

Atmosphäre und Klimawandel

Wissenschaftliche Grundlagen und Handlungsmöglichkeiten

Prof. Dr. Thorsten Hoffmann

Department Chemie
Johannes Gutenberg Universität Mainz



27. Juni 2022

Einführung in die Chemie und Physik der Atmosphäre

Aufbau der Atmosphäre

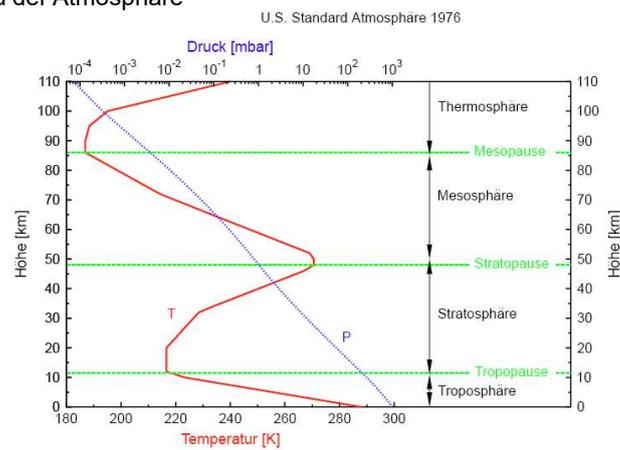


Abbildung 1-1: Aufbau der Atmosphäre. Auf der linken Seite ist der Verlauf von Temperatur (rot durchgezogene Linie) und Druck (blau gepunktete Linie) als Funktion der Höhe für die U.S. Standard Atmosphäre von 1976 aufgetragen. Letztere wird als einheitliche Referenz in vielen Atmosphärenmodellen eingesetzt. Auf der rechten Seite sind die einzelnen Stockwerke der Atmosphäre aufgetragen. Sie werden durch die sogenannten Pausen (grün gestrichelt) getrennt, die durch Minima bzw. Maxima im Temperaturverlauf definiert sind.



Link zu Folie 70

Die Stockwerke der Atmosphäre

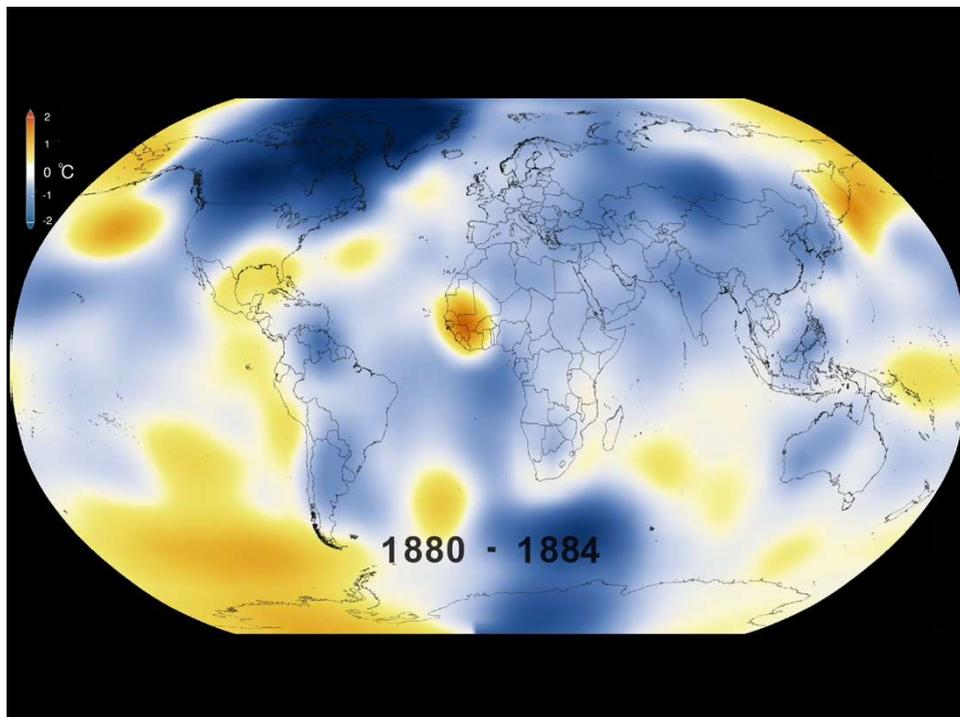
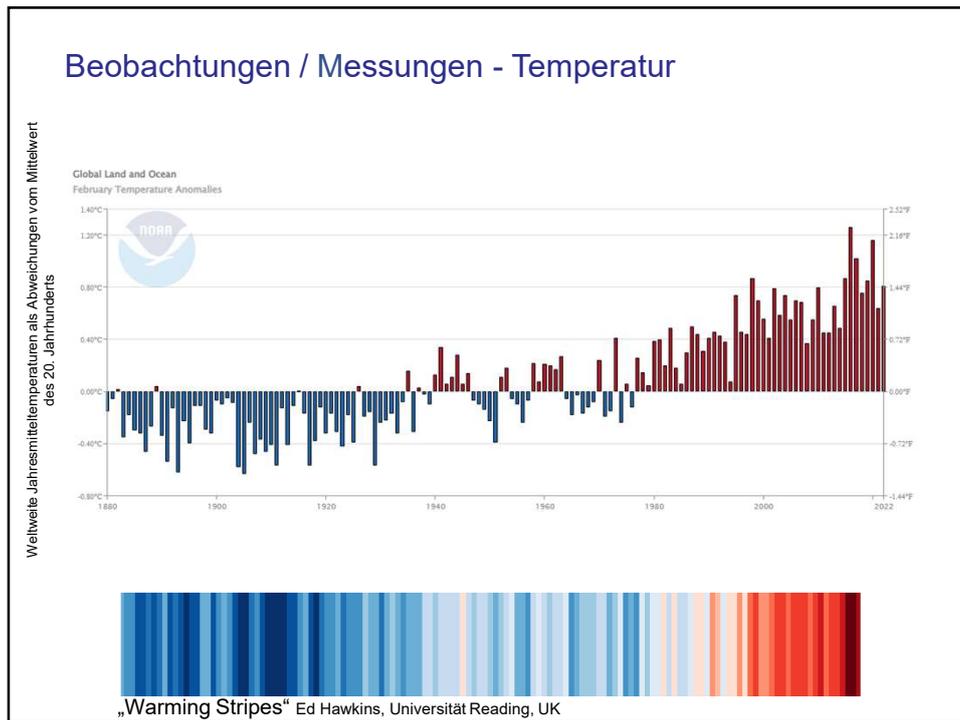
Troposphäre	<ul style="list-style-type: none"> • von Erdoberfläche bis ~8–18 km (abhängig von Jahreszeit und Breitengrad: Pol ~8 km, Äquator ~18 km) • Temperaturabfall mit der Höhe (mit Abstand zur sonnengewärmten Erdoberfläche) • sehr gute vertikale Durchmischung • "Wetter" • Troposphäre wird noch unterteilt, siehe unten
Tropopause	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturminimum
Stratosphäre	<ul style="list-style-type: none"> • von Tropopause bis ~45–50 km • Temperaturanstieg mit der Höhe (durch Absorption von UV-Strahlung in der Ozonschicht) • geringe vertikale Durchmischung
Stratopause	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturmaximum
Mesosphäre	<ul style="list-style-type: none"> • von Stratopause bis ~80–90 km • Temperaturabfall mit der Höhe
Mesopause	<ul style="list-style-type: none"> • kältester Punkt in der Atmosphäre
Thermosphäre	<ul style="list-style-type: none"> • oberhalb der Mesopause • Temperaturanstieg mit der Höhe (durch Absorption kurzwelliger Strahlung durch N₂ und O₂)

Troposphäre und Stratosphäre stellen zusammen etwa 99,9 % der Gesamtmasse der Atmosphäre dar!

Die Zusammensetzung der Atmosphäre

Gas		Molare Masse [g mol ⁻¹]	Mischungsverhältnis [†] [mol mol ⁻¹]*	
Stickstoff	N ₂	28.013	0.78084	= 78.1 %
Sauerstoff	O ₂	31.999	0.209476	= 20.9 %
Argon	Ar	39.948	9.34·10 ⁻³	= 0.9 %
Neon	Ne	20.179	1.818·10 ⁻⁵	= 18.2 ppm
Krypton	Kr	83.800	1.1·10 ⁻⁶	= 1.1 ppm
Xenon	Xe	131.300	9·10 ⁻⁸	= 90 ppb
Helium	He	4.003	5.24·10 ⁻⁶	= 5.2 ppm
Kohlendioxid	CO ₂	44.010	3.6·10 ⁻⁴	= 360 ppm
Methan	CH ₄	16.043	1.7·10 ⁻⁶	= 1.7 ppm
Kohlenmonoxid	CO	28.010	5·10 ⁻⁸ – 2·10 ⁻⁷	= 50–200 ppb
Wasserstoff	H ₂	2.016	5.5·10 ⁻⁷	= 550 ppb
Lachgas	N ₂ O	44.013	3.1·10 ⁻⁷	= 310 ppb
Stickstoffmonoxid	NO	30.006	10 ⁻¹² – 10 ⁻⁸	= 1 ppt–10 ppb
Stickstoffdioxid	NO ₂	46.006	10 ⁻¹² – 10 ⁻⁸	= 1 ppt–10 ppb
Ozon (trop.)	O ₃	47.998	10 ⁻⁸ – 5·10 ⁻⁷	= 10–500 ppb
(strat.)			5·10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁵	= 0.5–10 ppm
Ammoniak		17.031	10 ⁻¹¹ – 10 ⁻⁹	= 10 ppt–1 ppb
Wasserstoffperoxid	H ₂ O ₂	34.015	10 ⁻¹⁰ – 10 ⁻⁸	= 0.1–10 ppb
Formaldehyd	CH ₂ O	30.026	10 ⁻¹⁰ – 10 ⁻⁹	= 0.1–1 ppb
Schwefeldioxid	SO ₂	64.065	10 ⁻¹¹ – 10 ⁻⁹	= 10 ppt–1 ppb
Wasser	H ₂ O	18.015	stark variabel	
∑ Gase = Luft		M _L = 28.964	1.0	= 100 %

Beobachtungen / Messungen - Temperatur



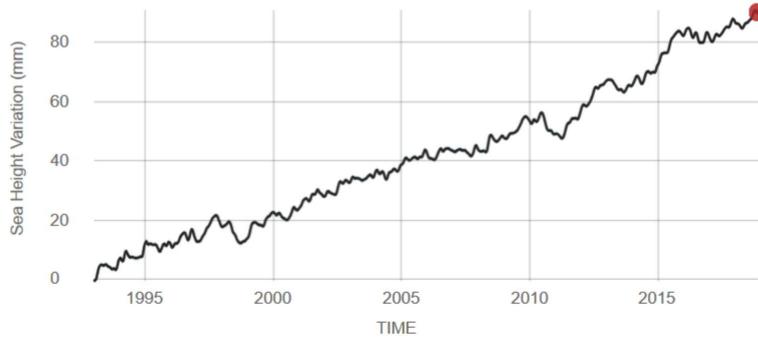
Beobachtungen / Messungen - Meeresspiegel

SATELLITE DATA: 1993-PRESENT

Data source: Satellite sea level observations.
Credit: NASA Goddard Space Flight Center

RATE OF CHANGE

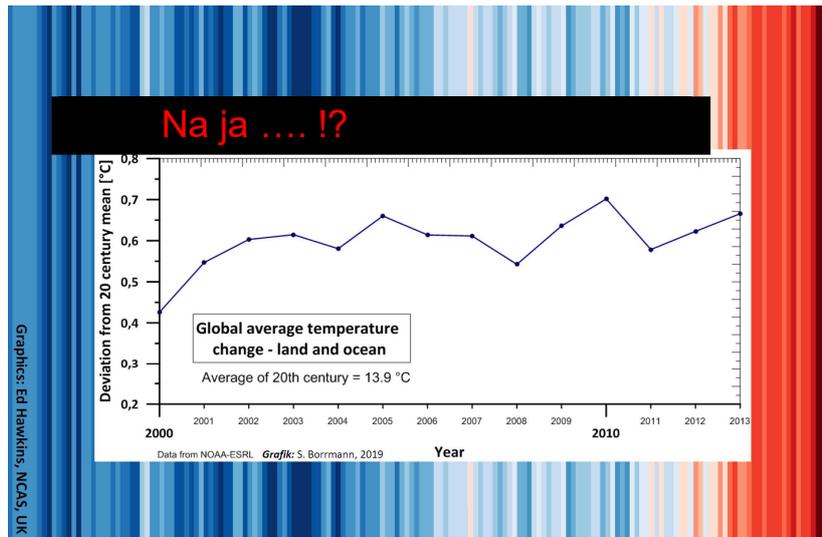
↑ **3.3**
millimeters per year



Meeresspiegelbeobachtungen zwischen 1993 und November 2018.

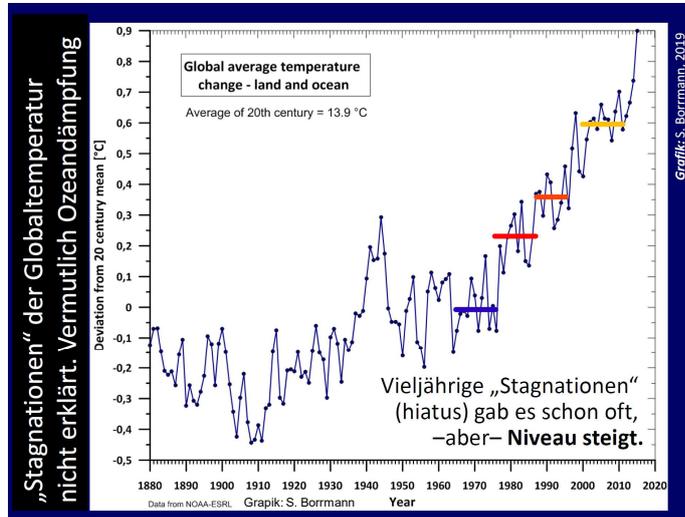
⇒ eindeutiger Anstieg des Meeresspiegels

Alles vollkommen eindeutig ?



⇒ je nach Beobachtungszeitraum kein eindeutiger Trend

Beobachtungen / Messungen - Temperatur

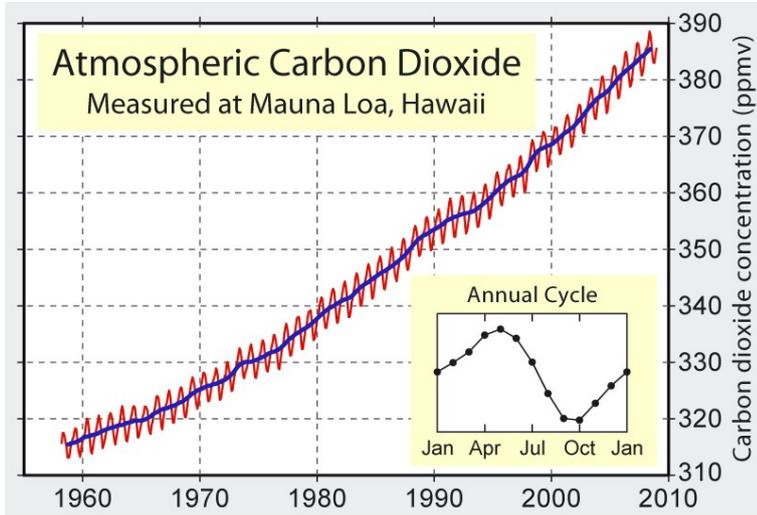


⇒ bei längeren Beobachtungszeiten eindeutig...

Und die Folgen!?

Film
Abschmelzen
arktisches
Meereis

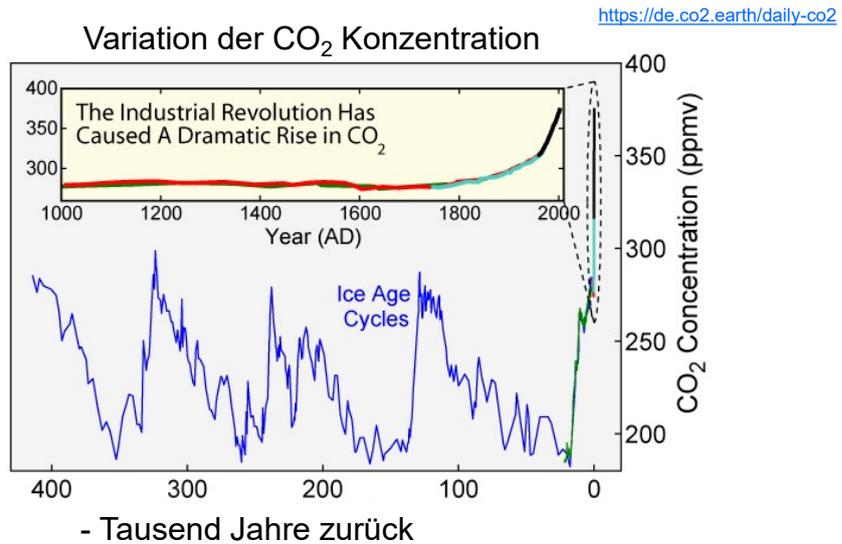
Atmosphärisches CO₂ – die letzten 60 Jahre



Keeling-Kurve

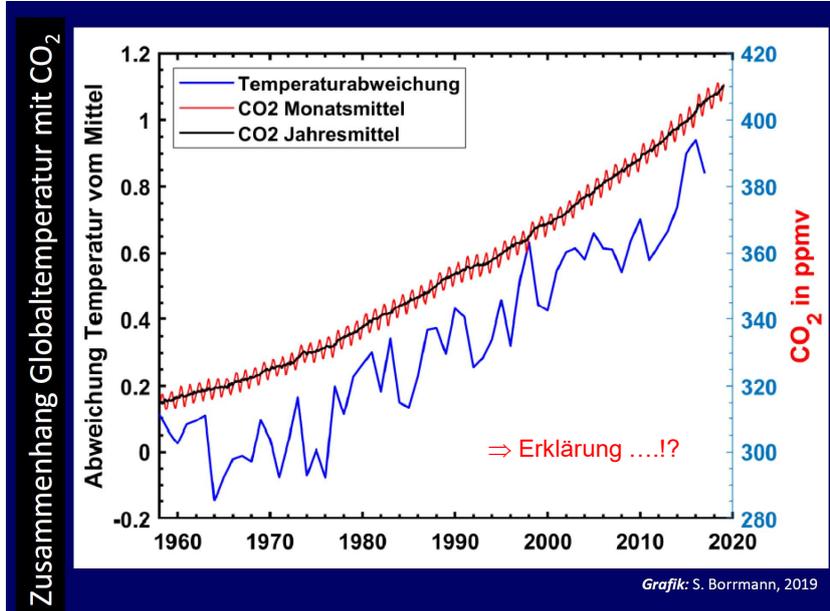
⇒ Anstieg Treibhausgas CO₂

Atmosphärisches CO₂ – die letzten 400 Tausend Jahre



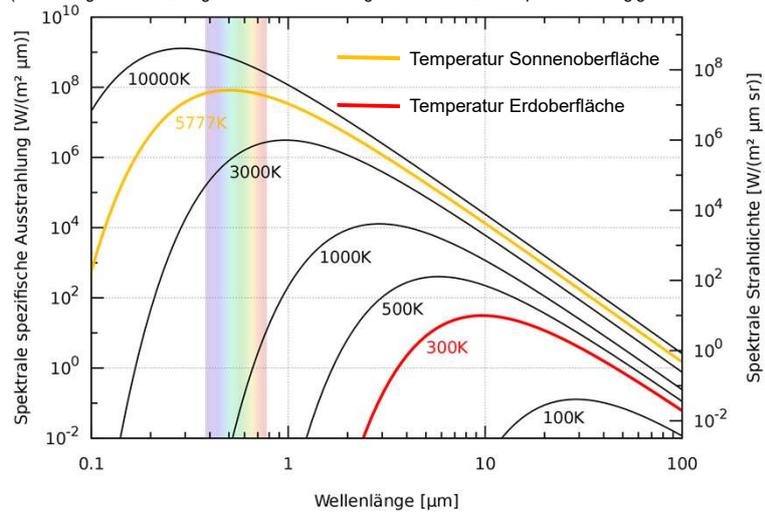
⇒ natürliche Variationen – keine Erklärung
⇒ anthropogene CO₂ Emissionen

Globaltemperatur und CO₂

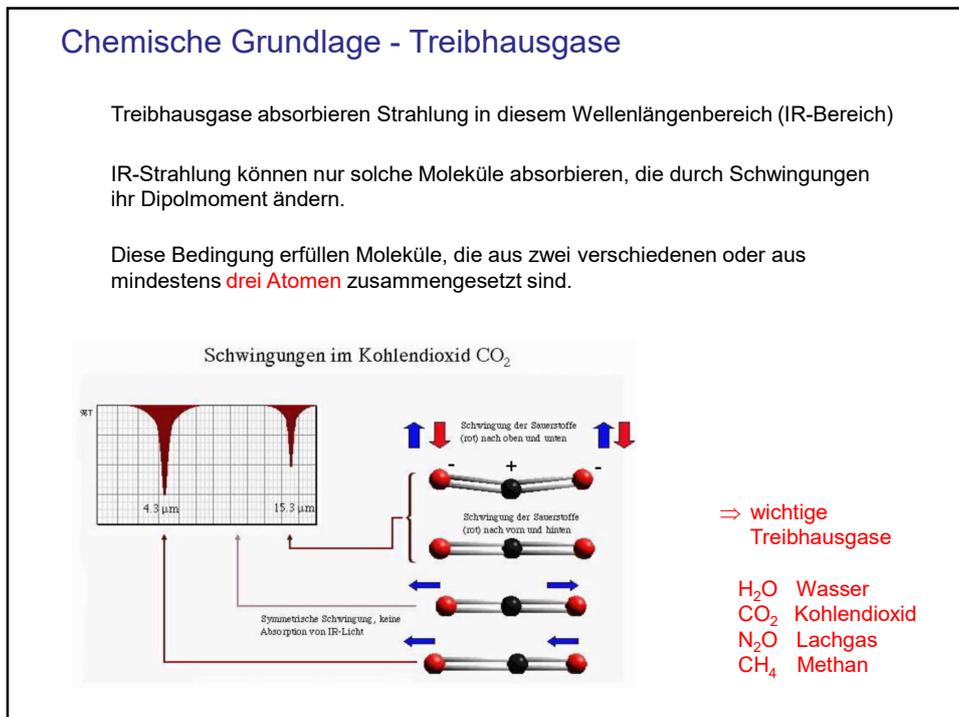
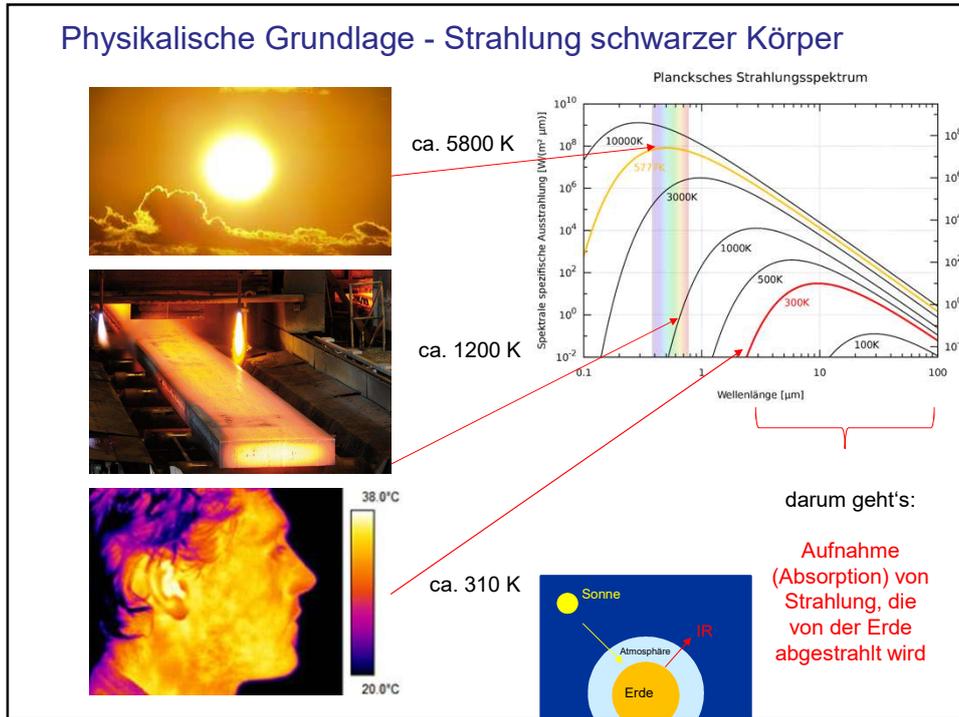


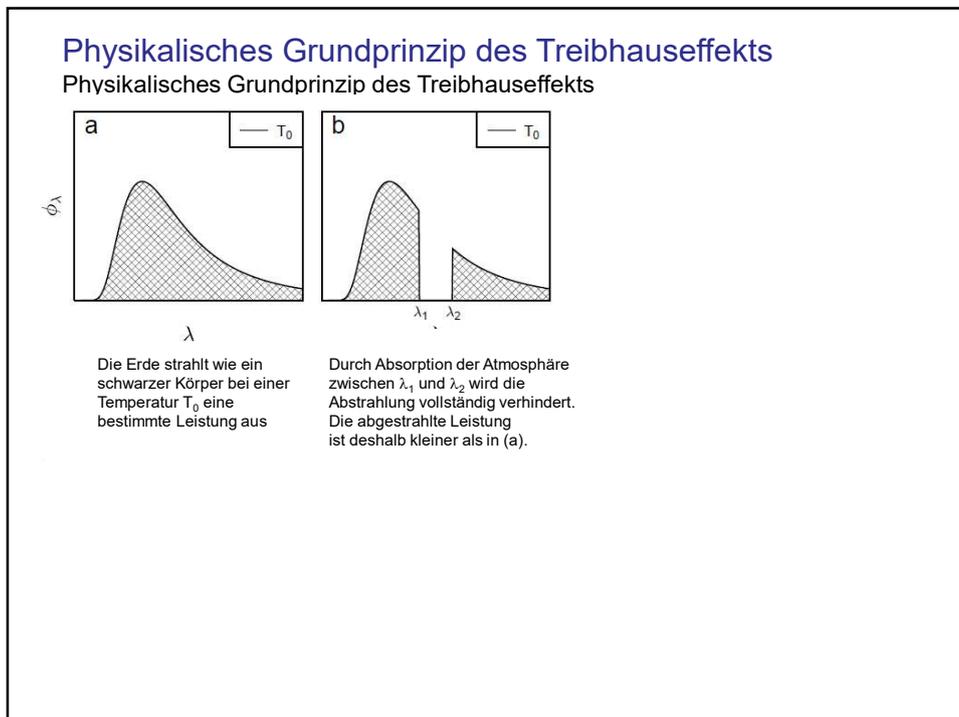
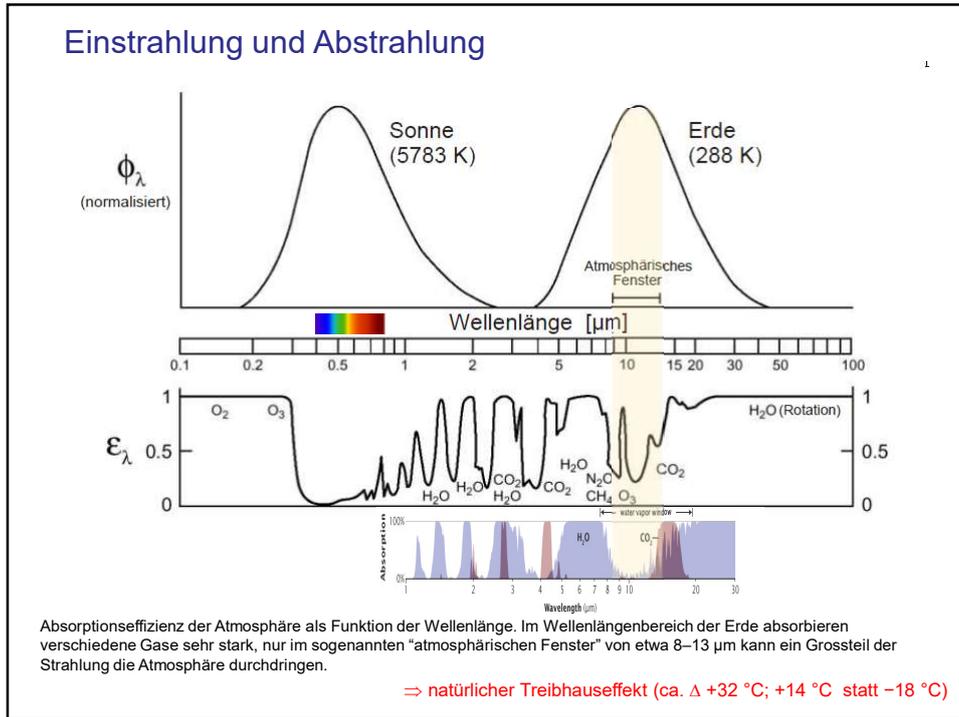
Physikalische Grundlage - Strahlung schwarzer Körper

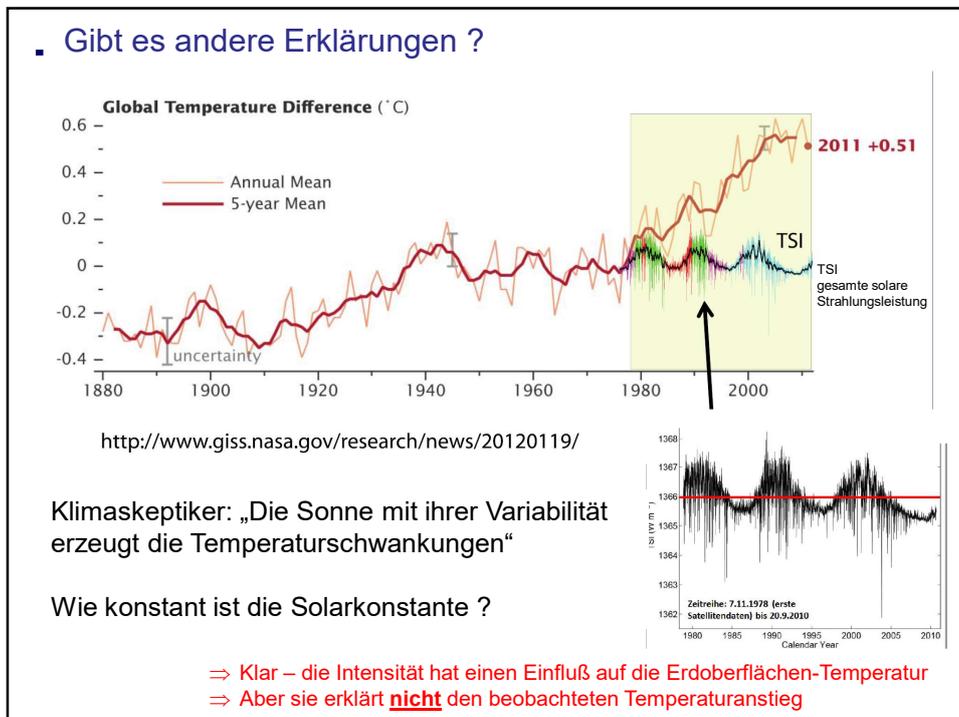
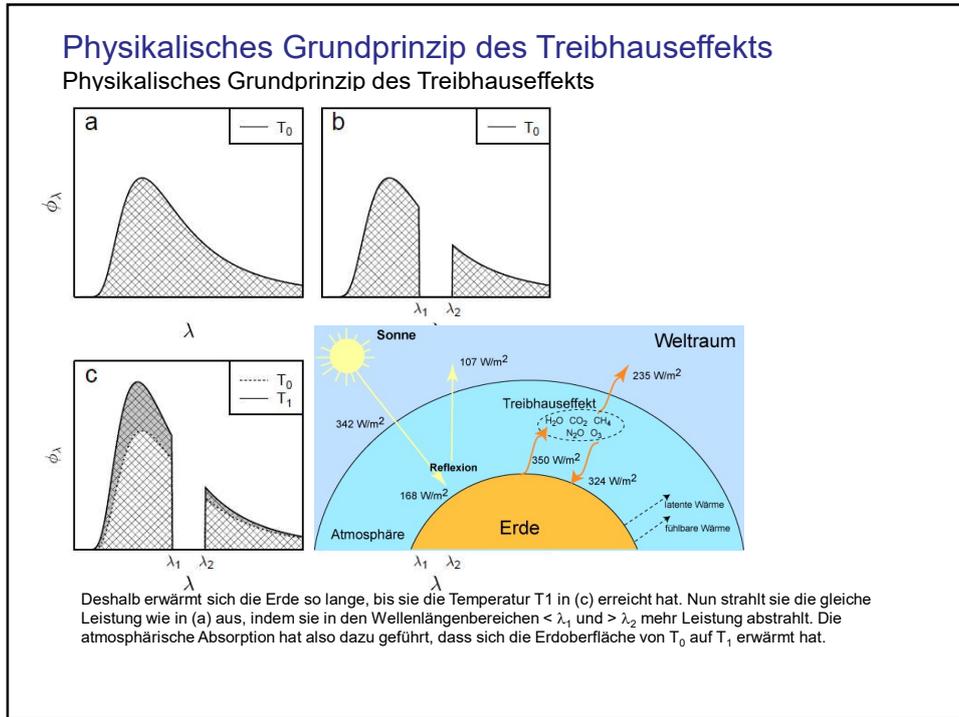
Plancksches Strahlungsspektrum
(elektromagnetischen Energie der Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge)



Spektrale Verteilung der Intensität der Schwarzkörperstrahlung in doppelt-logarithmischer Auftragung







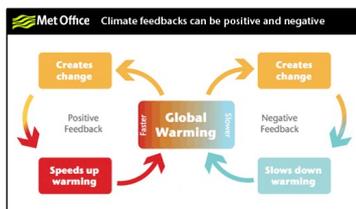
Globales Erwärmungspotential verschiedener Treibhausgase

Gas	Lebenszeit [Jahre]	Globales Erwärmungspotential über den Zeitraum		
		20 Jahre	100 Jahre	500 Jahre
CO ₂	50-200	1	1	1
CH ₄	12	62	23	7
N ₂ O	114	275	296	156
CCl ₃ F (F-11)	45	6300	4600	1600
CCl ₂ F ₂ (F-12)	100	10200	10600	5200
CHClF ₂ (HF-22)	12	4800	1700	540
CHF ₃ (HF-23)	260	9400	12000	10000
SF ₆	3200	15100	22200	32400
CF ₄	50000	3900	5700	8900

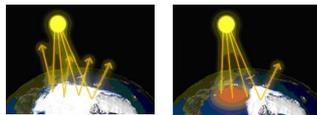
Atmosphärische Lebenszeit und globales Erwärmungspotential verschiedener Treibhausgase. Die Werte für CO₂ sind per definitionem auf 1 normiert. Jedes kg CH₄ ist also über einen Zeitraum von 20 Jahren betrachtet 62 mal effektiver als ein kg CO₂, jedes kg N₂O 275 mal effektiver.

- ⇒ Einfluss des Absorptionsverhaltens
- ⇒ Atmosphärische Lebenszeit
- ⇒ Aufgrund der immensen Mengen CO₂ wichtigstes TG

Rückkopplungen (feedback loops)



Eis-Albedo-Rückkopplung



- Weitere positive Rückkopplungen
- Wasserdampf-Rückkopplung
 - Löslichkeit von Gasen

Negative Rückkopplungen: Stefan-Boltzmann-Gesetz; Vegetation; Wolken

Methan-Rückkopplung



Vereinfachte Darstellung der gegenwärtigen wichtigsten Kohlenstoffreservoirs und -Flüsse in der arktischen Region, einschließlich der Permafrostgebiete an Land, der Festlandsockel und des Ozeans. (nach McGuire et al., 2009)
TgC = 10¹² gC und PgC = 10¹⁵ gC.

Zwischenbilanz

aus: Ad-hoc Stellungnahme der Leopoldina (Nationale Akademie der Wissenschaften)
 Gruppe von Wissenschaftlern, die unabhängig von wirtschaftlichen oder politischen Interessen wichtige gesellschaftliche Zukunftsthemen bearbeitet (Schirmherrschaft Bundespräsident)

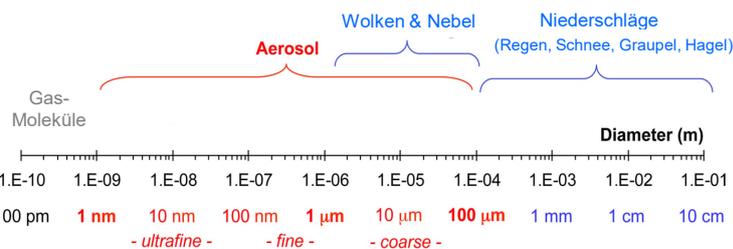
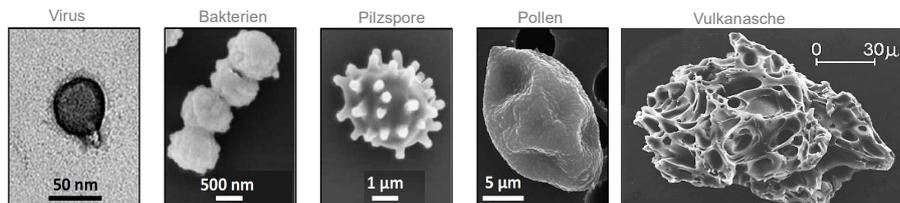
- Die Veränderungen der Atmosphäre /des Ozeans seit Mitte des 20. Jh. sind massiv
- Die globale Erwärmung der Lufttemperatur seit 1900 beträgt mehr als 1°C
- Diese Veränderungen werden verursacht durch den Anstieg der Treibhausgase
- TG gelangen als Abfall aus der Verbrennung von Kohle, Öl und Erdgas in die Atmos.
- Die derzeit erreichte Konzentration von atmosphärischem CO₂ beträgt 419 ppm
 Das gab es letztmals vor 3 Millionen Jahren (pliozänen Warmzeit). Damals war die globale Durchschnittstemperatur 2-3°C höher, Grönland und die Westantarktis hatten keine oder bedeutend weniger Eisbedeckung. Der Meeresspiegel lag etwa 20 Meter höher.
- Die Erwärmung lässt das polare Eis schmelzen — mit weitreichenden Folgen für die Meere und Meeresbewohner

<https://born-at-x-co2.agiliq.com/>

Aerosolpartikel & Wolken

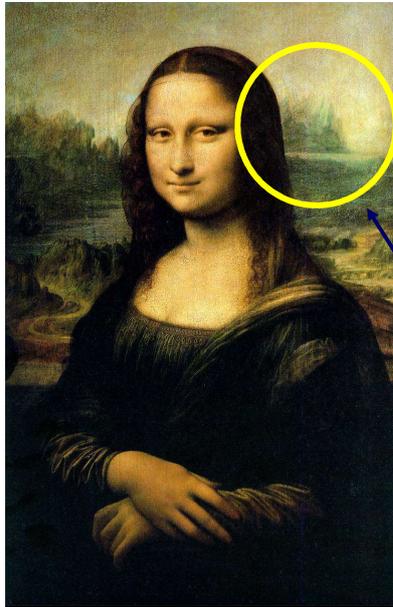
Aerosole: feste & flüssige
 Nano- & Micropartikel

Wolken: feste & flüssige
 Partikel aus Wasser



Fröhlich et al. 2016

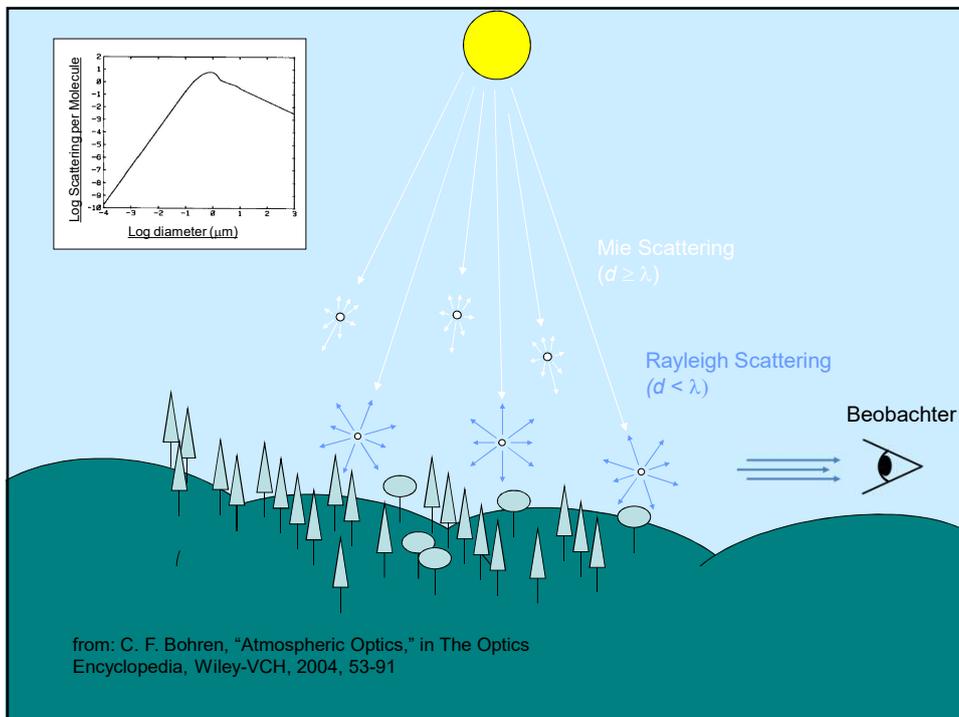
Historisches



Landschaftgemälde (Mitte 19tes Jhd)

„aerial perspective“
Luftperspektive

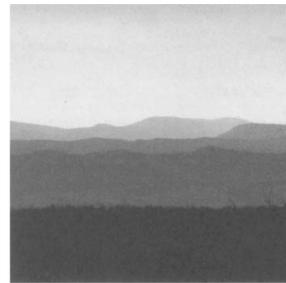
Leonardo da Vinci (1492-1519)
Portrait der Mona Lisa



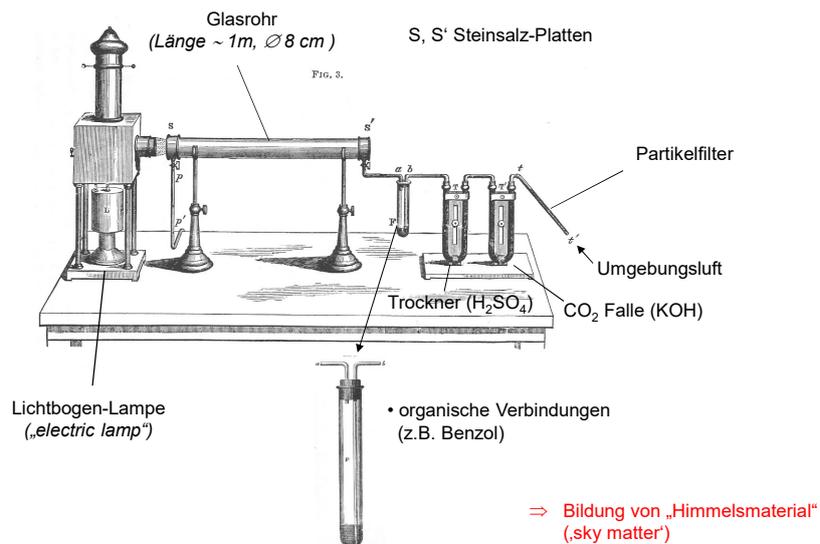
Biogene Aerosolpartikel – “Blue haze”



Blue (Ridge) Mountains, USA, Australien, Jamaika (Great Smoky Mountains)



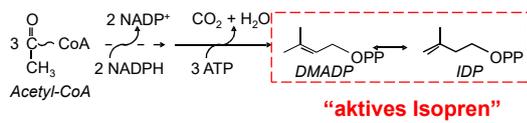
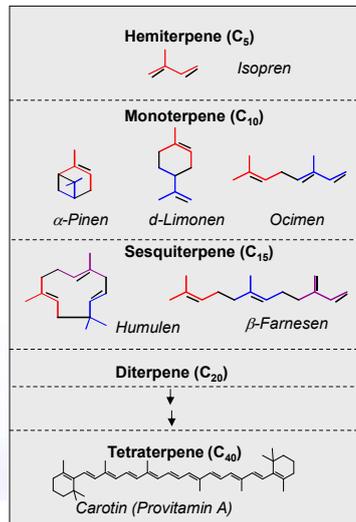
Historisches II



from: John Tyndall, “Fragments of Science” 1892, 96-109, experiments from 1868-69, *New chemical reactions produced by light*



Biogene Kohlenwasserstoffe
Vorläufer zur Aerosolbildung



Biogene Kohlenwasserstoffe Vorläufer zur Aerosolbildung

Waldkiefer (*Pinus sylvestris*)

Cuticula

Spaltöffnungen

Harzkanäle

Hemiterpene (C₅)
Isopren

Monoterpene (C₁₀)
α-Pinen *d*-Limonen Ocimen

Sesquiterpene (C₁₅)
Humulen *β*-Farnesen

Diterpene (C₂₀)

Tetraterpene (C₄₀)
Carotin (Provitamin A)

$$3 \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{C} - \text{CoA} \\ | \\ \text{CH}_3 \end{array} \xrightarrow[2 \text{ NADPH}]{2 \text{ NADP}^+} \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow[3 \text{ ATP}]{\text{DMADP OPP}} \text{IDP OPP}$$

“aktives Isopren”

Zusammenhang zwischen Flüchtigkeit (Dampfdruck) und Oxidation von Kohlenwasserstoffen

$\begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ | & & | \\ \text{C} & - & \text{C} \\ | & & | \\ \text{H} & & \text{H} \end{array}$

Ethan (C₂H₆) **Gas**

$\begin{array}{c} \text{H} & & \text{O} \\ | & & || \\ \text{H} & - & \text{C} \\ | & & | \\ \text{H} & & \text{OH} \end{array}$

Ethansäure (Essigsäure) **Flüssigkeit**
(C₂H₄O₂)

$\begin{array}{c} \text{HO} & & \text{O} \\ | & & || \\ \text{C} & - & \text{C} \\ | & & | \\ \text{O} & & \text{OH} \end{array}$

Ethandisäure (Oxalsäure) **Feststoff**
(C₂H₂O₄)

Abnahme des Dampfdrucks

Volatility (Flüchtigkeit) of oxidation products

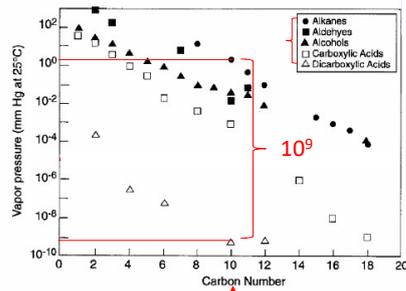
Mechanisms:

Volatility is the key!

VOC $\xrightarrow{\text{rxn}}$ higher polarity, lower volatility products $\xrightarrow{\text{G-P conversion}}$ SOA material

- Typically VOC $\geq C_5$ are effective SOA precursors
 - aromatic hydrocarbons (e.g. toluene, ethylbenzene, xylenes)
 - terpenic biogenic hydrocarbons (e.g. α -pinene, β -pinene)
- Oxidation mechanisms for large VOCs are very complex

VOC = volatile organic compounds
 rxn = reactions (oxidation)
 G-P = Gas-to-particle conversion
 SOA = secondary organic aerosol



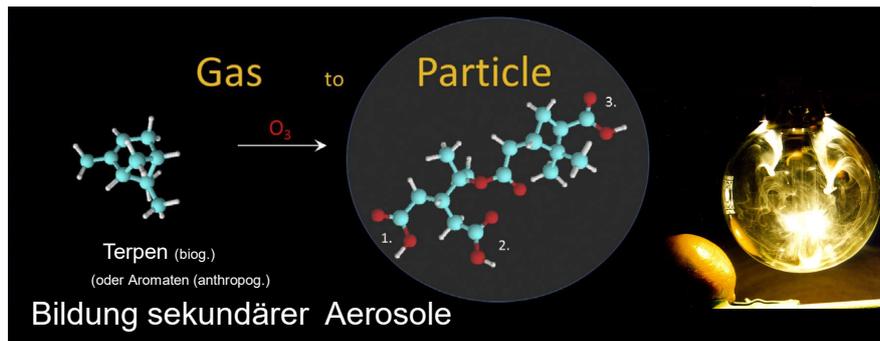
⇒ tremendous decrease in volatility

Vapor pressure depends on:

- 1) the number of carbon atoms in the molecule.
- 2) the number and type of polar functional groups.
- 3) Adding O and/or N atoms reduce volatility.

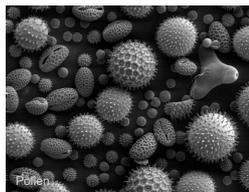
Jose Jimenez Atmospheric chemistry lecture
 CHEM-5151/ATOC-5151

Biogene Aerosolpartikel (primär und sekundär)



Bildung von SOA = secondary organic aerosols aus biogenen oder anthropogenen Vorläufern

primäre Aerosole



BIOAEROSOLE

Menschengemachte (anthropogene) Aerosolpartikel
(primär und sekundär)



Beijing, December 2015

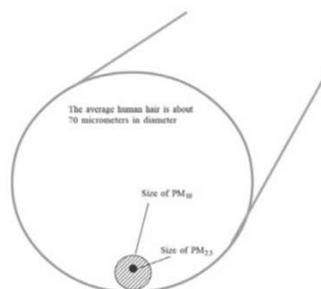
Definition



An aerosol is a relatively stable suspension of fine solid or liquid particles in a gas

Aerosol = Particles = Particulate Matter (PM)

PM_x: Particles with diameters smaller than x µm (e.g., PM_{2.5}, PM₁₀)



Particle Concentration

Particle number concentration (Partikelanzahlkonzentration)

is defined analogous to gas density, that is, the number of particles per unit volume of gas – often denoted as particles/cm³.

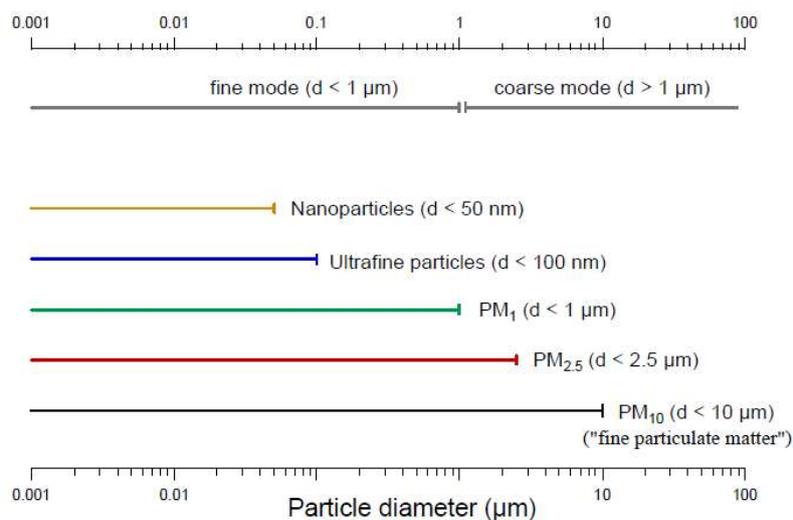
- ⇒ polluted urban atmosphere about 10⁵ cm⁻³ or higher
- ⇒ less polluted regions about 10⁴ cm⁻³

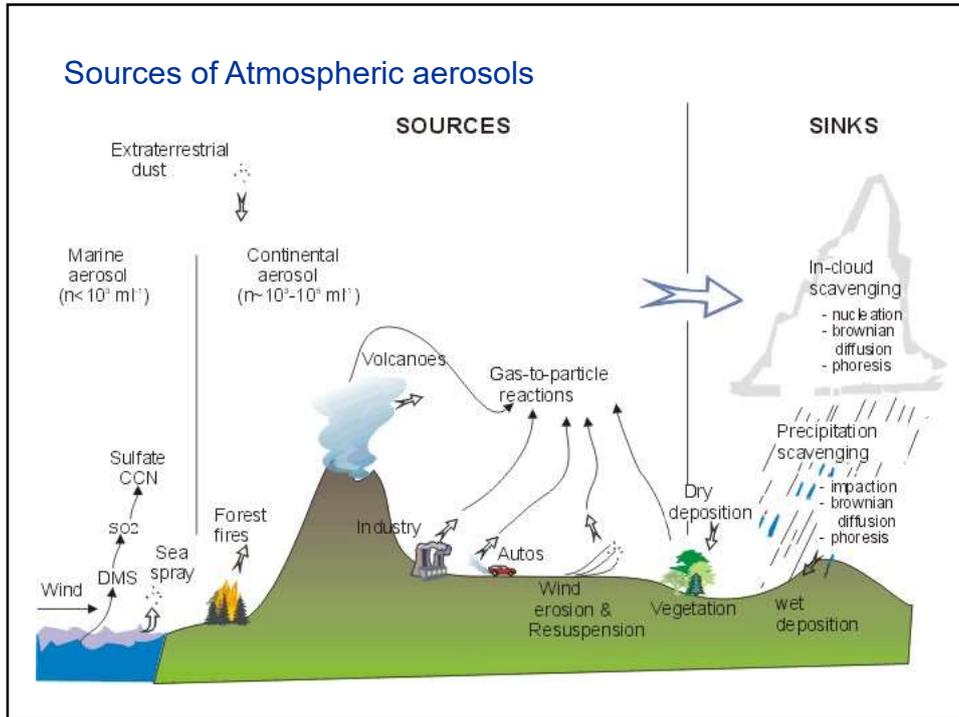
Particle mass concentration (Partikelmassenkonzentration)

is usually determined by filtering a known volume of air and weighing the collected particles. The average mass concentration over the measurement time is obtained by dividing the measured particulate mass by the volume of gas filtered. The most common units for mass concentration are µg/m³.

- Atmospheric aerosol mass concentrations range from about
- ⇒ 10 µg m⁻³ for unpolluted air to
- ⇒ 200 µg m⁻³ for polluted air

Terminology for particle size ranges



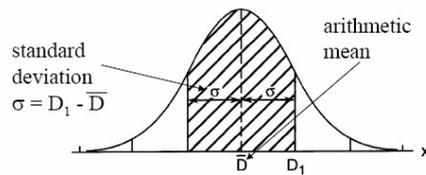


Sources and estimates of global emissions of atmospheric aerosols

Source	Amount, Tg/yr [10^6 metric tons/yr]	
	Range	Best Estimate
<i>Natural</i>		
Soil dust	1000–3000	1500
Sea salt	1000–10000	1300
Botanical debris	26–80	50
Volcanic dust	4–10000	30
Forest fires	3–150	20
Gas-to-particle conversion ^b	100–260	180
Photochemical ^c	40–200	60
Total for natural sources	2200–24000	3100
<i>Anthropogenic</i>		
Direct emissions	50–160	120
Gas-to-particle conversion ^d	260–460	330
Photochemical ^e	5–25	10
Total for anthropogenic sources	320–640	460

Mathematical description of size distributions

Normal distribution (bell shaped)



- A normal distribution is fully characterized by the \bar{D} and the σ
- 68% of the particles have sizes in the range of $\bar{D} \pm \sigma$

FIGURE 9.12 Meaning of standard deviation for a normal distribution. The hatched area represents 68% of total area under curve. *Finlayson-Pitts & Pitts*

The size distributions of atmospheric aerosols are best described by lognormal distributions (i.e., the logarithm of particle sizes is normally distributed).

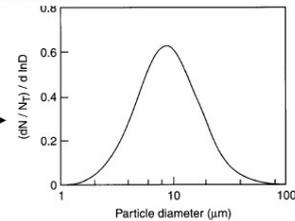
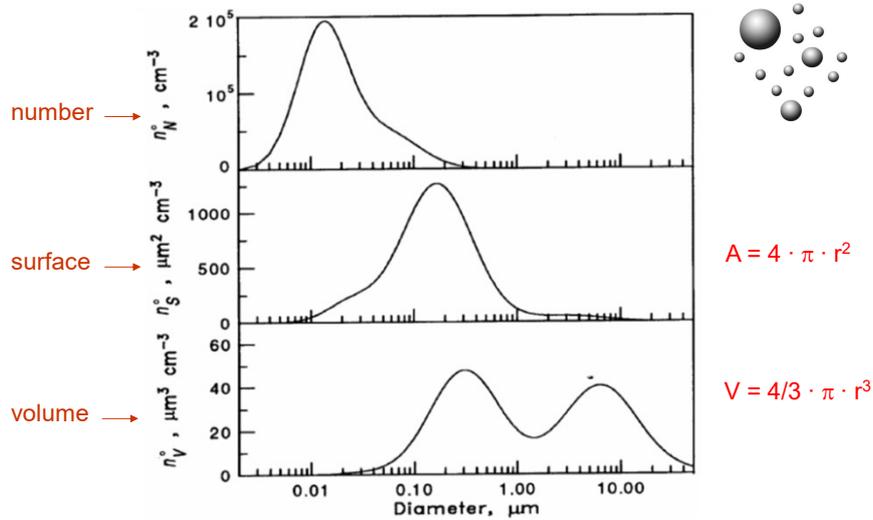
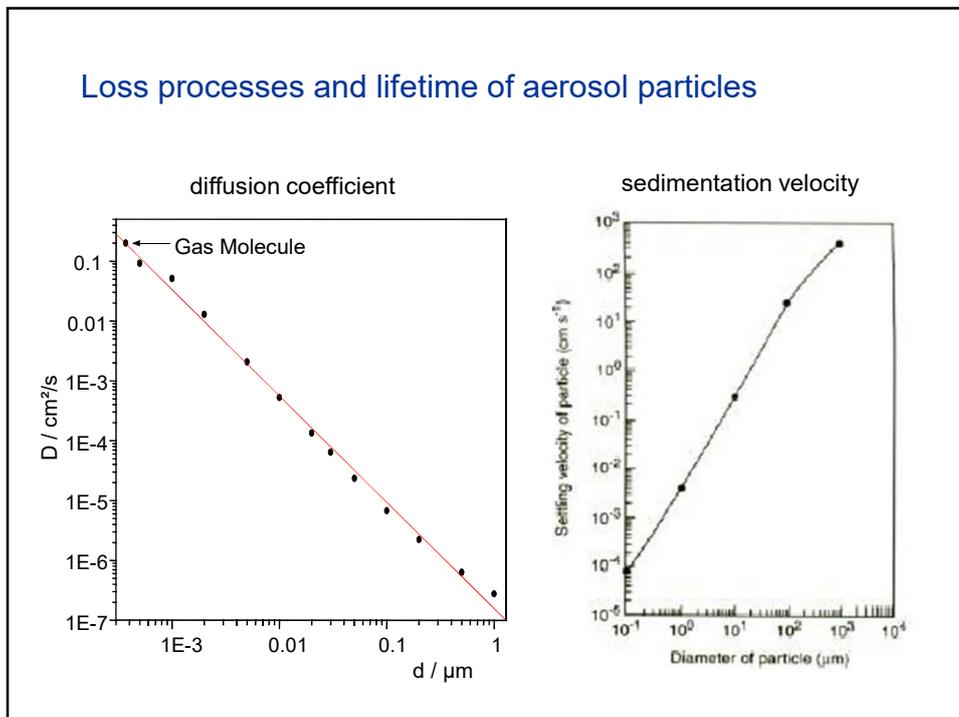
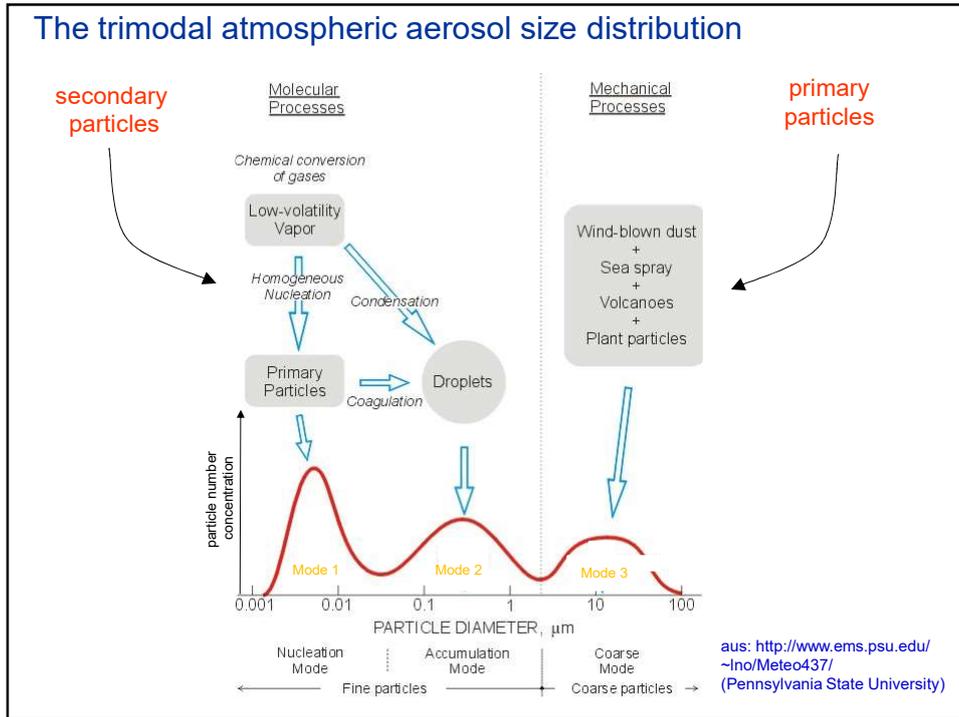


FIGURE 9.13 Frequency distribution curve (logarithmic size scale) (adapted from Hinds, 1982). *Finlayson-Pitts & Pitts*

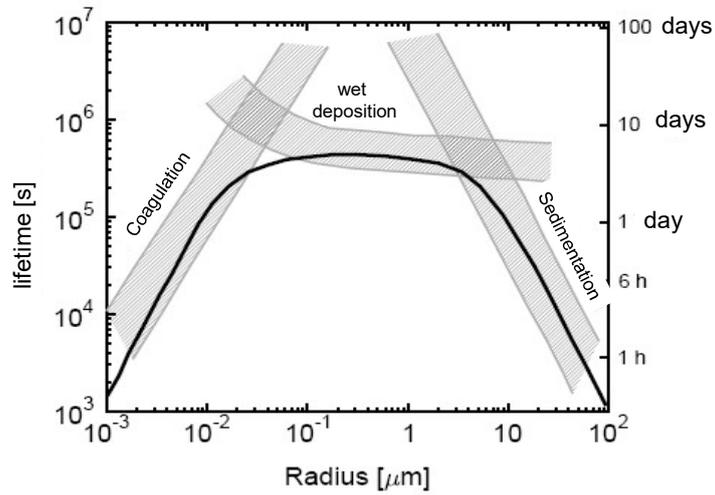
Typical tropospheric size distributions



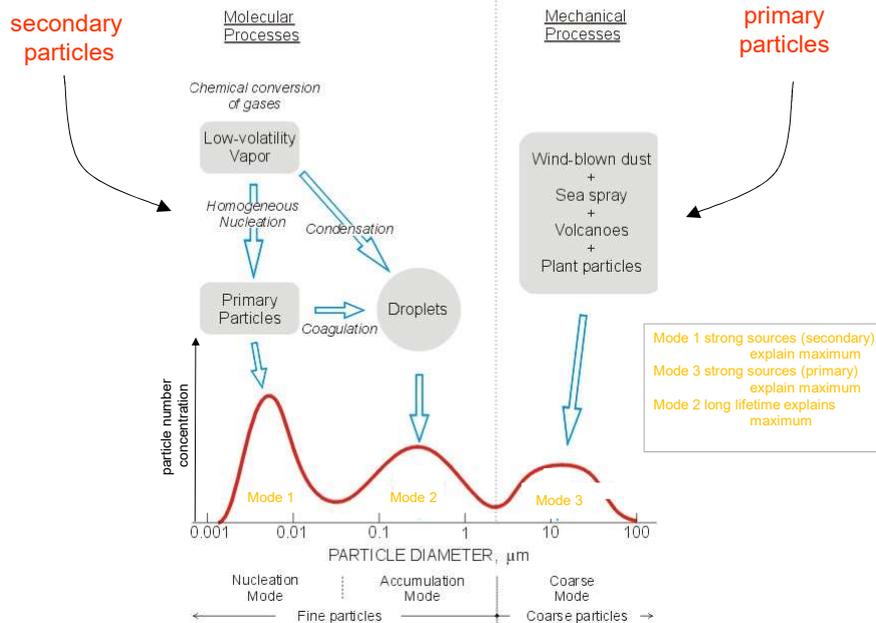
from: Seinfeld and Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics*



Lifetime of aerosol particles in the atmosphere

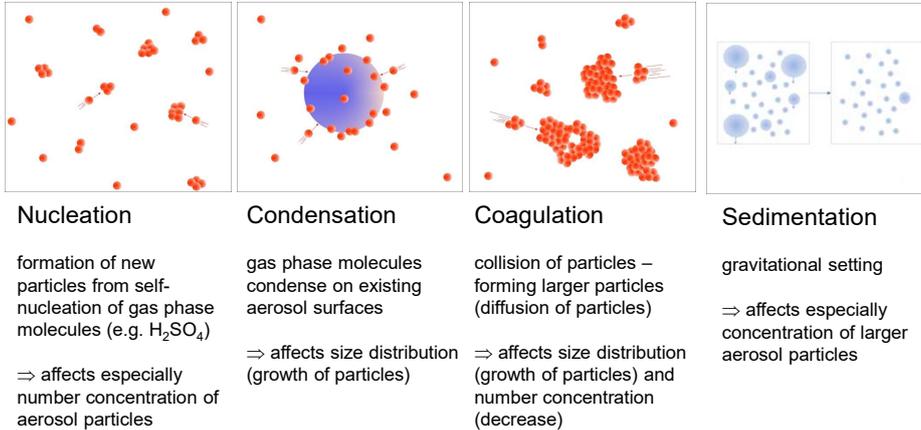


The trimodal atmospheric aerosol size distribution

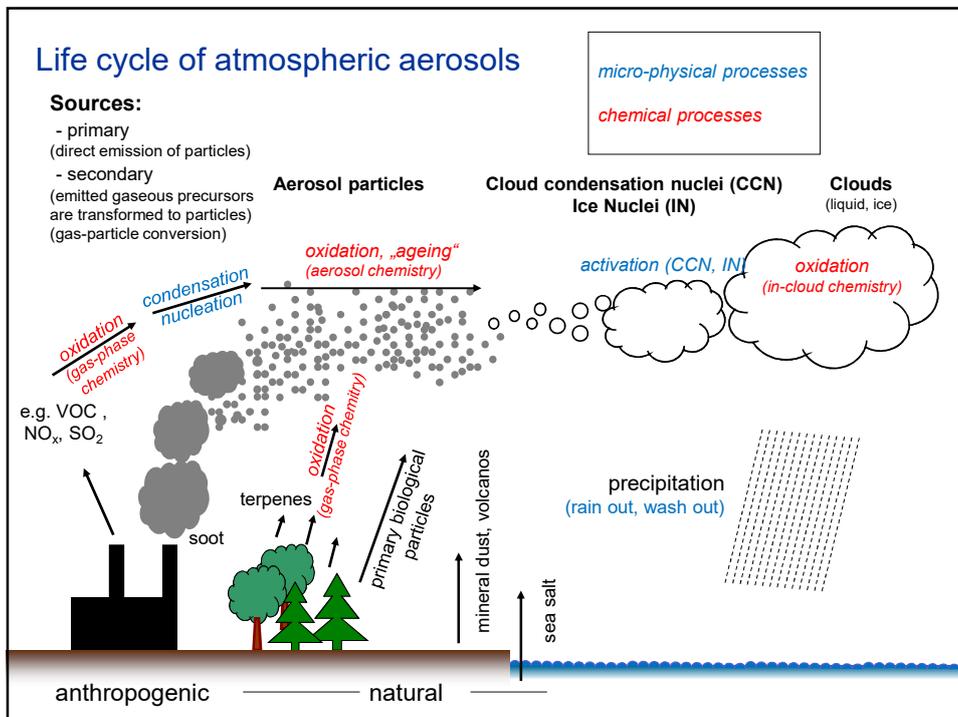


Typical tropospheric size distributions

Mechanisms for altering the size distribution

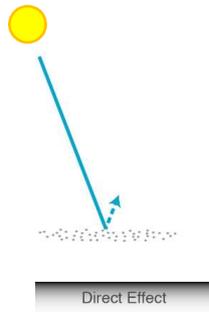


Life cycle of atmospheric aerosols



Wirkung von Aerosolen auf den Strahlungshaushalt

Direkte Wirkung von Aerosolen

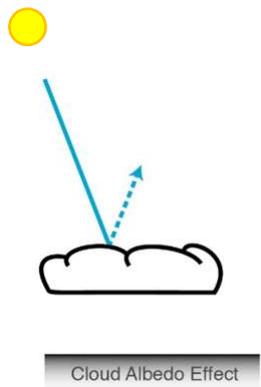


Satellitenbilder von New South Wales Waldbränden in Australien am 16. Dezember 2019

⇒ Aerosole reflektieren, streuen und absorbieren einfallendes Sonnenlicht

Wirkung von Aerosolen auf den Strahlungshaushalt

Indirekte Wirkung von Aerosolen

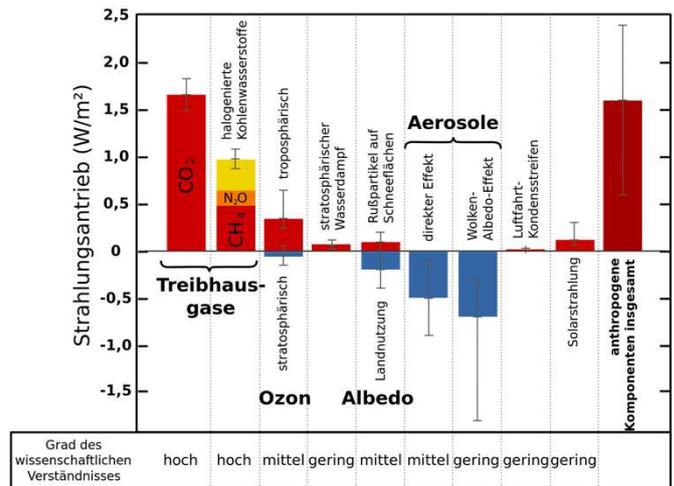


Satellitenbilder vom Nordpazifik

⇒ Wolken-Albedo-Effekt (Aerosole als Wolkenkondensationskerne)

Film Experiment Aerosole
als Wolkenkonden-
sationskeime

Komponenten des Strahlungsantriebs

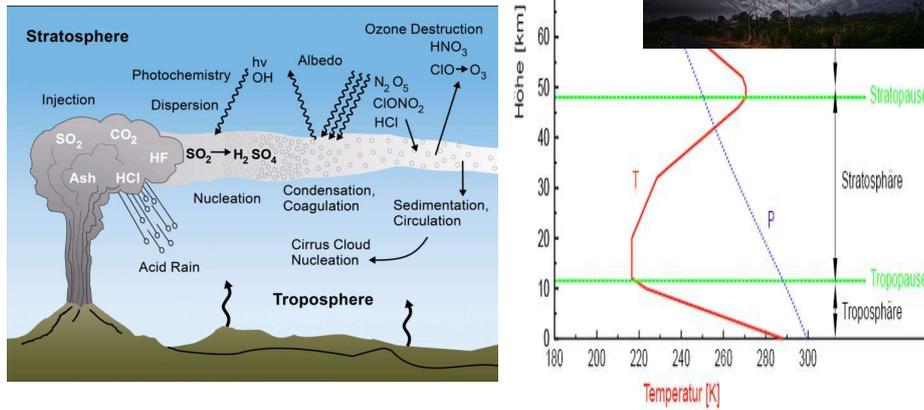


Komponenten des Strahlungsantriebs der globalen Erwärmung im Jahr 2005 bezogen auf das Referenzjahr 1750 und ihr Nettoeffekt auf den Wärmehaushalt der Erde.

IPCC (Weltklimarat) Third Assessment Report, Working Group I: The Scientific Basis

Intermezzo: Vulkane, Aerosole und Klima

Auch Vulkanausbrüche können Folgen für das Klima haben (natürliche Vorgänge unseres Planeten)



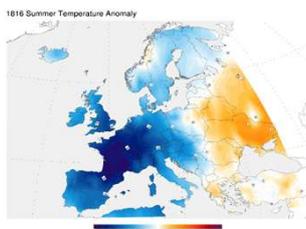
⇒ globale Folgen erst bei sehr großen Vulkanausbrüchen, besonders dann, wenn Stoffe bis in die Stratosphäre geschleudert werden

Vulkane, Aerosole und Klima – historische Beobachtungen

Als das „Jahr ohne Sommer“ wird das vor allem im Nordosten Amerikas und im Westen und Süden Europas ungewöhnlich kalte Jahr 1816 bezeichnet.

Als Hauptursache wird heute der Ausbruch des indonesischen Vulkans Tambora im April 1815 angesehen

- ⇒ Ernteeinbußen
- ⇒ Hungersnot
- ⇒ Überschwemmungen
- ⇒ Auslöser für Völkerwanderung und politische Unruhen



⇒ große Vulkanausbrüche können zu einer Abkühlung der Erdoberflächentemperatur führen

Zerefos et al., Atmos. Chem. Phys., 2007

Vulkane, Aerosole und Klima – historische Beobachtungen

Aber auch andere Thesen - Anregung von Weltliteratur !?

Hat der Ausbruch des Tambora und die Folgen des „Jahres ohne Sommer“ zur Erschaffung von „Frankenstein“ durch Mary Shelley geführt?

- Im Sommer 1816 hält sich Mary Shelley zusammen mit anderen Dichtern/Schriftstellern am Genfer See auf
- Das außergewöhnlich schlechte Wetter zwingt die Gruppe im Haus zu bleiben und führt schließlich zu einer Art Wettbewerb Gruselgeschichten zu schreiben, Es entstehen:
- „Frankenstein“ (M. Shelley)
- „Darkness“ (Lord Byron)
- "The Vampyre" (J. Polidori)



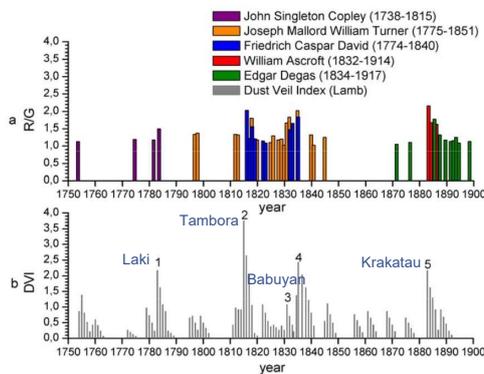
"Wir beobachten die Gewitter, wenn sie sich von der gegenüberliegenden Seite des Sees nähern, und beobachten, wie die Blitze zwischen den Wolken in verschiedenen Teilen des Himmels spielen und in zackigen Figuren über die kiefernbewachsenen Höhen des Juragebirges huschen, die vom Schatten der überhängenden Wolke verdunkelt werden, während vielleicht die Sonne fröhlich auf uns scheint,

Aus dem Tagebuch von M. Shelley (1816)

Marshall et al., The Tambora -Frankenstein Myth: The Monster Inspired, Bulletin of Research in the Humanities 2(2):217-235, 2019

Vulkane, Aerosole und Klima – historische Beobachtungen

Atmosphärische Effekte von Vulkanausbrüchen, wie sie von Künstlern gesehen und in ihren Gemälden dargestellt wurden.



Nicht-vulkanischer Sonnenuntergang, William Turner 1828



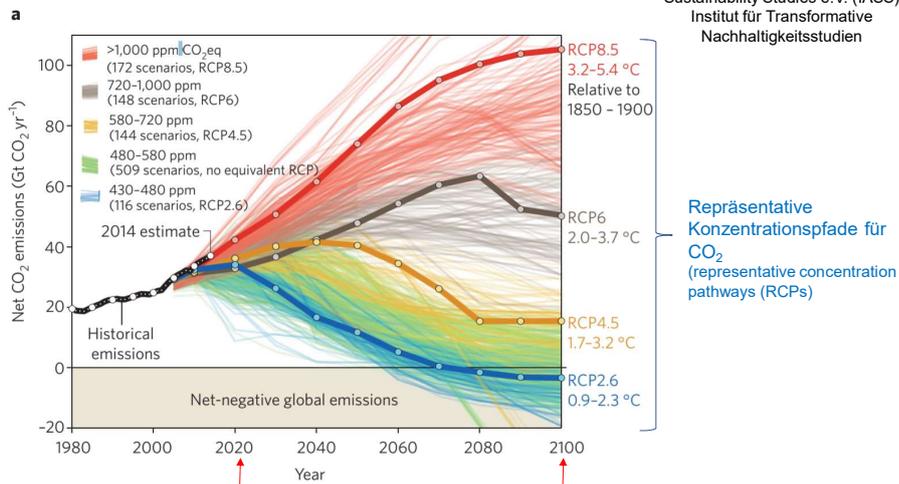
Vulkanischer Sonnenuntergang, William Turner 1833 (Ausbruch Vulkan Babuyan 1831)

Zerefos et al., Atmos. Chem. Phys., 2007

Jetzt geht's in die Zukunft: Szenarien für globale Kohlendioxidemissionen



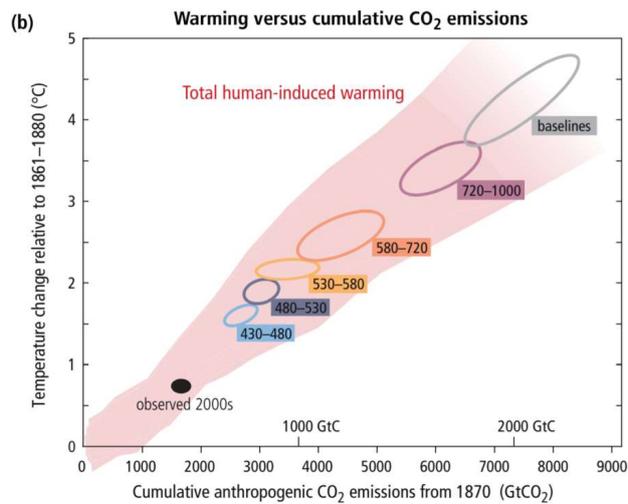
Institute for Advanced Sustainability Studies e.V. (IASS)
Institut für Transformativ Nachhaltigkeitsstudien



⇒ bei RCP2.6: 66% der Modelle bleiben unter 2°C bis 2100

Fuss et al., (2014) Nature Climate Change

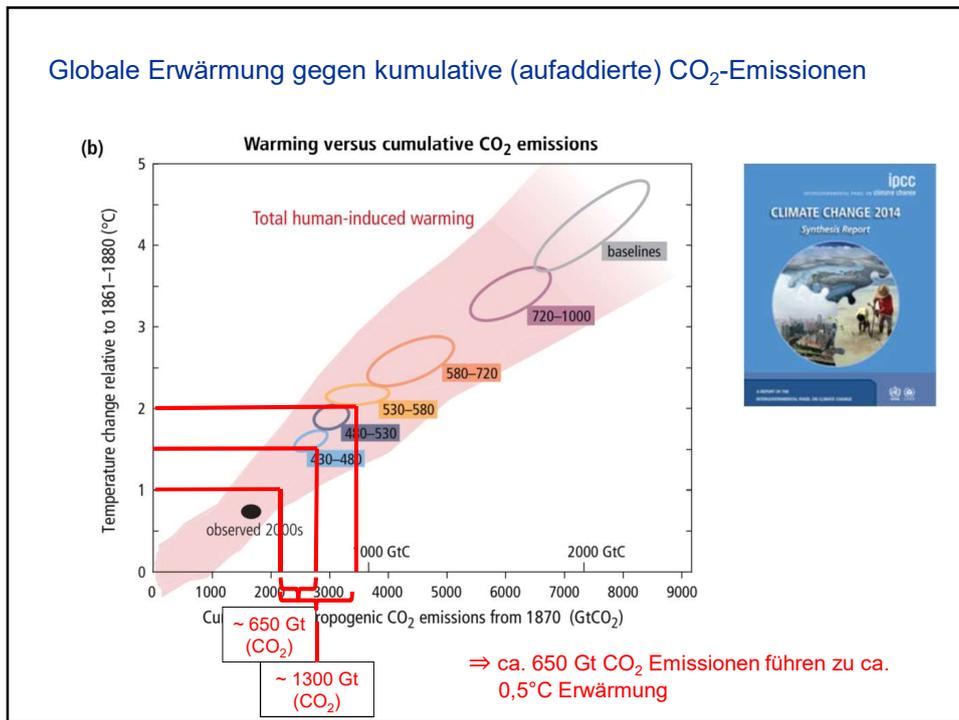
Globale Erwärmung gegen kumulative (aufaddierte) CO₂-Emissionen



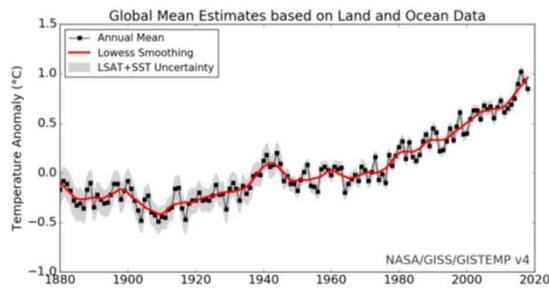
⇒ ungefähr linearer Anstieg der Temperaturen mit kumulativen CO₂ Emissionen

⇒ Klimaziele: unter 2 °C besser unter 1,5 °C (Weltklimarat)

Globale Erwärmung gegen kumulative (aufaddierte) CO₂-Emissionen



CO₂-Budget



⇒ ca. 650 Gt CO₂ Emissionen führen zu ca. 0,5°C Erwärmung

Gegenwärtige globale CO₂ Emissionen: ~40 Gt (CO₂)/Jahr

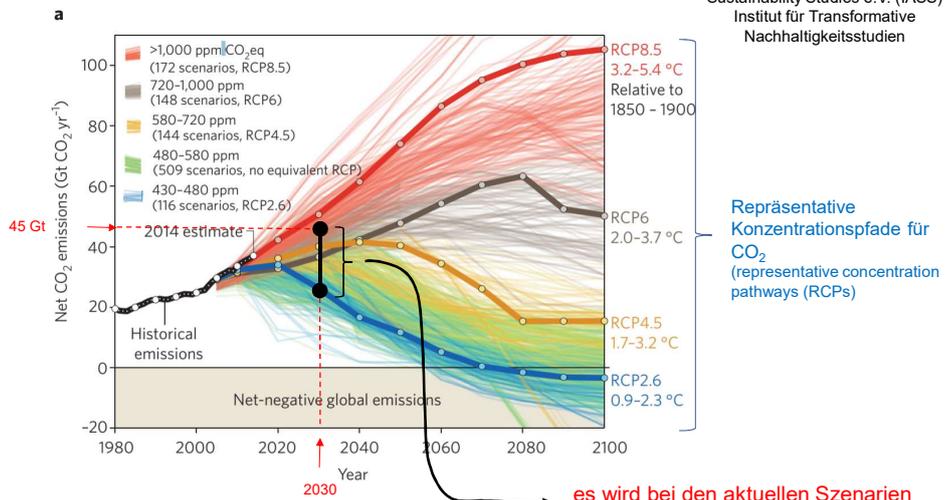
Emissionen in 2030, wenn alle NDCs* erreicht werden? ~ 40 – 50 Gt (CO₂)/Jahr

*NDCs = "Nationally Determined Contributions" National festgelegte Beiträge, im Übereinkommen von Paris (Paris Agreement) nationale festgelegte Klimaschutzziele

Szenarien für globale Kohlendioxidemissionen



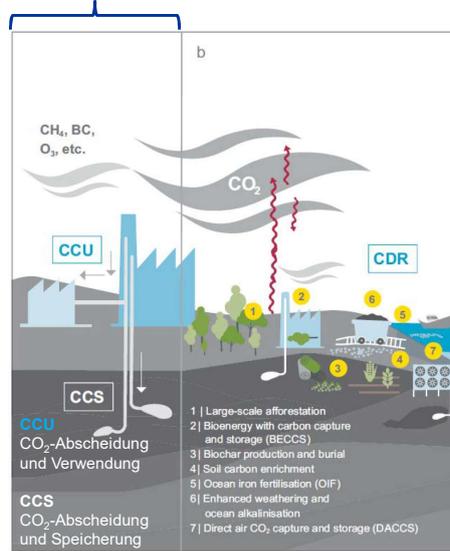
Institute for Advanced Sustainability Studies e.V. (IASS)
Institut für Transformative Nachhaltigkeitsstudien



Fuss et al., (2014) Nature Climate Change

Wie?!?

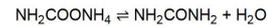
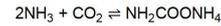
Strategien zur Minderung der CO₂-Emissionen



1) Methanolsynthese (Carbon Recycling International, Island)

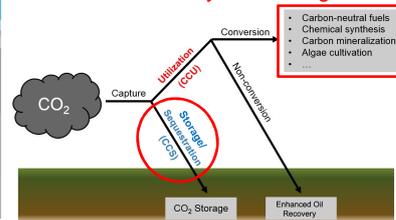


2) Harnstoffsynthese



3) CO₂ Mineralisierung – mit MgO oder CaO (Industrielle Abfallprodukte) zu Carbonaten (Baumaterialien)

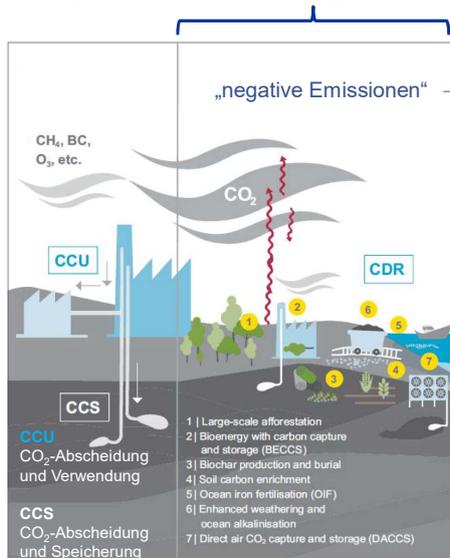
⇒ „Green Chemistry“-Forschung



Storage => Speicherung ist in ausgebeuteten Gas- oder Erdöllagerstätten, in salinen Aquiferen oder im Meeresuntergrund möglich

Lawrence et al., Nature Communications (2018)

Strategien zur Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre



CDR Carbon Dioxide Removal

„negative Emissionen“ → CO₂ Geoengineering

- 1 | Großflächige globale Aufforstung
- 2 | Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung
- 3 | Biokohleherstellung und Sequestrierung
- 4 | Kohlenstoffanreicherung in Böden
- 5 | Eisendüngung der Meere
- 6 | Beschleunigte Verwitterung von Gesteinen
- 7 | Direkte CO₂-Entnahme aus der Luft und Speicherung

AUFFORSTEN VON WÄLDERN

IDEE Bäume betreiben Photosynthese, entziehen dabei der Atmosphäre CO₂ und lagern den Kohlenstoff beispielsweise als Bestandteil von Zellulose und Lignin ein – je nach Lebensalter des Baumes für Jahrhunderte. Holz, das als Baustoff verwendet wird, speichert den Kohlenstoff sogar noch länger.

POTENZIAL Neu gepflanzte Bäume könnten bis zum Jahr 2100 etwa ein Viertel des derzeit in der Atmosphäre enthaltenen CO₂ aufnehmen.

RISIKEN Hierfür würden mindestens acht Millionen Quadratkilometer Land benötigt – etwa die Größe Brasiliens. Die neuen Waldflächen würden für Ackerbau fehlen und somit die Nahrungsversorgung der Weltbevölkerung gefährden.



Fazit

⇒ kein Schaden fürs Klima wenn zusätzliche Waldflächen geschaffen werden

⇒ aktuelle Schätzungen gehen von 120-450 Gt CO₂ bis zum Jahr 2100 aus

aber:

- momentan teilweise gegenläufige Entwicklung (z.B. Brasilien – Rodung im Amazonasgebiet – kein anderes Ökosystem entzieht soviel CO₂ wie die Regenwälder)
- Waldbrände – mit steigenden Temperaturen nehmen diese zu (Australien 2020)
- Konkurrenz Wald – landwirtschaftliche Nutzflächen (ähnlich wie Nutzungskonkurrenz Energie- und Nahrungspflanzen)



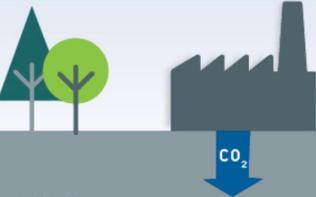
aus: „Helmholtz Perspektiven 04/2018“

CO₂-ABSCHEIDUNG UND -SPEICHERUNG (CCS) BECCS

IDEE Bei der Verbrennung von Brennstoffen wie Kohle oder Erdgas entsteht CO₂. Dieses könnte aus dem Abgas einer Anlage (beispielsweise eines Kohlekraftwerks) abgenommen und gelagert werden. Eine andere Variante ist BECCS: Hier werden schnell wachsende Pflanzen, die der Atmosphäre CO₂ entziehen, zur Bioenergiegewinnung verbrannt. Das dabei freigesetzte CO₂ wird herausgefiltert und eingelagert.

POTENZIAL Bei sofortigem Start ließen sich ab dem Jahr 2050 jährlich zwischen 2,4 und 11 Milliarden Tonnen CO₂ aus der Atmosphäre entfernen.

RISIKEN CCS verbraucht viel Energie. Der Wirkungsgrad der Kraftwerke verschlechtert sich durch die energieintensive CO₂-Abscheidung erheblich. BECCS wiederum benötigt viel Düngemittel, Wasser und Land. Die Speicherung von CO₂ ist in Deutschland hoch umstritten.



BECCS - Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung

Fazit

- aktuelle Schätzungen gehen von ca. 700 Gt CO₂ bis zum Jahr 2100
- in Bezug auf Flächenverbrauch & Biodiversität ist es sehr umstritten, ob BECCS-Anlagen tatsächlich in der Lage sein werden, große Mengen negativer Emissionen zu realisieren [Anderson et al., Science, 2016]

aus: „Helmholtz Perspektiven 04/2018“

BESCHLEUNIGTE VERWITTERUNG VON GESTEIN

Granit, Olivin (Silikate)

IDEE Verschiedene Gesteine enthalten Minerale, die mit CO₂ chemisch reagieren und es binden. Durch das Ausbringen solcher Gesteinspulver im Meer oder an Land ließe sich die CO₂-Aufnahme künstlich verstärken.

POTENZIAL Durch das Ausbringen von Mineralen im Meer könnten zwischen zehn Millionen und fünf Milliarden Tonnen CO₂ aus der Atmosphäre entfernt werden; an Land circa zwei bis vier Milliarden Tonnen.

RISIKEN Es müssten mit hohem Energieeinsatz jährlich bis zu zwölf Milliarden Tonnen Gesteine gewonnen, gemahlen und ausgebracht werden. Dafür wäre eine Art neue Bergbauindustrie notwendig. Giftige Schwermetalle könnten bei Verwendung ungeeigneter Gesteine freigesetzt werden.

Carbon Regulation

CO₂ and H₂O forms carbonic acid

Silicate Weathering

$$2(\text{CO}_2) + 3(\text{H}_2\text{O}) + \text{CaSiO}_3 = \text{Ca}^{2+} + 2(\text{HCO}_3^-) + \text{H}_4\text{SiO}_4$$

Fazit

- wäre prinzipiell geeignet ohne den Flächenbedarf z.B. bei Aufforstung oder BECCS
- Aktuelle Schätzungen gehen von > 1000 Gt CO₂ bis zum Jahr 2100 aus

aber:

- Sehr hoher Energieeinsatz
- Sehr hohe Kosten (> 1000\$/t(CO₂))

Goll et al.; Potential CO₂ removal from enhanced weathering by ecosystem responses to powdered rock, 2021, Nature Geoscience, <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00798-x>

OZEANDÜNGUNG

IDEE Mikro- und Makronährstoffe wie Phosphor, Stickstoff und Eisen werden ins Meer eingebracht, um Algen zum Wachstum anzuregen. Sie binden über Photosynthese CO₂ in Biomasse.

POTENZIAL Gelänge es, alle ungenutzten Nährstoffe des Südozeans in den nächsten 100 Jahren in Phytoplanktonbiomasse umzuwandeln, könnten 15 Prozent des anthropogenen CO₂-Ausstoßes kompensiert werden. Freilandexperimente zeigten jedoch, dass die Algen sich nur kurzfristig vermehren. Eine nennenswerte Bindung von CO₂ in die Tiefe konnte nicht nachgewiesen werden.

RISIKEN Die Düngung müsste über sehr lange Zeiträume aufrechterhalten werden, um den atmosphärischen CO₂-Gehalt nachhaltig zu beeinflussen. Unerwünschte Auswirkungen auf die Tier- und Pflanzenwelt sind kaum abschätzbar.

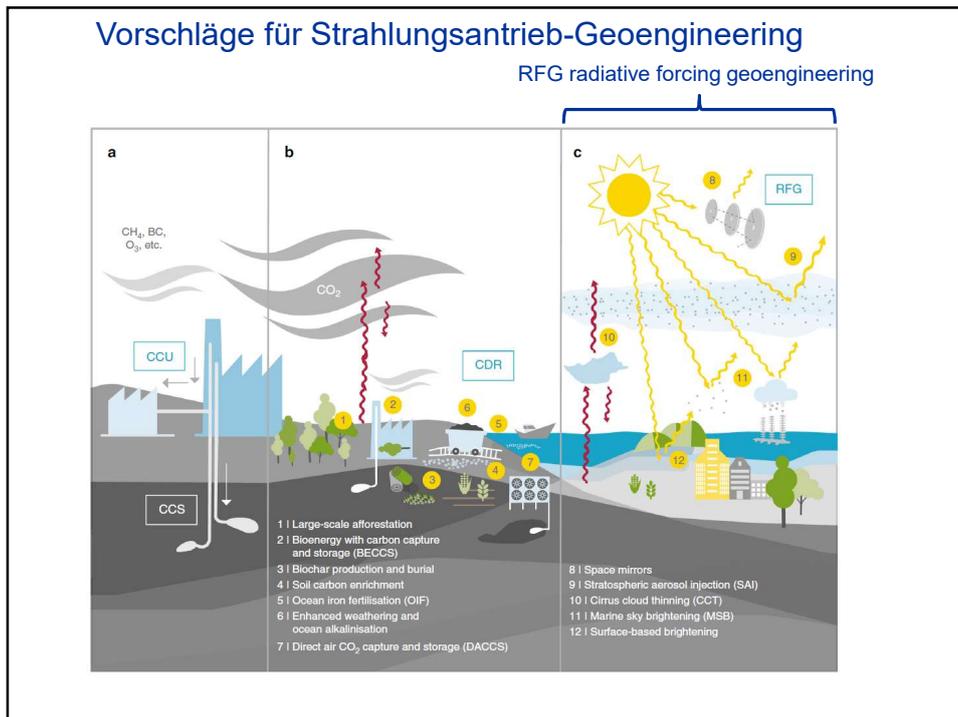
Fazit

- aktuelle Schätzungen gehen von < 400 Gt CO₂ bis zum Jahr 2100 aus
- wenig

und:

- wahrscheinlich beträchtliche „Nebenwirkungen“ auf die maritimen Ökosysteme sowie zusätzlich Emissionen von Treibhausgasen (N₂O) [Schäfer et al., EuTRACE, 2015]

aus: „Helmholtz Perspektiven 04/2018“



REFLEKTIERENDE AEROSOLE (vgl. Vulkane, Aerosole und Klima)

IDEE Feste Schwebstoffe wie beispielsweise Sulfatpartikel werden in der Stratosphäre ausgebracht und reflektieren einfallendes Sonnenlicht.

POTENZIAL Das Vorbild sind Vulkanausbrüche, bei denen Asche und Schwefeldioxid eine Abkühlung von bis zu einigen Zehntel Grad Celsius hervorrufen. Neuere Studien zeigen aber, dass dafür mehr Sulfat ausgebracht werden müsste als bislang angenommen.

RISIKEN Die Atmosphäre würde sich verdunkeln und die Methode wahrscheinlich dazu führen, dass sich Regengebiete verlagern. Das Sulfat könnte den Ozonabbau in der Stratosphäre verstärken. Pflanzen und Tiere könnten größere Anpassungsprobleme haben.

SAI – Stratosphärische Aerosolinjektionen

Fazit

- aktuelle Abschätzungen gehen von einem hohen Potential aus

aber:

- regelmäßige Aerosolinjektionen notwendig
- extrem hohe Kosten
- extrem schwierige technische Umsetzungen
- extrem unklare Auswirkungen
- besser nicht....

aus: „Helmholtz Perspektiven 04/2018“

Link zu Folie 2

Stratospheric Aerosol Injection (SAI)

- kontroverse Diskussion

„SAI würde die Strahlungsbilanz der Erde verändern und ist zudem mit beträchtlichen Risiken und Unwägbarkeiten verbunden, wie z. B. den Auswirkungen auf extreme Wetterereignisse, Ökosysteme, Niederschlagsmuster, landwirtschaftliche Erträge, die Ozonchemie, die Solarenergieerzeugung, die menschliche Gesundheit und vieles mehr.“

Heinrich Böll Stiftung 2020

- ebenfalls sehr kritisch

[Institute for Advanced Scientific Studies \(iass\)](#)

- aber auch Wissenschaftler die zumindest die Forschung dazu befürworten, z.B. Harvard University (David Keith, Frank Keutsch)

[The Scopex Project \(Stratospheric Controlled Perturbation Experiment\)](#)

Schlußbilanz Handlungsmöglichkeiten ‚Geoengineering‘

•Maßnahmen zur Minderung der CO₂ Emissionen aber auch Entwicklungen zur aktiven Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre (Aufforstung, Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und –Speicherung oder Verwendung) sind als zusätzliche Maßnahmen (Emissionsminderung weiterhin von höchster Wichtigkeit) sinnvoll und sollten entwickelt und eingesetzt werden

- Geoengineering will die Auswirkungen der Klimaerwärmung mildern – sozusagen als Notbremse / letztes Mittel....
- Einige Techniken könnten den Planeten schnell abkühlen, aber...:
- Viele Unsicherheiten: Technologie, Effektivität, Nebenwirkungen....

z.B. Inhomogene regionale Auswirkungen auf Temperatur und Niederschlag

Schlußbilanz Handlungsmöglichkeiten ‚Geoengineering‘

- Ablenkung von anderen Auswirkungen von erhöhtem CO₂ (z.B. Versauerung der Meere)
- Zahlreiche ethische Bedenken und moralisches Risiko - Setzen von Fehlanreizen
„Ein moralisches Risiko droht, wenn Individuen davon befreit werden, für potentiell kostspielige Folgen ihres Handelns selbst einzustehen, weil diese Kosten anderweitig übernommen werden“
- extrem schwierige Umsetzung (Governance – Führung)
- wesentlicher Beitrag – wenn überhaupt – erst in zweiter Hälfte des Jahrhunderts wahrscheinlich (d.h., zu spät um zum 2°C Ziel wesentlich beizutragen...)
- 'Geo-Engineering' ist **keine Alternative zu Emissionsminderungen**. Es ist noch kaum erforscht, wird sehr teuer und hat erhebliche Nebenwirkungen

Agenten des Wandels

⇒ große gesellschaftliche, politische und technologische Veränderungen sind erforderlich um die Industriegesellschaft zukunftsfähig zu machen

"Change Agents" ("Agenten des Wandels")



Impressionen der Fridays for Future-Demo in Mainz am 20.9.2019. (Foto: Sascha Kopp)

Danke für Ihre Aufmerksamkeit