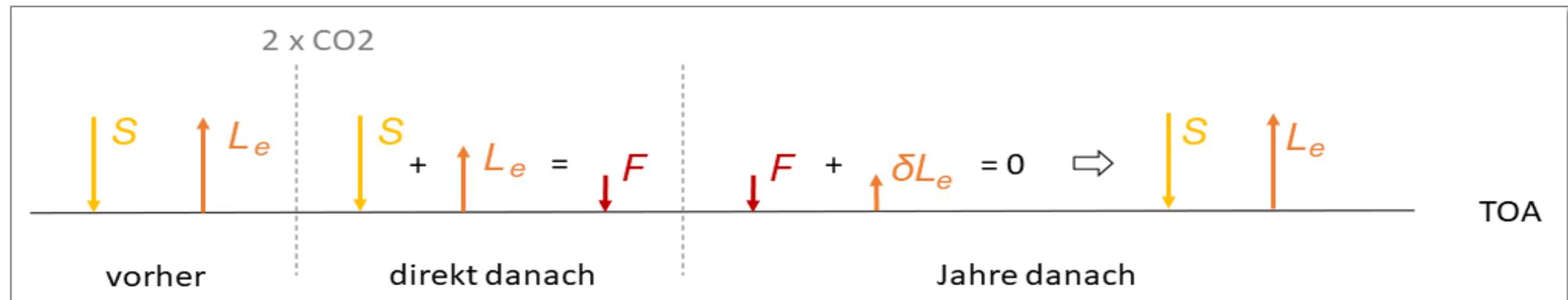
Gleichgewicht und Strahlungsantrieb 2/3

- Damit das Strahlungsgleichgewicht wieder hergestellt wird, muss das System Erde sich anpassen.
- Über einen längeren Zeitraum befindet sich das System im Ungleichgewicht, bis der Strahlungsantrieb nach mehreren Jahren oder Jahrzehnten durch zusätzliche terrestrische Strahlung δL_e ausgeglichen ist.

- Dies geht aufgrund des Stefan-Boltzmann Gesetzes mit einer Temperaturänderung einher

$$\delta L_e = \delta(\sigma \cdot T_e^4) = 4 \cdot \sigma T_e^3 \cdot \delta T_e$$

- Hier wurde nach der Emissionstemperatur T_e abgeleitet. Eine Änderung von T_e wirkt sich auch auf die Oberflächentemperatur T_s aus, wie im Abschnitt über die Strahlungsbilanz der Erde erläutert wurde.



Die Wirkung von Treibhausgasen

Gleichgewicht und Strahlungsantrieb 3/3

- Folglich wirkt sich ein Strahlungsantrieb, z.B. durch die Erhöhung des Anteils der Treibhausgase in der Erdatmosphäre oder durch eine veränderte Sonneneinstrahlung, zwangsläufig auf die Oberflächentemperatur der Erde aus.
- Im realen Klimasystem befinden sich die Prozesse permanent in der Anpassung an multiple Änderungen, d.h. das System ist dynamisch.
- Obwohl das Klimasystem sich nicht im 100%-igen Gleichgewicht befindet, strebt es ständig ein Gleichgewicht an.
- Ändert sich der Strahlungsantrieb sehr langsam, ist das System immer nahezu im Gleichgewicht.
- Ändert sich der Strahlungsantrieb zu schnell, gerät das Klimasystem aus dem Gleichgewicht und passt sich erst nach längerer Zeit an die Veränderungen an.

Die Wirkung von Treibhausgasen

Atmosphärische Fenster

- Der Effekt von Treibhausgasen besteht im Wesentlichen darin, dass sie langwellige Infrarotstrahlung, die von der Erde abgestrahlt wird, absorbieren und z.T. remittieren und somit Energie in der Atmosphäre bleibt, die ohne Treibhausgase in den Weltraum abgestrahlt würde.
- Jedes Treibhausgas kann Strahlung bestimmter Wellenlängen absorbieren.
- Für einige Wellenlängenbereiche ist die Atmosphäre nahezu vollständig durchlässig, während in anderen Bereichen viel Strahlung durch unterschiedliche Gase absorbiert wird.
- Die Abbildung auf der nächsten Seite zeigt das Spektrum der Erdwärmestrahlung bei TOA.
- Die Wellenlängenbereiche, in denen kein Gas in der Atmosphäre die thermische Strahlung von der Erdoberfläche absorbiert, werden als „atmosphärische Fenster“ bezeichnet.
- Je mehr von einem bestimmten Gas in der Atmosphäre vorhanden ist, desto mehr thermische Strahlung kann in den entsprechenden Wellenlängen absorbiert werden.
- Dies ist allerdings kein linearer Effekt, da es eine Sättigungsgrenze gibt, an welcher zusätzliches Gas keine zusätzliche Strahlung mehr absorbiert.

Die Wirkung von Treibhausgasen

Abstrahlung der Erde in 70 km Höhe

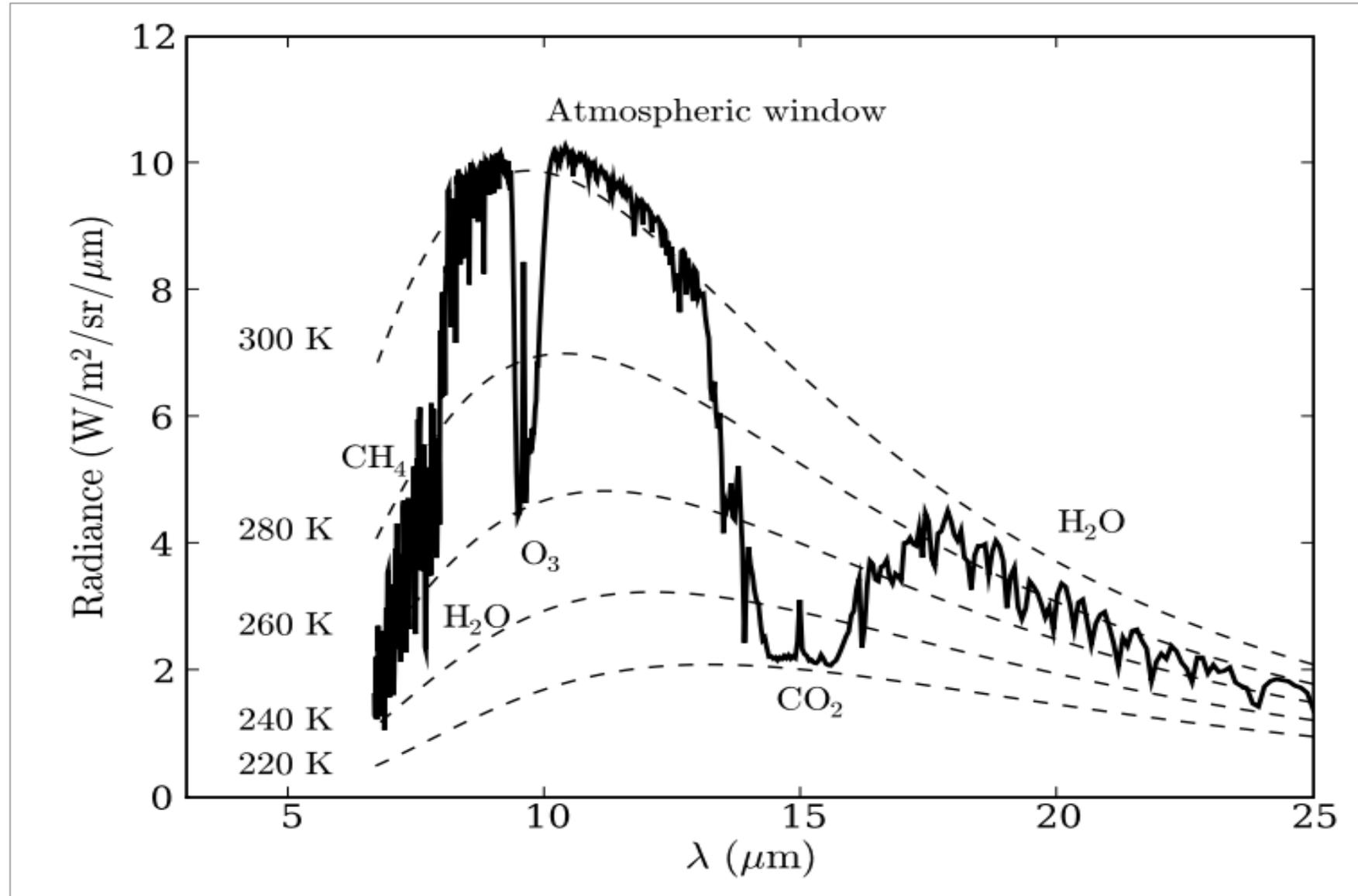


Fig. 2.12 B. Sportisse, Fundamentals of Air Pollution
http://dsrs.atmos.umd.edu/DATA/pinker_home_met_o400/radiative_transfer_9789048129690-c2.pdf

Inhaltsaufgabe

- Wetter, Klima und Atmosphäre
- Die Strahlungsbilanz der Erde
- Die Wirkungsweise von Treibhausgasen
- **Anzeichen für eine Erderwärmung**
- Zusammenfassung

Anzeichen für eine Erderwärmung

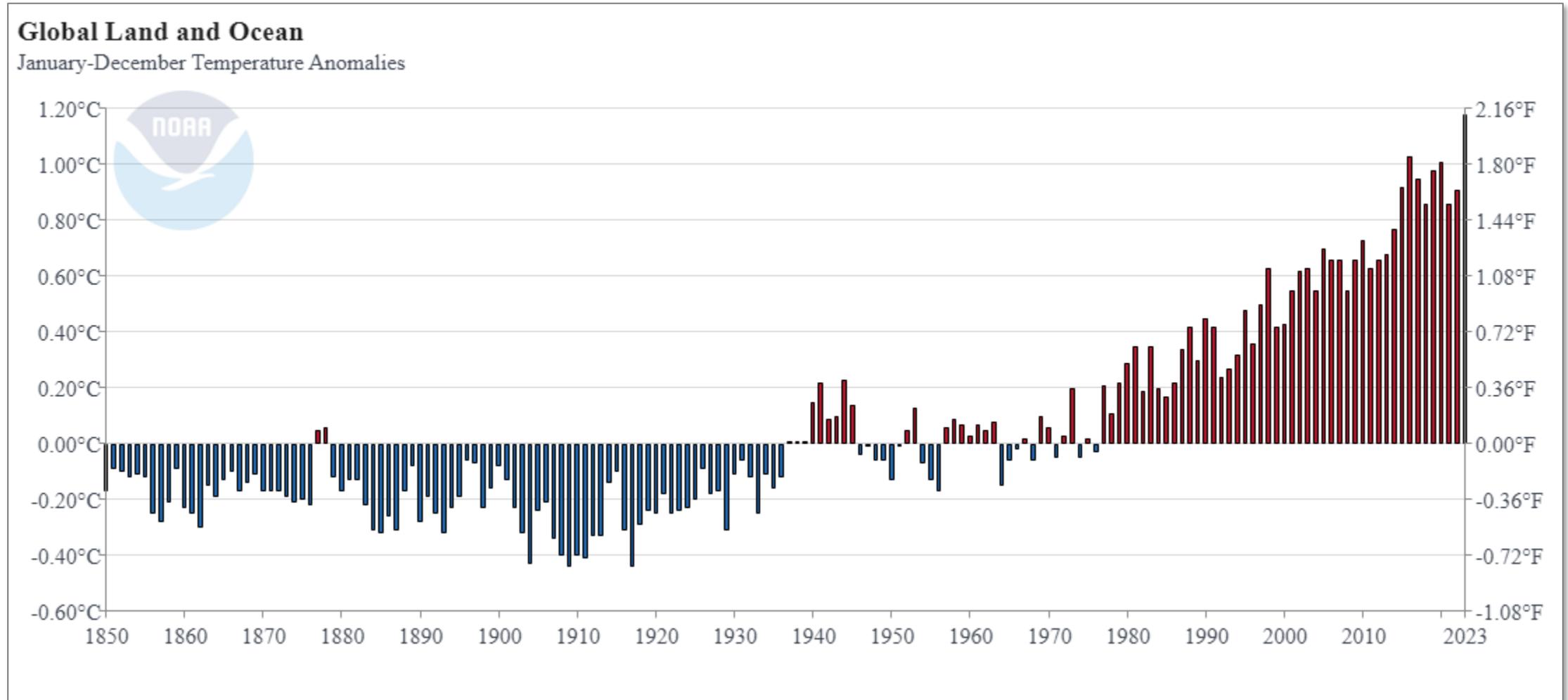
Messung Oberflächentemperatur 1/4

- Nach Einführung von Klima und Erdatmosphäre folgen nun einige Anzeichen einer Erderwärmung.
- Wir haben bereits gesehen, dass Klima als Statistik des Wetters verstanden werden soll. Folglich unterscheiden sich die Klimaprozesse und Einflussfaktoren nicht völlig von denen für das Wetter.
- Da die Statistiken jedoch über längere Zeiträume ermittelt werden, kommen einige Einflussfaktoren hinzu, die für kurze Zeiträume, z.B. das Wetter der nächsten drei Tage, vernachlässigbar sind.
- Als Beispiel können die solaren Zyklen* genannt werden.
- Das wichtigste Anzeichen für den Klimawandel ist die Tatsache, dass Messungen der Oberflächentemperatur einen starken Erwärmungstrend erkennen lassen.
- Aufgetragen (und verglichen) werden hierbei Temperaturanomalien, da diese von den Gegebenheiten an der Messstation weniger beeinflusst werden als absolute Temperaturen.
- Das Bild auf der nächsten Seite zeigt diesen Trend. Besonders auffällig ist die Steigung seit den 1970-er Jahren.

* Solare Zyklen bezeichnen Schwankungen in der Sonnenaktivität, die sich in regelmäßigen zeitlichen Abständen wiederholen.

Anzeichen für eine Erderwärmung

Messung Oberflächentemperatur 2/4



Anzeichen für eine Erderwärmung

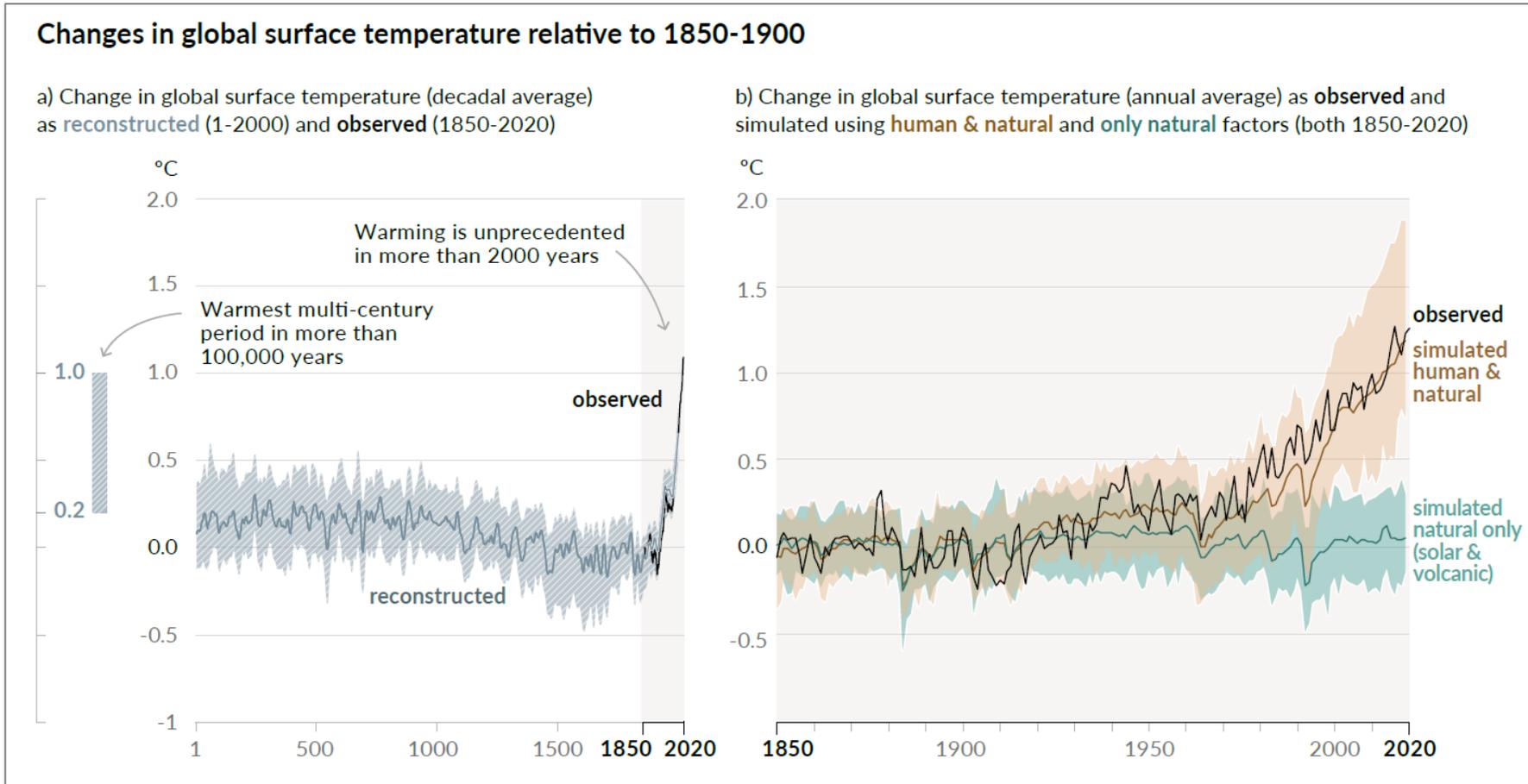
Messung Oberflächentemperatur 3/4

- Die momentan verzeichnete Temperaturänderung ist signifikant stärker als die Temperaturanomalien der letzten ca. 2000 Jahre (siehe Abbildung auf der nächsten Seite).
- Temperaturrekonstruktionen, die weiter in die Vergangenheit reichen, sind an dieser Stelle kein hilfreicher Vergleich mehr, da deutlich weniger aussagekräftige Daten vorliegen.
- In den letzten 150 Jahre hat nicht nur die globale mittlere Oberflächentemperatur zugenommen, sondern auch die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre, z.B. von CO₂ (siehe Abbildung übernächste Seite).
- Die These, dieser Anstieg von Treibhausgasen könne anthropogenen* Ursprung haben, kam nicht zuletzt deshalb auf, weil er zeitlich und gemäß Modellrechnungen zur industriellen Revolution passt.
- Dass es sich bei dem aktuell verzeichneten Anstieg von CO₂ in der Erdatmosphäre in der Tat zu einem signifikanten Teil um anthropogenes CO₂ handelt, kann mithilfe der Isotope von Kohlenstoff plausibel gemacht werden.
- Dazu mehr auf der nächsten Textseite.

* Anthropogen bedeutet „von Menschen verursacht“. Dabei spielt vor allem die industrielle Freisetzung von CO₂ durch Verbrennung fossiler Brennstoffe eine Rolle.

Anzeichen für eine Erderwärmung

Messung Oberflächentemperatur 4/4



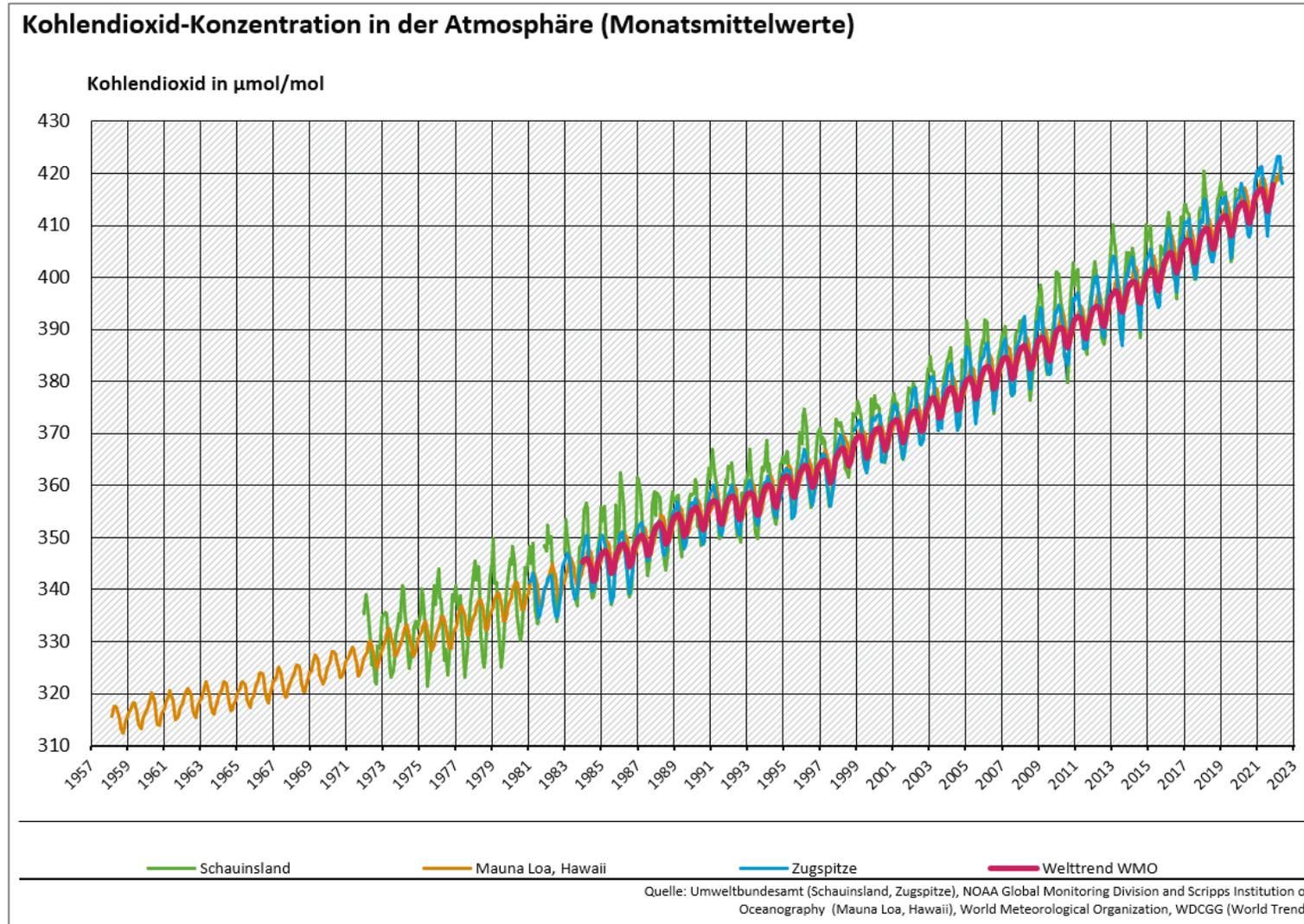
Anmerkung: Das Thema Temperaturrekonstruktion wird in einer separaten Präsentation der W+W Klima AG ausführlicher dargestellt.

Insbesondere bei den Ausprägungen der mittelalterlichen Warmzeit und der „kleinen Eiszeit“ zwischen 1600 und 1900 kommen Forscher zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Einig sind sich jedoch alle, dass die aktuelle Erwärmung stärker ist und schneller stattfindet als alle Klimaschwankungen der letzten 2000 Jahren.

Anzeichen für eine Erderwärmung

Messung atmosphärisches CO₂



Anzeichen für eine Erderwärmung

Nachweis anthropogenes CO₂ 1/2

- Das Isotop ¹⁴C macht mit ca. $1,25 \cdot 10^{-9}$ den mit Abstand kleinsten Anteil der Kohlenstoffisotope aus.
- Dieses Isotop zerfällt mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren. In einem Haufen Kohlenstoff (oder einer chemischen Verbindung, die Kohlenstoff enthält) ist also nach 5730 Jahren nur noch halb so viel, nach 11460 Jahren nur noch ein Viertel so viel ¹⁴C wie am Anfang.
- Dies hat zu Folge, dass in fossilen Brennstoffen vergleichsweise wenig ¹⁴C vorhanden ist.
- Wenn der Anteil von CO₂ mit ¹⁴C in der Atmosphäre also mit der Zeit sinkt, kann das bedeuten, dass das CO₂, das zusätzlich in die Atmosphäre kommt, weniger ¹⁴C-Isotope enthält als das natürliche atmosphärische CO₂.
- Dies ist bei Kohlenstoffdioxid aus fossilen Brennstoffen der Fall. Neben weiteren Hinweisen ist dies ein Argument für den anthropogenen Klimawandel.
- Diese Hinweise werden ausführlich besprochen im IPCC AR6 WG1 Report p689.

Anzeichen für eine Erderwärmung

Nachweis anthropogenes CO₂ 2/2

- Wenn nun ein Anstieg von CO₂ und von anderen Treibhausgasen in der Atmosphäre verzeichnet wird, bedeutet das, dass der Treibhauseffekt verstärkt wird.
- Dies führt aufgrund des verschobenen Strahlungsgleichgewichtes zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur auf der Erde.
- Dass öffentliche Diskussionen oft primär CO₂ in den Fokus nehmen, liegt u.a. daran, dass dieses Treibhausgas deutlich länger in der Atmosphäre verbleibt als z.B. Methan. Ein bestimmter CO₂-Gehalt in der Atmosphäre, wenn einmal erreicht, verbleibe für bis zu 100 Jahren auf etwa demselben Niveau, selbst wenn die Emissionen auf null zurückgingen*.
- Die Korrelation** zwischen dem Temperaturanstieg und dem Anstieg des Gehalts unterschiedlicher Treibhausgase, darunter CO₂, führt zu der Annahme, das anthropogene CO₂ *könnte* eine Ursache für den aktuellen Klimawandel sein.
- Die genannten Messungen alleine sind noch keine Beweise für einen anthropogenen Klimawandel.
- Es braucht Modelle und Daten zum anthropogenen CO₂-Ausstoß, um dies zu plausibilisieren.
- Dies wird weiter vertieft in der Präsentation „W+W KlimaAG - Ursachen Klimawandel.pdf“

** Eine Korrelation ist ein *statistischer* Zusammenhang zwischen bestimmten Variablen. Dies *kann* ein Anzeichen für einen *kausalen* Zusammenhang sein; dieser ist jedoch nicht zwingend gegeben. Wird also eine Korrelation benutzt, um eine wissenschaftliche Hypothese aufzustellen, werden theoretische und faktische Nachweise benötigt, um sie zu bestätigen.

* J. Houghton (2015), Global Warming - The complete briefing, 5. Auflage, Cambridge University Press, Cambridge

Inhaltsaufgabe

- Wetter, Klima und Atmosphäre
- Die Strahlungsbilanz der Erde
- Die Wirkungsweise von Treibhausgasen
- Anzeichen für eine Erderwärmung
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Die Funktionsweise des Wetters wurde beschrieben und den Unterschied zwischen Wetter und Klima erklärt.
- Die Strahlungsbilanz der Erde, sowie die daraus entstehenden globalen atmosphärischen Zirkulationsmuster wurden beschrieben.
- Die Erdatmosphäre kann in guter Näherung als grauen Körper beschrieben werden.
- Daraus lassen sich mit Hilfe des Strahlungsgesetzes von Stefan-Boltzmann die minimale (-18,6 °C) und maximale mittlere Oberflächentemperatur (29,6 °C) ableiten.
- Folglich kann die Temperatur der Erde nicht beliebig ansteigen.
Allerdings ist 29,6 °C ca. 15 °C mehr als heute, was mit massiven Folgen verbunden wäre.
- Die prinzipielle Wirkung von Treibhausgasen wurde beschrieben.
- Es wurden die typischen Anzeichen für eine Erhöhung der durchschnittlichen Oberflächentemperatur der Erde, als markantes Kennzeichen des aktuellen Klimawandels beschrieben.
- Auf die Ursachen für diesen Klimawandel wird in einer weiteren Präsentation der **W+W KlimaAG** eingegangen: „W+W KlimaAG - Ursachen Klimawandel.pdf“.

Wort und Wissen Klima-Arbeitsgruppe

Peter Korevaar
Hanna Ziegler
Albrecht Ehrmann
Maik Böhm

Dank an: Markus Blietz, Reinhard Junker, Markus Merk, Peter Trüb, Henrik Ullrich