



UZH - Weiterbildung für Lehrpersonen an Maturitätsschulen

Elemente der Quantenphysik an Maturitätsschulen

Unterrichtsvorschläge und ein **Seitenblick auf die Klimaphysik**

Klima- und Quantenphysik im Gymnasium verbinden *Hintergründe & Informationen zum Unterrichtsmaterial*

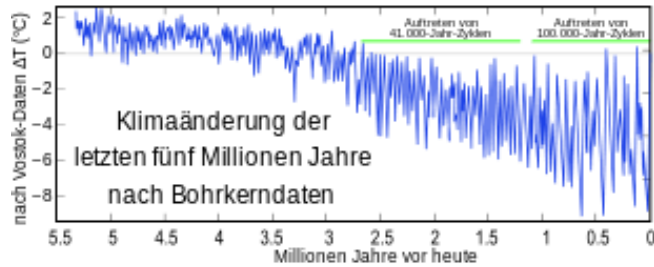


Hans Peter Dreyer

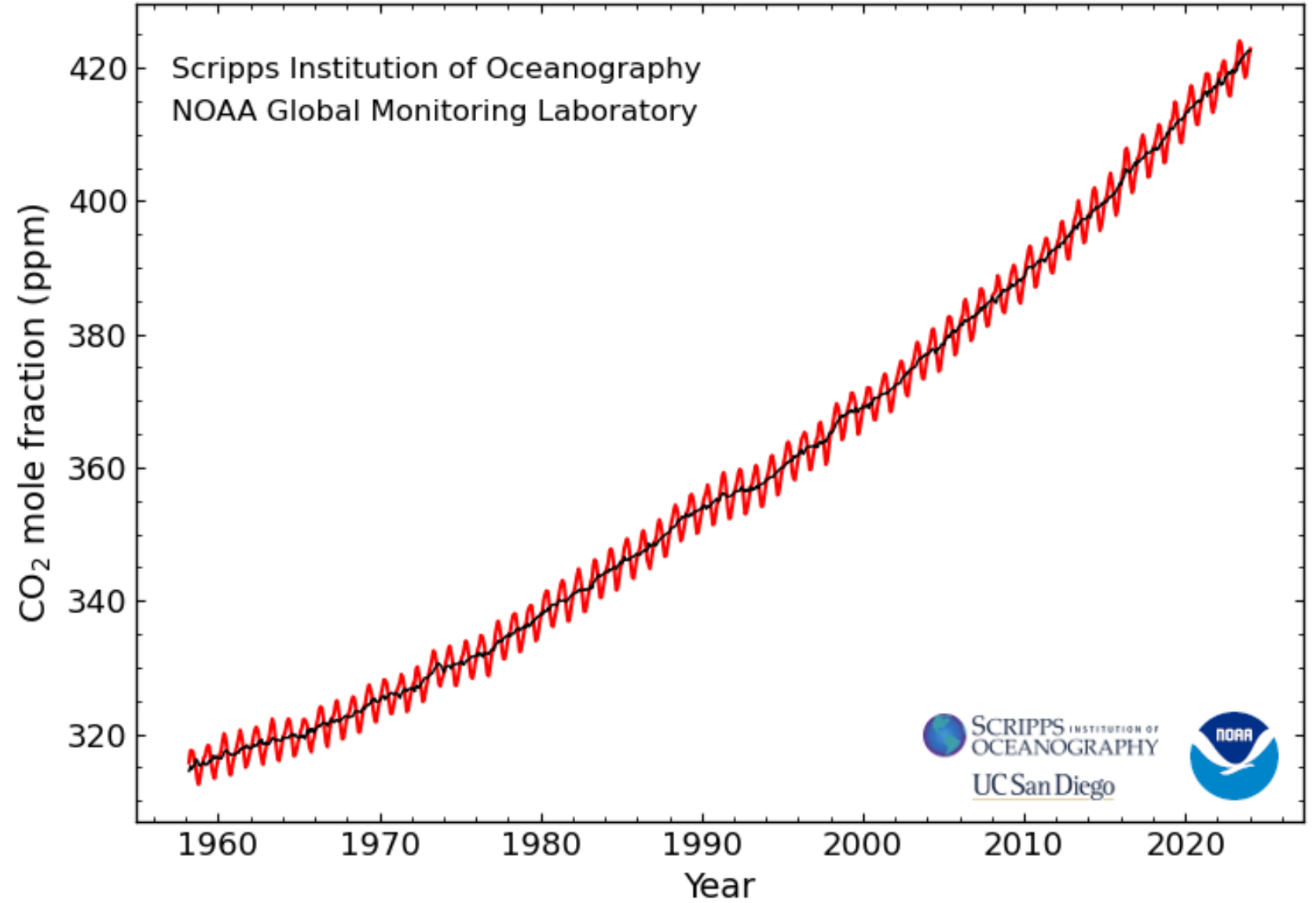




Hans Oeschger, Bern



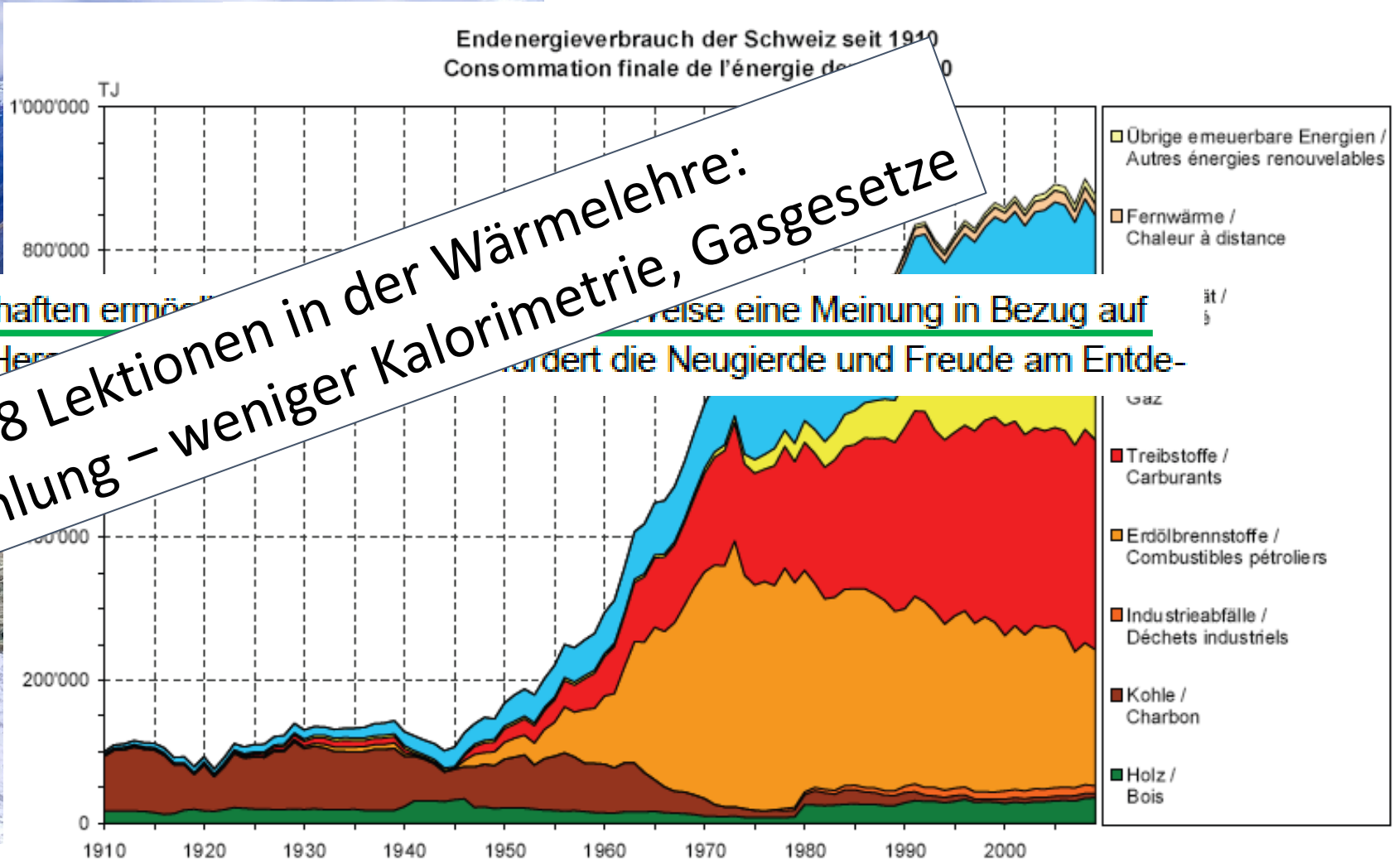
Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory



Klimawandel: Eine gesellschaftliche Herausforderung



Der Unterricht in den Naturwissenschaften ermöglicht es den Schülern, sich eine Meinung in Bezug auf seine Umwelt und gesellschaftliche Herausforderungen zu bilden. Er fördert die Neugierde und Freude am Entdecken.



6 – 8 Lektionen in der Wärmelehre:
mehr Strahlung – weniger Kalorimetrie, Gasgesetze

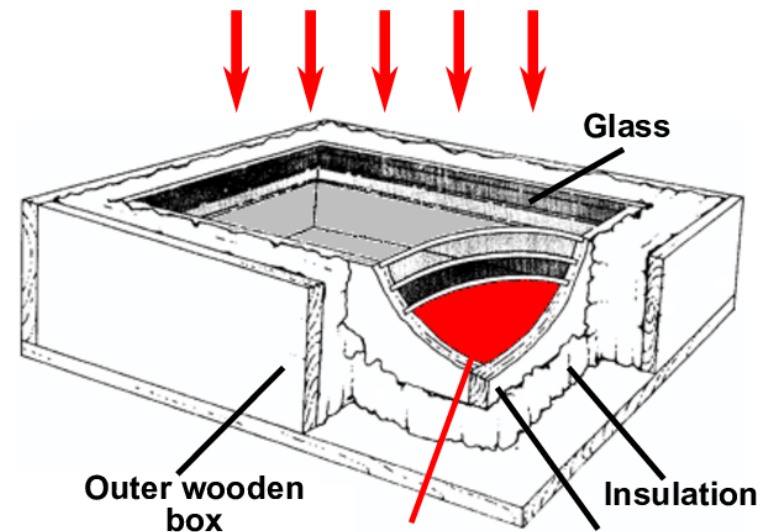
Hintergrundinformation

Horace Bénédict de Saussure, Alpinist und Physiker, Genf 1760
Besteigung des Mont Blanc - Experimentier-Sonnenofen

Wie entstehen und verschwinden Eiszeiten?



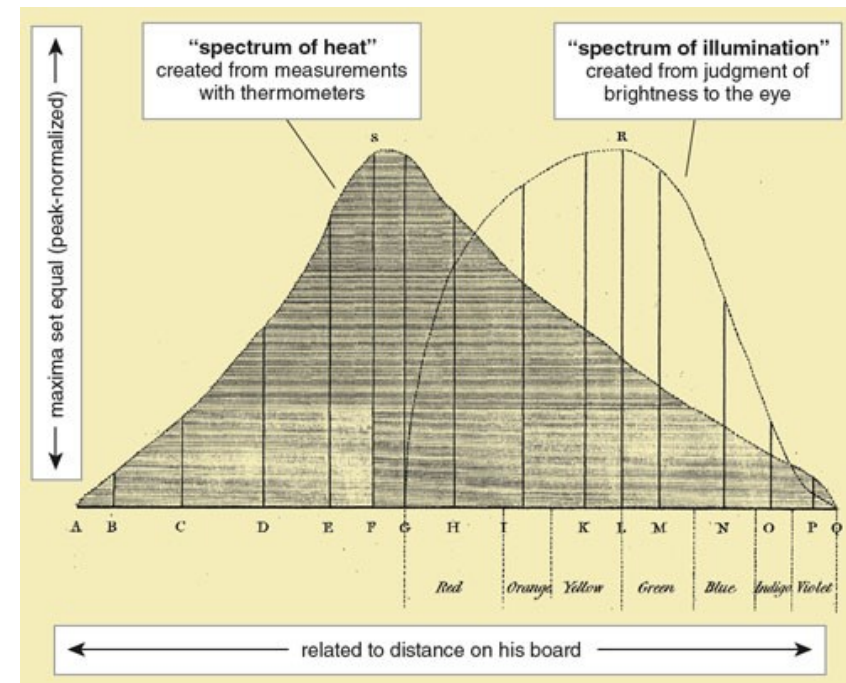
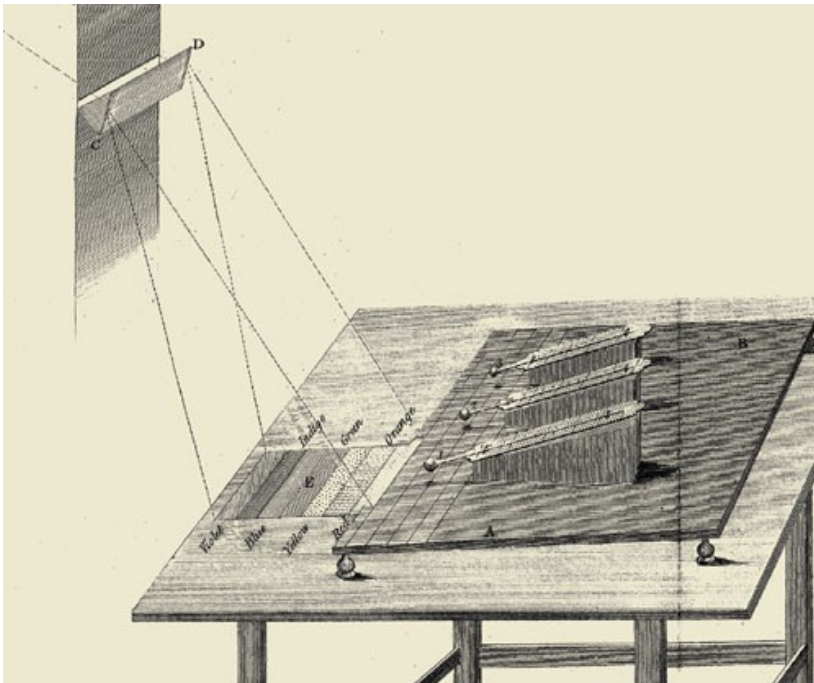
«Treibhaus-Experiment»



Hintergrundinformation

Joseph Herschel, Musiker und Physiker, London 1800
Experimente zum Sonnenspektrum und Auftauchen des IR

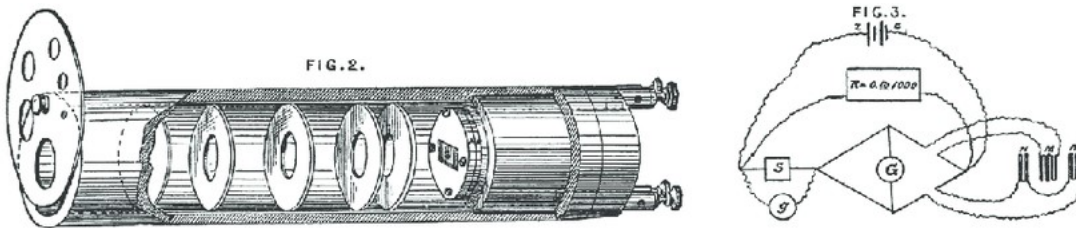
Was passiert am Ende des roten Spektrums?



Hintergrundinformation

Samuel Langley: Astronom, Physiker, Flugpionier, Pittsburg
Erfinder des Bolometers, 1880

Wie misst man IR-Intensität quantitativ?



Hintergrundinformation

Josef Stefan – Ludwig Boltzmann
unbekannter Lehrer & Experimentator – berühmter Schüler & Theoretiker

Zum Gesetz der Energiedichte der Wärmestrahlung ↔ Planck & QP



Josef Stefan (1835-1893)

Als Physiker förderte Josef Stefan Maxwells Theorie und präsierte er 1883 die internationale elektrotechnische Ausstellung.

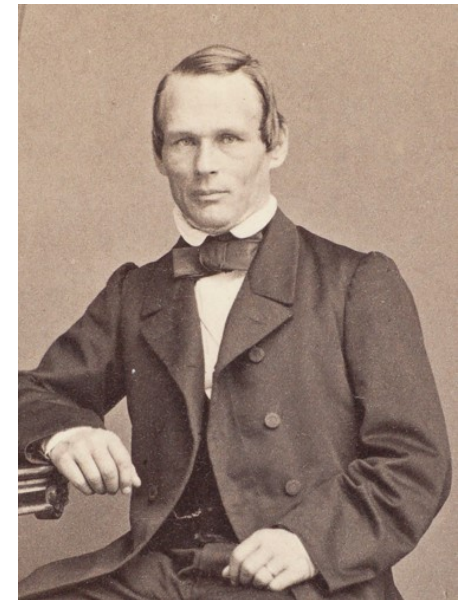
Als Geophysiker publiziert er 1889 *Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeer.*

Als Physiologe setzt Josef Stefan $a' = 435$ Hz.

Hintergrundinformation

Arvid Högbom: Geologe und Geophysiker, Stockholm 1893
ist im Austausch mit Svante Arrhenius und im Streit mit Anders Jonas Angström.

Gibt es einen Einfluss des Menschen auf den Kohlenstoffkreislauf?



Hintergrundinformation

Die Berechnungen von Arrhenius wurden lange angezweifelt, obwohl Hulburt 1931 sie bestätigte und Callendar 1938 den steigenden CO₂ über 50 Jahre nachwies.

Ursache: Ein Graben zwischen den Klima-Physikern und den Klimatologen resp. Meteorologen

absorption coefficients." Hulburt's own calculations supported Arrhenius's estimate that doubling or halving CO₂ would bring something like a 4°C rise or fall of surface temperature, and thus "the carbon dioxide theory of the ice ages... is a possible theory." (11) Hardly anyone noticed this paper. Hulburt was an obscure worker at the U.S. Naval Research Laboratory, and he published in a journal, the *Physical Review*, that few meteorologists read. Their general consensus was the one stated in such authoritative works as the American Meteorological Society's 1951 *Compendium of Meteorology*: the idea that adding CO₂ would change the climate "was never widely accepted and was abandoned when it was found that all the long-wave radiation [that would be] absorbed by CO₂ is [already] absorbed by water vapor." (11a) ☹

Vorurteil: «Weil nicht sein kann, was nicht sein darf!»

century or so — and the equilibrium would automatically restore itself. As one respected expert put it baldly in 1948, "The self-regulating mechanisms of the carbon cycle can cope with the present influx of carbon of fossil origin." (13) ☹

Übersicht

Einführung

Modul 1

Was ist Licht?

Modul 2

Wo ist das Elektron?

Verknüpfung

Klima & Quanten

Klimaerwärmung

Fakten, Medien & Rahmenlehrplan

Hintergründe

Von de Saussure über Stefan und Arrhenius bis näher zur Gegenwart

Lern-Text

Klimamodelle ohne und mit Atmosphäre - Quantenphysik der Strahlung und der Moleküle

Klimapolitik

Anregungen zu fächerübergreifendem Arbeiten

KLIMA

Ergänzung

Quantenphysik im Schulalltag

Ausblick

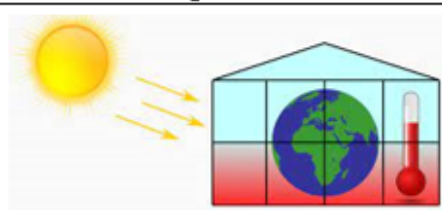
mehr Quanten





J. B. Joseph Fourier 1824:

Er macht erste physikalische Aussagen zur Klimafrage noch ohne Einsicht in das Strahlungsgleichgewicht.



- Treibhaus Erde



John Tyndall 1859:

Tyndall misst im Labor den Einfluss von H₂O und CO₂ auf den Fluss von IR-Strahlung und entdeckt den Treibhauseffekt.

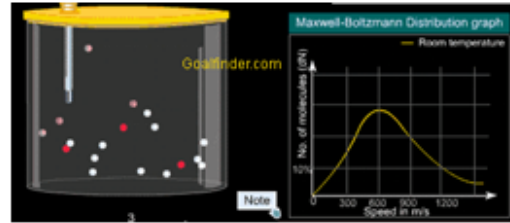


- Gletscherveränderungen
- Experimente



Joseph Stefan 1879:

Strahlungsgesetz: Die Strahlungsleistung wächst mit T⁴. L. Boltzmann leitet es aus der Thermodynamik her.



- Strahlungsgesetze



Svante Arrhenius 1896:

Erste Modellrechnung: «Über den Einfluss des CO₂ in der Atmosphäre auf das Klima»

TABLE VII.—Variation of Temperature ex

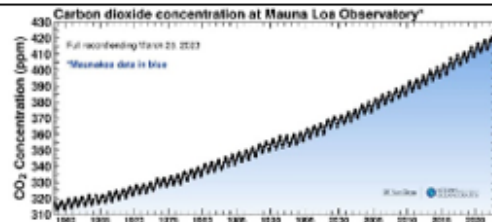
Latitude.	Carbonic Acid = 0.07.					Carbonic Acid = 1.5.						
	Dec.	Feb.	May.	Aug.	Nov.	Mean of this year.	Dec.	Feb.	May.	Aug.	Nov.	Mean of this year.
70	-2.0	-3.0	-3.4	-3.1	-3.1	-3.1	3.5	3.4	3.8	3.0	3.0	3.0
60	-3.0	-3.2	-3.4	-3.3	-3.2	-3.2	3.4	3.7	3.6	3.8	3.0	3.0

- Modellrechnungen

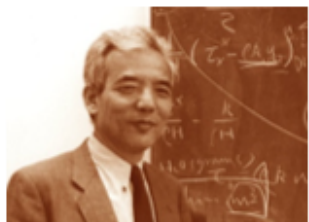


Charles D. Keeling 1958:

Startet CO₂-Messungen auf Mouna Loa, Hawaii im Geophysikalischen Jahr.

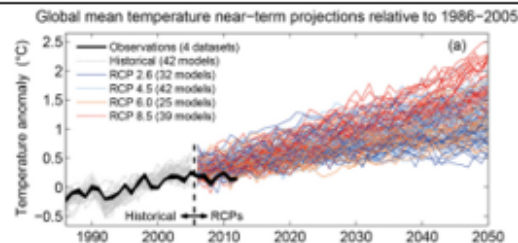


- Veränderungen
in geologischen Zeiträumen
und kurzfristige Schwankungen



Syukuro Manabe 1967:

Der Japaner berücksichtigt früh in Computer-Modellen die Rückkopplung des Wasserdampfs.



- Bedeutung von Computer-Simulationen

Erste Annäherung an das Klima

J. B. Joseph Fourier, Mathematiker und Physiker, Paris 1824

Schon im alten Ägypten spielte der Licht und Wärme spendende Sonnengott Re eine wichtige Rolle. Zu



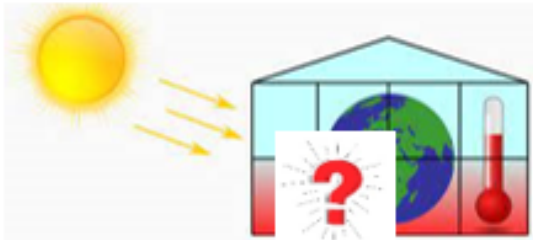
behaupten, aus dem Bild gehe die Dualität des Lichts hervor, wäre kühn. Licht ist auch im Juden- und Christentum wesentlich. *Es werde Licht!* steht im 1. Buch Mose. Das Johannesevangelium formuliert kryptisch: *In ihm [dem Wort] war Leben und das Leben war das Licht der Menschen. Und das Licht leuchtet in der Finsternis und die Finsternis hat es nicht erfasst.*

Um 1800 begann sich auch die Naturwissenschaft mit dem wärmenden Licht als Voraussetzung für das Leben auf der Erde zu befassen. J. B. Joseph Fourier

publizierte 1824 erste physikalische Aussagen zu Wetter (Tage) und Klima (Jahre). Allerdings erkannte man zu jener Zeit erst langsam den Unterschied zwischen Temperatur und Wärme. Der Energiebegriff entstand um 1850, und das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung überblickte man erst gegen Ende des Jahrhunderts. Fourier beschäftigte sich mit dem Wärmetransport, also mit dem Fluss von Energie zugleich mit Unordnung (Entropie) von Orten höherer zu Orten mit



niedrigerer Temperatur. Es war offensichtlich, dass dieser Wärmetransport durch die Lufthülle erfolgt, die eine Art wärmendes Treibhaus für die Erde darstellt. Vor allem weil man noch wenig über den infraroten Bereich des Spektrums wusste, aber auch weil die Strahlungsgesetze nicht bekannt waren, blieb vieles blosse Spekulation.



Die Bedeutung der Sonne für das Leben ist allen Zivilisationen bewusst.

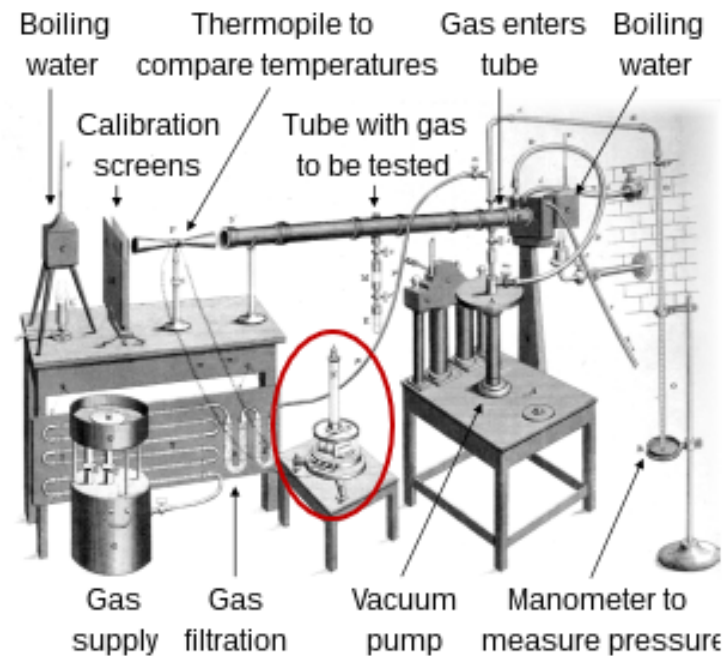
Fourier beschäftigt sich mit Wärmetransport zur Zeit, als sie stofflicher Natur schien.

Das Wort «Treibhauseffekt» verleitet zu falschen Vorstellungen.

Treibhausgase im Labor

John Tyndall, Alpinist und Physiker, London 1861

Im Zentrum steht die lange Röhre, die mit dem Testgas von bestimmter Temperatur und Druck gefüllt war. Die IR-Strahlung wurde vom Würfel mit kochendem Wasser rechts eingestrahlt. Was an Strahlung nicht absorbiert worden war, wurde mit einem Thermoelement (thermopile) elektrisch nachgewiesen. Ein Thermoelement besteht im Prinzip aus zwei verschiedenen Metallen, die an zwei Stellen verschweisst sind. Es liefert eine kleine Spannung, die proportional zum Temperaturunterschied zwischen den beiden Stellen ist. Auf die eine Stelle trifft die zu untersuchende Strahlung; auf die andere Stelle trifft die vom Würfel mit dem kochenden Wasser links stammende Referenzstrahlung. Die kleine Spannung wird mit dem Galvanometer (Voltmeter, umrahmt) gemessen. Beachten Sie die «gasfiltration», die vor allem dazu dient, Spuren von Wasserdampf aus der Luft zu eliminieren. Man kann davon ausgehen, dass die in Figur 1.3b zu erkennenden Abweichungen von den gewünschten Kurven auf solche «Dreckeffekte» zurückzuführen sind.



FIGUR K1.5: VERSUCHSAUFBAU VON TYNDALL

John Tyndall

besteigt nicht nur Berge!

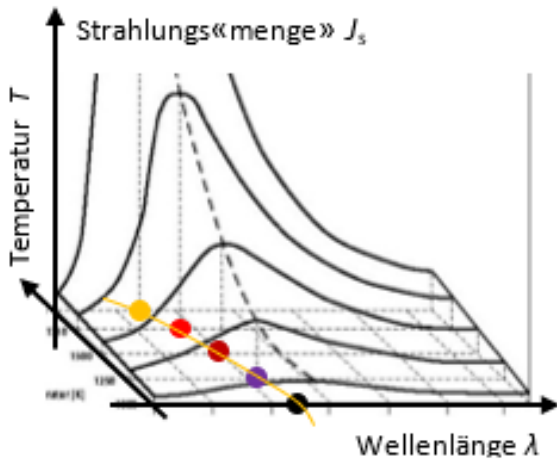
Er baut eine gute Apparatur zur Messung der Absorption von IR durch H_2O , CO_2 usw.

und liefert Daten für das Gesetz von Josef Stefan.

Die Strahlungsgesetze ergeben sich aus **der Quantenphysik**

Die spektrale Energiestromdichte ist auf die Fläche A und das Wellenlängenintervall $d\lambda$ bezogen:

$$J_S(\lambda, T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (\text{K1.1})$$



FIGUR K1.1: PLANCKS STRAHLUNGSGESETZ

Wir werden mit (K1.1) *nicht* arbeiten, sondern nehmen nur zur Kenntnis, dass es ein Gesetz der Quantenphysik ist, denn Plancks Wirkungsquantum h steht an zwei Positionen. Neben der Lichtgeschwindigkeit c taucht, zusammen mit der Temperatur T , die Boltzmann-Konstante k auf. Sie besitzt den Wert $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K. Hinweis: Ein Gas-Atom besitzt die mittlere Bewegungsenergie $3/2 kT$.

Wir benötigen ein einfacheres Gesetz, das wir erhalten, indem wir die Strahlungsbeiträge aller Wellenlängenintervalle $d\lambda$ addieren, also über alle Wellenlängen integrieren. Es ist das Gesetz für die Gesamtstrahlungsleistungsdichte bei der Temperatur T , das sogenannte

$$\text{Gesetz von Stefan und Boltzmann: } J = \sigma \cdot T^4 \text{ mit } \sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \quad (\text{K1.2})$$

Die gestrichelte Linie in Figur K1.1 zeigt, dass die Strahlung bei einer gewissen Wellenlänge maximal ist und dass diese Wellenlänge λ_{\max} von der Temperatur abhängt: λ_{\max} verschiebt sich mit zunehmender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen, wie die gelbe Linie andeutet. Mathematisch lässt sich aus dem Gesetz (K1.1) durch Differenzieren nach λ das Maximum λ_{\max} für jede Temperatur T finden. Bereits 1893 hat Willy Wien das Gesetz aus der Thermodynamik – noch ohne Quantenphysik – hergeleitet.

$$\text{Verschiebungsgesetz von Wien: } \lambda_{\max} \cdot T = 2.898 \text{ mmK} \quad (\text{K1.3})$$

Strahlungsgesetz von Planck
(algebraisch)

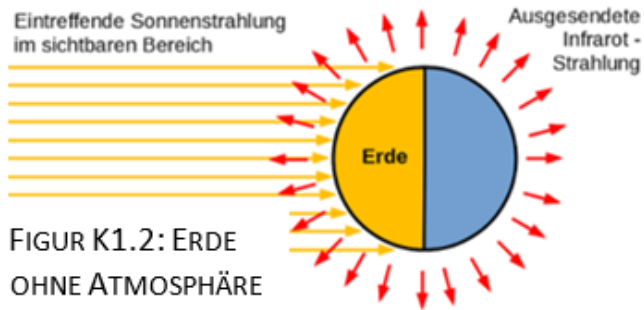
Nur grafisch nutzen!

→ Gesamtstrahlungsgesetz von
Stefan & Boltzmann

→ Verschiebungsgesetz von Wien

Die Erde im Strahlungsgleichgewicht – ohne Atmosphäre

In Figur K1.2 ist das Modell dargestellt. Die Erde muss, z. B. über ein Jahr gemittelt, gleichviel Energie



FIGUR K1.2: ERDE OHNE ATMOSPHÄRE

abgeben, wie sie von der Sonne erhält. Das kann sie nur durch Strahlung, denn sie darf nicht etwa durch Abdampfung Masse verlieren. Im Weltall draussen gibt es keinen kalten Körper, der Überschusswärme von der Erde durch Wärmeleitung aufnehmen würde.

Für die Energieaufnahme ist nur die Querschnittsfläche $A_Q = \pi r_E^2$ wichtig, wie in → K1.2 festgestellt worden ist. Für die Energieabgabe ist hingegen die gesamte

Erdoberfläche A_E bedeutsam $A_E = 4\pi r_E^2$. Sie ist viermal grösser. In den folgenden Berechnungen wird immer die gesamte Oberfläche als Basis genommen. Die «Leistung des Wasserkochers» muss also durch 4 geteilt werden, wenn sie im Mittel, also auch für die Nachtseite der Erde gelten soll: 250 W/m^2 . Zudem wurden die 1 kW/m^2 unter der realen Atmosphäre gemessen. Wir müssen davon ausgehen, dass etwa $\frac{1}{4}$ der ursprünglichen Energie an Wolken usw. reflektiert und gestreut worden ist. Wir vermuten, dass die Sonne «oben» eine Leistung von $\frac{4}{3} \cdot 250 \text{ W/m}^2 = 333 \text{ W/m}^2$ liefert. In der Tat: Gemäss Satellitenmessungen strömt auf die Erde (räumlich gemittelt von den Polen bis zum Äquator und zeitlich gemittelt über Tag und Nacht, Sommer und Winter) von der Sonne andauernd eine Energie von 342 W/m^2 in Form eines Strahlungsgemischs mit Maximum im Sichtbaren zu.

Mit dem Gesetz von Stefan und Boltzmann (K1.2) berechnen wir, wie warm es auf der Erde **ohne Atmosphäre** (und ohne Reflexion von 107 W/m^2) sein müsste, damit 342 W/m^2 abgestrahlt werden:

$$J = \sigma \cdot T^4 \text{ lautet konkret: } 342 \text{ W/m}^2 = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \cdot T_{\text{ohne}}^4 \Leftrightarrow T_{\text{ohne}} = 279 \text{ K} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Ohne Atmosphäre wäre die Erde im Mittel $6 \text{ }^\circ\text{C}$ kalt.

Ohne Atmosphäre wäre die Erde ebenso lebensfeindlich wie der Mond!

Energie-Gleichgewicht kann nur durch Abstrahlung erreicht werden!

Flächen beachten.

Die mittlere Erdoberflächentemperatur nach Stefan-Boltzmann ist kalte $6 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die Erde muss die zugeführte Energie als Infrarot abstrahlen.

WESHALB KOMMT INFRAROT-STRAHLUNG INS SPIEL? Allein die Temperatur des strahlenden Körpers bestimmt die Mischung der Strahlung. 800 °C heisses Gold strahlt gleich kirschrot wie 800 °C heisses Eisen; aber 1100 °C heisses Gold strahlt weisser als 900 °C heisses. Mit dem Verschiebungsgesetz von Wien (K1.3) finden wir die Lage des Abstrahlungsmaximums der Erde:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2.898 \text{ mm} \cdot \text{K} \text{ lautet konkret: } \lambda_{max} \cdot 279 \text{ K} = 2.9 \text{ mm} \cdot \text{K} \Leftrightarrow \lambda_{max} = 10.4 \mu\text{m}$$

Weil die Erdoberflächentemperatur um 300 K liegt, strahlt die Erde am stärksten im Wellenlängenbereich von 10 μm , also im Infrarot.

WIE WIRKEN SICH VERÄNDERUNGEN AUS? Unser Modell geht von einem stationären Gleichgewicht aus. Wenn weniger als 342 W/m^2 abgestrahlt sind, weil die Sonne schwächer scheint, weil die Erde sich von der Sonne entfernt, weil Wolken Licht reflektieren, weil Vulkanasche Sonnenlicht streut usw. muss auch weniger und anders zurückgestrahlt werden.

Im Verschiebungsgesetz von Wien tritt T nur in der ersten Potenz auf. Wenn etwas mehr oder weniger als 342 W/m^2 abgestrahlt sind, bleibt das Rückstrahlungs-Maximum im Infrarot.

Ganz anders wirken sich Veränderungen im Gesetz von Stefan und Boltzmann aus: Wegen der vierten Potenz ist eine kleine Temperaturänderung mit einer grossen Strahlungsleistungsänderung verknüpft

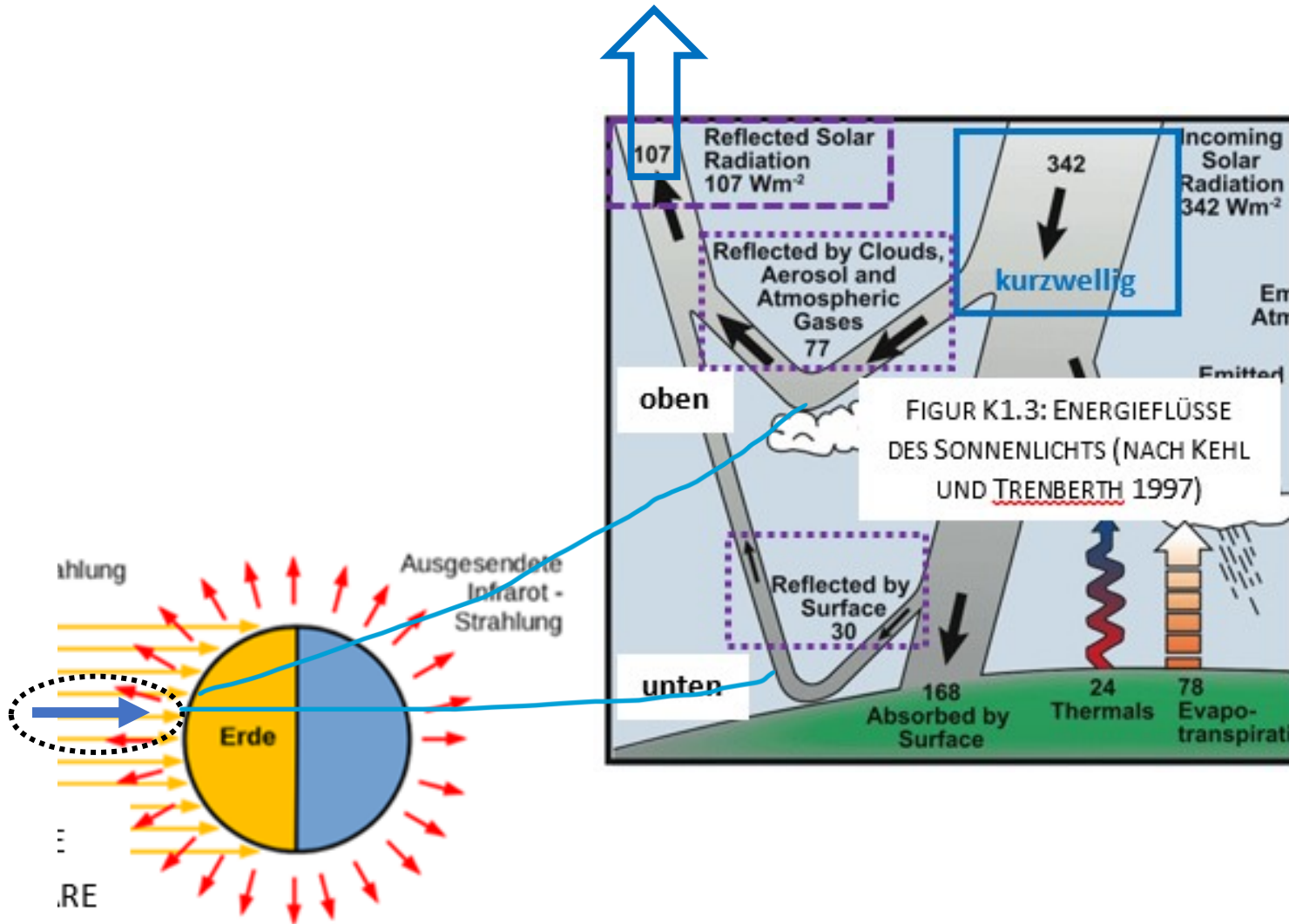
Wenn die Erdtemperatur von 279 K auf 282 K anwächst, um 1.1 %, steigt die Strahlungsleistungsdichte J von 342 W/m^2 auf 359 W/m^2 also um 4.4 % – und umgekehrt.

Gesetz von Wien:
Das Maximum der ausgesendeten Strahlung liegt bei 10 μm , also im IR.

Ob Eiszeiten oder Warmzeit:
Das Maximum liegt im IR!

Stefan & Boltzmann \rightarrow kleine Temperaturänderungen \Leftrightarrow grosse Leistungsänderungen \rightarrow Starkregen, Hurricans ...

Mit Atmosphäre: Sonnenlicht geht nicht unbehindert auf den Erdboden.



Der Energiefluss ist komplexer!

Im kurzwelligen, sichtbaren Bereich ist die Wirkung von

verteilt

Aerosolen und Gasen
= Streuung

und von

lokalisierten

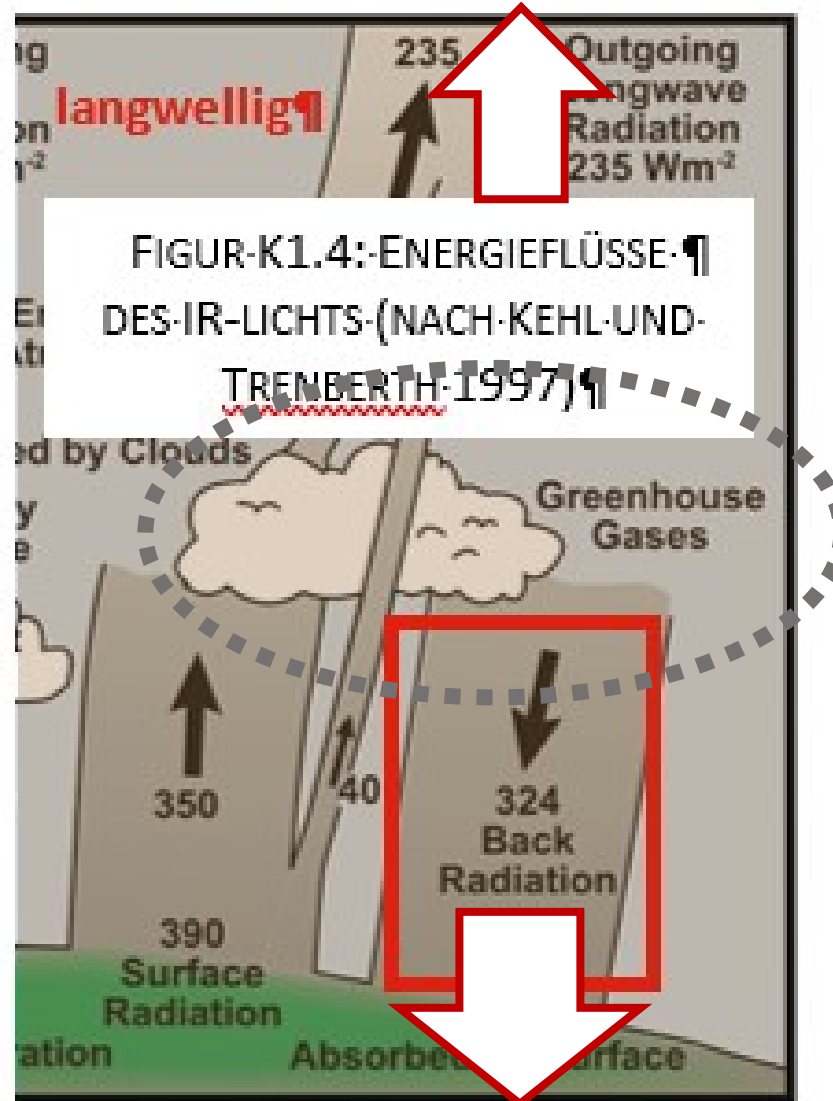
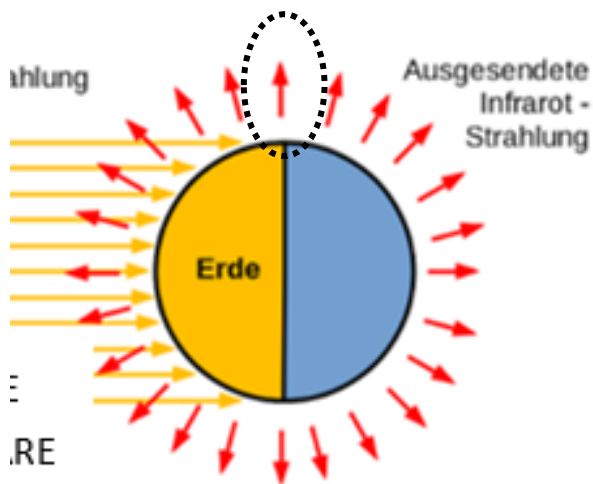
Wolken, Wasser und Schnee
= Reflexion

$(30 + 77 = 107) \text{ Wm}^{-2}$

nur nach oben!

Mit Atmosphäre: Das Infrarot geht nicht direkt ins Weltall!

Hier geht es um die «Verwandlung» und «Erzeugung» von Licht im Sinne Einsteins, wie im Modul 1 diskutiert.



Im **langwelligen, infraroten Bereich** absorbieren und re-emittieren:

Wasserdampf und CO_2 verteilt, & Wasser in Wolken lokalisiert

nach unten = **324 Wm^{-2}**

‘Back Radiation’

⇔ **Treibhauseffekt**

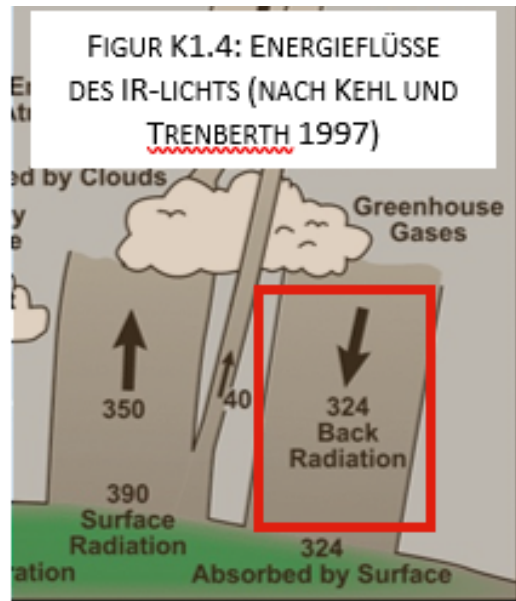
&

nach oben = **235 Wm^{-2}**

‘Outgoing Longwave Radiation’

⇔ **Energie-Gleichgewicht.**

Die Erde im Strahlungsgleichgewicht – mit Atmosphäre



Anstelle der 342 W/m² ohne Atmosphäre treffen mit Atmosphäre (168 + 324) W/m² = 492 W/m² auf.

$$J = \sigma \cdot T^4 \text{ lautet jetzt: } 492 \text{ W/m}^2 = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4 \cdot T_{\text{mit}}^4 \Leftrightarrow T_{\text{mit}}^* = 305 \text{ K} = 32 \text{ }^\circ\text{C}$$

Das ist zu warm, weil wir die Energieabgabe von (78 + 24) W/m² für den Antrieb der «Wettermaschine» in Fig. K1.4 vergessen. wird: (492 – 102) W/m² = 5.67 · 10⁻⁸ W/m²K⁴ · T_{mit}⁴ ⇔ T_{mit} = 288 K = 15 °C

Gemäss diesem Modell mit Atmosphäre ist die Erdoberfläche im Mittel 15 °C warm.

Der atmosphärische Treibhauseffekt ist lebensnotwendig.

Treibhauseffekt:

Der Erdboden wird durch 168 W/m² Sonnenlicht, das nicht reflektiert worden ist, **und zusätzlich durch 324 W/m² IR-Licht geheizt**, das aus der Atmosphäre zur Erde zurückgestrahlt wird!

Wie in der Figur angedeutet wird, stammt diese Strahlung von den Treibhausgasen (greenhouse gases), die sowohl in den Wolken als auch in der klaren Atmosphäre zu finden sind. Welche Gase das sind, und wieso gerade diese Gase den Treibhauseffekt verursachen, und woher diese Gase ihre Energie erhalten, wird im Kapitel K2 dargelegt werden.

Vorerst berechnen wir den Einfluss der Treibhausgase auf die Erdoberflächentemperatur mit Stefan und Boltzmann (K1.2):

Absorption und Re-Emission von IR in der Atmosphäre sind zentral.

Die Atmosphäre sendet als IR 324 W/m² auf die Erde, zusätzlich zum Sonnenlicht von 168 W/m².

Davon werden 102 W/m² für den «Antrieb des Wetters» benötigt.

Mit 390 W/m² Abstrahlung beträgt die Erdoberflächentemperatur nach Stefan-Boltzmann

angenehme 15 °C.

Thomas Filk => Klima => 3 Texte für Lehramtsstudierende

www. => Physikdidaktik.Uni-Freiburg.de/Kurztexte

1 Solarkonstante und Paläoklima

Erläuterungen zu den verschiedenen Ursachen historischer Klimaschwankungen

2 Strahlungsgesetze

Herleitung von Plancks Strahlungsgesetz und daraus mathematische Ableitung der Gesetze von Wien und Stefan-Boltzmann

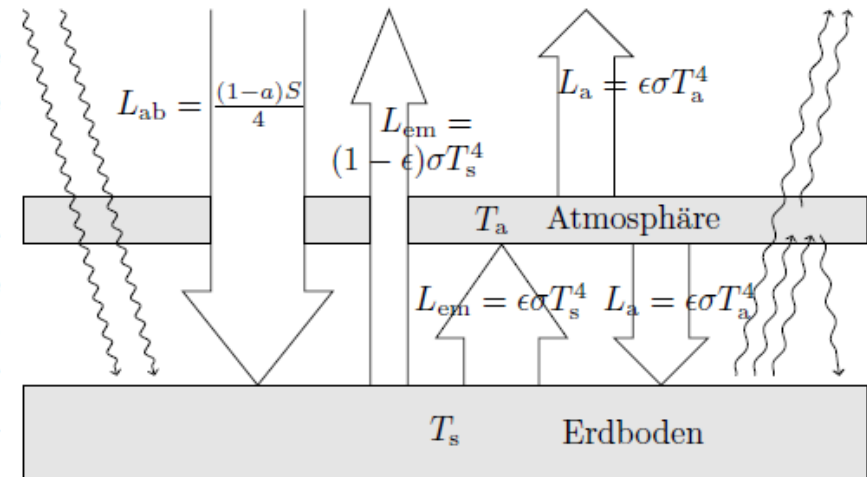
3 Klimamodelle

zum Beispiel:

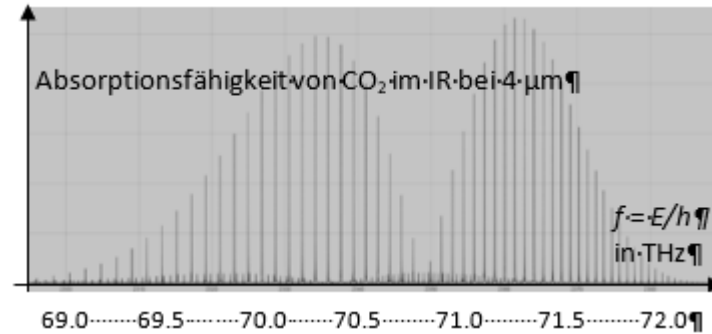
Modell 4 mit teilweise absorbierender Atmosphäre, die eine andere Temperatur aufweist, als die Erdoberfläche.

Auch numerisch durchgerechnet.

Abbildung 1.4: Effektiver Treibhauseffekt mit einer teilweise absorbierenden Atmosphärenschicht. Die von der Erdoberfläche emittierte langwellige Strahlung wird teilweise in der Atmosphäre absorbiert und teilweise durchgelassen. Der absorbierte Anteil wird als „graue Strahlung“ mit Emissionskoeffizienten ϵ zur Atmosphärentemperatur T_a sowohl in den Weltraum als auch zurück zur Erdoberfläche emittiert.

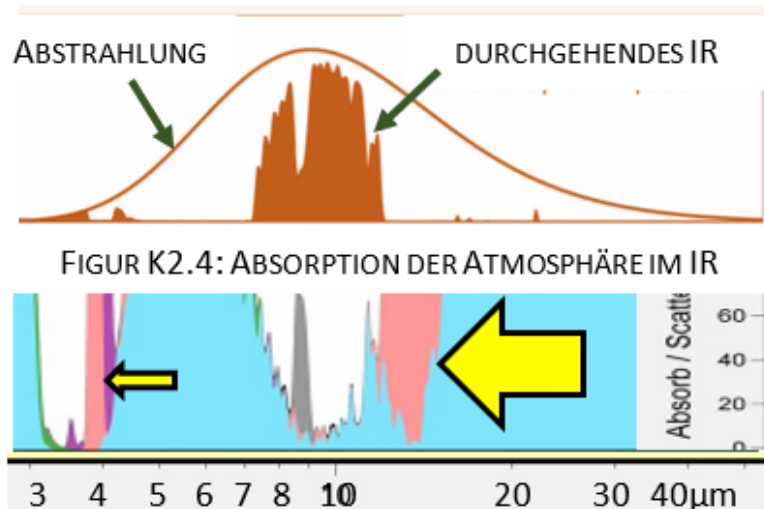


CO₂-Moleküle in der Atmosphäre wechselwirken mit der Strahlung



Rechnungen von Lucy Mensing usw.

und Messungen der IR-Spektren von CO₂ (und von H₂O usw.) zeigen:



bereits bei zweiatomigen Molekülen der Infrarot-Bereich interessanter.

Wir sind uns daran gewöhnt, dass die Atmosphäre für Sonnenlicht weitgehend durchsichtig ist, und müssen uns bewusst machen, dass das für die IR-Strahlung ganz anders ist, wie K2.4 zeigt. Oben ist dargestellt, welche IR-Verteilung die Erde abstrahlt und wie wenig davon durch die Atmosphäre gelangt. Die Differenz entsteht durch Absorption. Im unteren Teil wird deutlich, dass dafür vor allem H₂O (blau) und CO₂ (rosa) verantwortlich sind. Die Absorption von CO₂ bei

CO₂ absorbiert bei

4 µm

und vor allem bei 14 µm.

Dort entsteht

der menschengemachte Klimawandel.

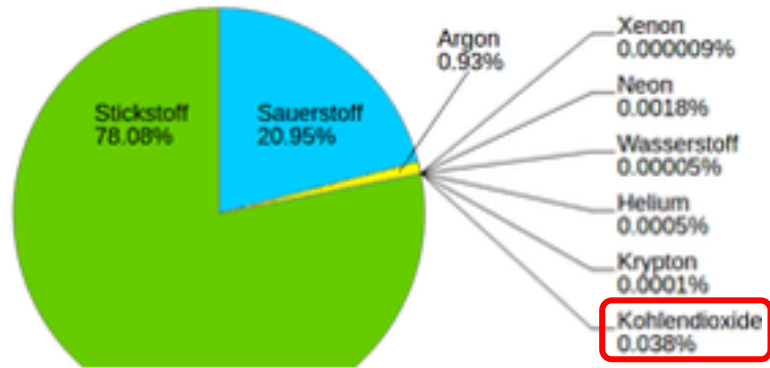
Svante Arrhenius: Erste Modellrechnung zum Einfluss des CO₂

atmosphäre spielt, hat der Schwede **Svante Arrhenius** noch unbekannt war. Dank eines Mittel- und Osteuropas weiterzubilden, unter dem Bild sieht man Arrhenius 1878,



anderem das Stefan-Boltzmann-Gesetz für die Eiszeiten nachzugehen. Der Anteil der CO₂ in der Atmosphäre, denn dessen Anteil wechselt über geologische Zeiträume schwankt.

Erde zwischen 70° Nord und 60° Süd in Segmente der Energiebilanz mit vier verschiedenen Werten des CO₂-Gehalts zu einer Abkühlung von etwa 5 °C



FIGUR K2.3: ZUSAMMENSETZUNG TROCKENER LUFT

TABLE VII.—Variation of Temperature ca

Latitude.	Carbonic Acid=0.67.					Carbonic Acid=1.5.				
	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.
70	-2.9	-3.0	-3.4	-3.1	-3.1	3.3	3.4	3.8	3.6	3.52
60	-3.0	-3.2	-3.4	-3.3	-3.22	3.4	3.7	3.6	3.8	3.62
50	-3.2	-3.3	-3.3	-3.4	-3.3	3.7	3.8	3.4	3.7	3.65
40	-3.4	-3.4	-3.2	-3.3	-3.32	3.7	3.6	3.3	3.5	3.52
30	-3.3	-3.2	-3.1	-3.1	-3.17	3.5	3.3	3.2	3.5	3.47
20	-3.1	-3.1	-3.0	-3.1	-3.07	3.5	3.2	3.1	3.2	3.25
10	-3.1	-3.0	-3.0	-3.0	-3.02	3.2	3.2	3.1	3.1	3.15
0	-3.0	-3.0	-3.1	-3.0	-3.02	3.1	3.1	3.2	3.2	3.15
-10	-3.1	-3.1	-3.2	-3.1	-3.12	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
-20	-3.1	-3.2	-3.3	-3.2	-3.2	3.2	3.2	3.4	3.3	3.27
-30	-3.3	-3.3	-3.4	-3.4	-3.35	3.4	3.5	3.7	3.5	3.52
-40	-3.4	-3.4	-3.3	-3.4	-3.37	3.6	3.7	3.8	3.7	3.7
-50	-3.2	-3.3	—	—	—	3.8	3.7	—	—	—
-60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Svante Arrhenius berechnet

von Hand !!!

den Einfluss von verschiedenen CO₂-Konzentrationen

auf die Oberflächen-Temperatur

- in verschiedenen geographischen Breiten

- zu verschiedenen Jahreszeiten

Quantenphysik fürs Klima: Hintergrund

Zur Quantenphysik der Moleküle = Grundlage für den Treibhauseffekt

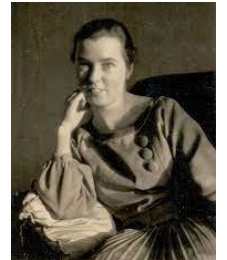
1921: Hertha Sponer (mit J. Franck, Göttingen – vgl. Franck & Hertz) ⇔ **semiklassische QP**
Über ultrarote Absorption zweiatomiger Gase



1926, 12. März: Pauli gibt in einem Brief an Bohr den Widerstand gegen den Elektronenspin auf.

1926, 18. März: Schrödinger (Zürich) zeigt die Gleichwertigkeit von Wellen- und Matrizenmechanik

1926, 29. März: **Lucy Mensing (mit W. Pauli, Göttingen)** **Berechnet mit der Matrizenmechanik**
Die Rotations-Schwingungsbanden nach der Quantenmechanik



1926, 11. Juni: Heisenberg schreibt im Zusammenhang des Mehrkörperproblems von *quantenmechanischer Resonanz*

1926, 24. Juli: Heisenberg berechnet He mit Schrödinger: Ortho-(symmetrisch) Para-He (antisymmetrisch)
Über die Spektren von Atomsystemen mit zwei Elektronen Austauschintegral ⇔ **Verschränkung**

1927, 12. Juni: **W. Heitler & F. London (Zürich)** erklären die Elektronenpaarbindung, die Basis **stabiler Moleküle**
(...) homöopolare Bindung nach der Quantenmechanik

Modul 3: Lucy Mensing: Quantenphysikerin, Göttingen 1926

Quantenmechanische Grundlage des Treibhauseffekts

Wir können die in 2.1.5 angestellten Überlegungen für die Rotation des CO_2 nicht so vollständig in die Quantenmechanik übersetzen, wie wir das für die Schwingung gemacht haben. Bei Drehungen muss der Vektoraspekt berücksichtigt werden, was die Schrödinger-Gleichung noch schwieriger macht.



Lucy Mensing-Schütz

Genau solche Bewegungen untersuchte eine der wenigen Quantenphysikerinnen, **Lucy Mensing**. 1926 arbeitete sie in Göttingen zusammen mit Wolfgang Pauli und nutzte die im Vorjahr von Heisenberg erfundene, abstrakte Matrizenmechanik. Sie publizierte ihre Ergebnisse im Artikel *Die Rotations-Schwingungsbanden nach der Quantenmechanik*. In dieser Arbeit fand sie als erste Näherung, den Ausdruck für die Energie eines zweiatomigen Moleküls

mit der Masse m und dem Gleichgewichtsabstand a und mit der Schwingungsquantenzahl n und der Rotationsquantenzahl l .

Beachten Sie den Term $l(l + 1)$, der typisch quantenmechanisch ist.

Molekül-Energie: 😊 $E_{nl} = hf \left(n + \frac{1}{2} \right) + \frac{h^2}{8\pi^2 ma^2} l(l + 1) + \text{const.}$ 😊

typische Energie in der Atmosphäre:

$$kT = 25 \text{ meV für } 300 \text{ K}$$

Anregungsenergien CO_2 -Moleküle:

$$hf = 100 \text{ meV für Oszillation} \Rightarrow \text{IR}$$

$$25 \text{ meV} < 100 \text{ meV}$$

⇔ CO_2 ist im Grundzustand

$$hf = 0.1 \text{ meV für Rotation}$$

⇔ CO_2 absorbiert in breiten Banden

Atmosphärenphysik zählt in der 'Community' wenig.

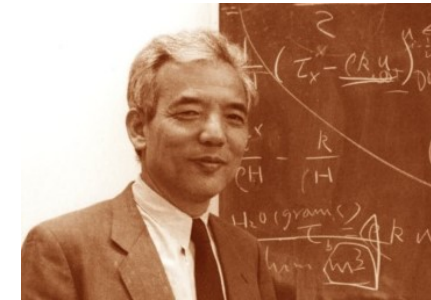


The Nobel Prize in Physics 2021 was awarded for groundbreaking contributions to our understanding of complex physical systems with one half jointly to Syukuro Manabe and Klaus Hasselmann for the physical modelling of Earth's climate, quantifying variability and reliably predicting global warming and the other half to **Giorgio Parisi**

for the discovery of the interplay of disorder and fluctuations in physical systems from atomic to planetary scales.

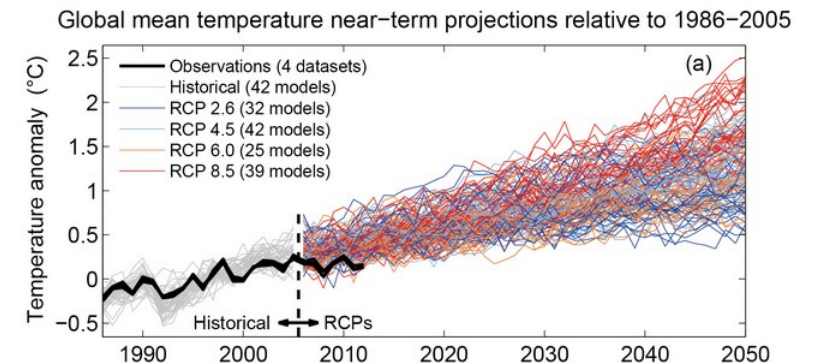
Aus der Sicht des Nobel-Komitees ist das Erdklima ein Beispiel für ein komplexes physikalisches System, natürlich ein besonders wichtiges. Die Schwierigkeiten komplexer Systeme wurde vom Mathematiker Poincaré schon um 1900 im Zusammenhang mit der Stabilität des Sonnensystems erkannt. Sobald man die Kräfte zwischen den Planeten einbezieht, gibt es keine Kepler-Ellipsen und viele mathematisch höchst verzwickten Probleme. Solche gibt es auch, wenn man das noch viel komplexere System des Erd-Klimas physikalisch erfassen will. Man steht vor der Aufgabe, ein grosses System mit vielen Differentialgleichungen, wie sie in K3.3 aufgetaucht sind, gleichzeitig zu lösen. Allgemeine Lösungen gibt es nicht. Mit Grosscomputern kann man Näherungslösungen finden.

Syukuro Manabe 1967:



Der Japaner berücksichtigt früh in **Computer-Modellen** die Rückkopplung des Wasserdampfs.

aktuelle Modellrechnungen

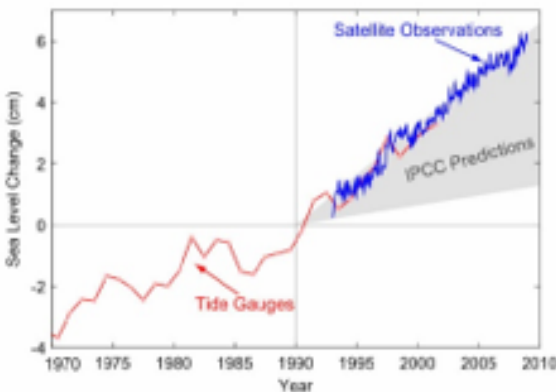
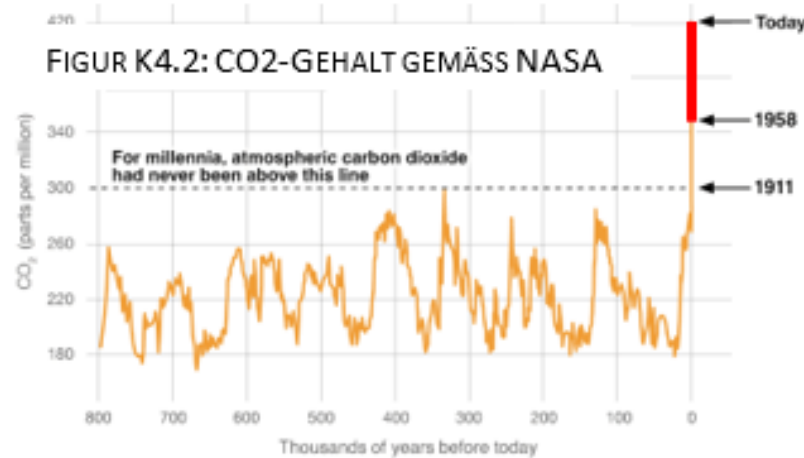


Im Übergangsbereich zwischen Klima und Politik:

K4.2 Energienutzung, CO₂-Freisetzung und das IPCC

In der Zeitauflösung der Figuren 4.1 erscheint der Effekt, der mit dem Einsatz von Steinkohle ab 1700 begonnen hat, wie ein Ausreisser. Die natürlichen Klimaschwankungen verliefen nie so rasch in so grossem Umfang. Nur Sonderlinge wollen diesen Ausreisser nicht mit dem durch Verbrennung fossilen Kohlenstoffs in die Atmosphäre gebrachten CO₂ (Figur K4.2) in Verbindung bringen. Angesichts der Unsicherheiten in der Klimaphysik, die in Figur 3.1 aufgelistet sind, stellen sich viele Aufgaben, die die Forschung in internationaler Zusammenarbeit bewältigen soll.

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (*IPCC*), oft als Weltklimarat bezeichnet, wurde 1988 als zwischenstaatliche Institution ins Leben gerufen, um Grundlagen für wissenschaftsbasierte Entscheidungen zu bieten. Der Sitz befindet sich in Genf. 195 Regierungen sind Mitglieder, darüber hinaus sind mehr als 190 Organisationen als Beobachter registriert. Die mit grossem Aufwand erstellten und bestmöglich dokumentierten Berichte werden von «Klima-Leugnern» als aktivistisch diffamiert. Dass das IPCC eher vorsichtig ist, zeigt der Vergleich seiner Prognose von 1990 mit den gemessenen Werten für den Anstieg des Meeresspiegels.



Information
zum Paläoklima

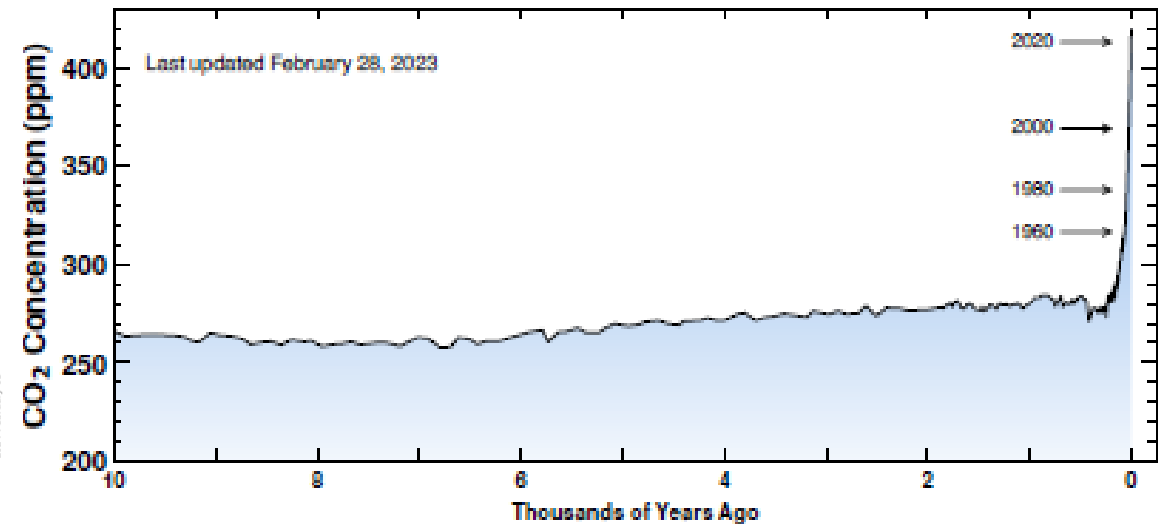
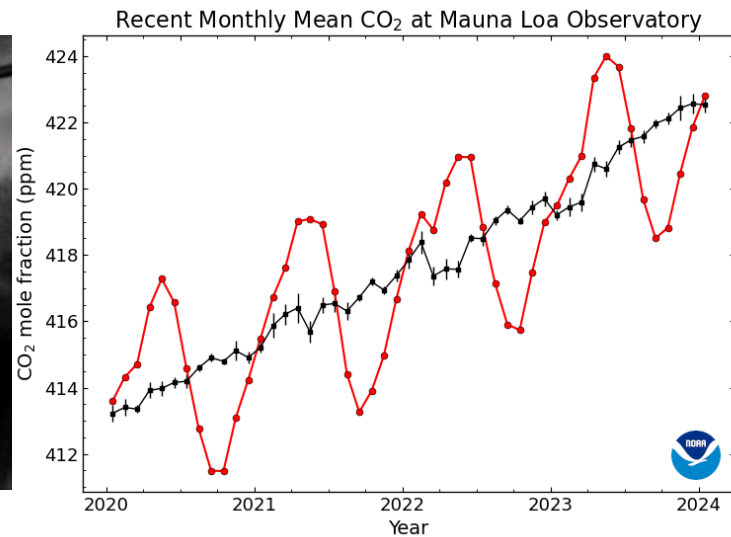
Wer ist der
«Weltklimarat»?

Was macht
das IPCC?

Grenzen des Wachstums als wissenschaftliches Faktum

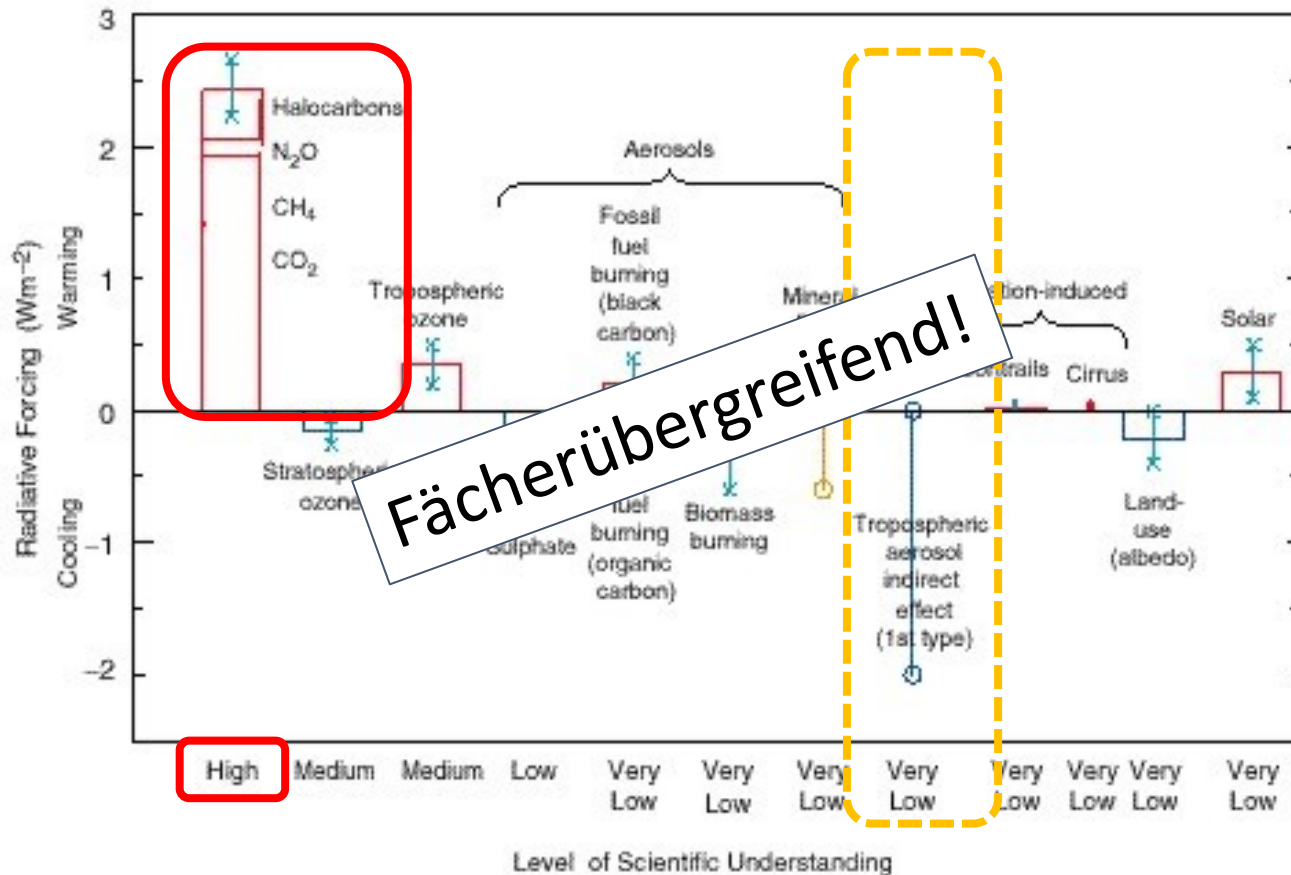
Charles D. Keeling

1958, **nach langem Desinteresse:** startet CO₂-Messungen auf Mouna Loa
plus andere Messungen → *Einfluss des Menschen auf den Kohlenstoffkreislauf*



Wissenschaft ist nicht alleinige Basis für Klimapolitik.

Vieles ist bekannt, aber noch sind wissenschaftliche Fragen offen.



Fächerübergreifend!

Gesellschaftliches Problem:

Es gibt keinen Konsens auf der politischen Ebene, sondern divergierende Wertvorstellungen!

BR Rösti: «Klimapolitik fängt mit Energiepolitik an.» - KKW-Raster 1973

N
- E
- s
- D
- A
Bei
ent
wer
- e
- c
- bei der Förderung des Ertrags u
so langen Zeiträumen geplant w
T e c h n i s c h e E b e n e
- Bei der Aufarbeitung von Brenn
das langlebige Plutonium zu 99
geholt werden.
- Das von den KKWn abgegebene Nu
10,8 Jahren verursacht eine gl
Sachverhalte auf der technischen
das wissenschaftlich Mögliche, s
bare bestimmt. Die Pu-Rückgewinn
halb so gut, weil von Anfang an
bestanden hat. Vom Standpunkt de
von 99,99 % wünschbar, etwas, da
liesse. Ebenso könnte mit erhöht
Aufbereitungsanlagen und KKWn herausgeholt werden (Kondensation bei -157°C).

Kolumne von Hans-Ulrich Bigler

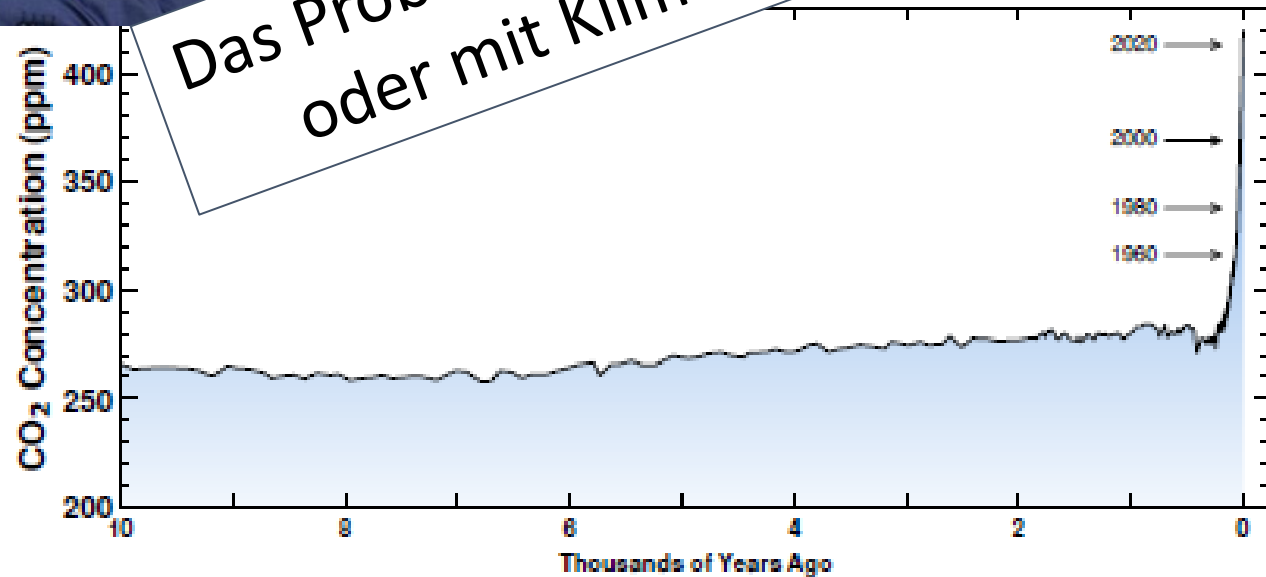
**AKW-Neubau: Wirksamer
Beitrag zur Klimapolitik!**



E b e n e
arbeitet, kann auch beim
A-Bombe.
die Endlagerung hochaktiver
Jahre vorhergesagt werden
sind die Voraussetzungen
Argumente wird ne
tively

Der politische
gegen
Massnahmen
ik
erzüge
die Kernenergie.

Das Problem auf die lange Bank schieben
oder mit Klima-Engineering lösen?



Bewertung von
seit 1973 ...

he Ebene

e

ene

W i r t s c h a f t l i c h e E b e n e
- Bau und Betrieb eines KKWn schaffen neue Arbeitsplätze.
- Wenn Industrie und Dienstleistungsbetrieben vermehrt billige elektrische

Politisches als Teil des Physikunterrichts?

Die entgegengesetzten Positionen entspringen verschiedenen Argumentationsebenen. Röstli argumentiert wirtschaftlich, Ryser argumentiert politisch. Argumente können aber nur innerhalb der gleichen Ebene übertroffen oder gar widerlegt werden. Die entgegengesetzten Folgerungen entstammen der unterschiedlichen Bewertung der folgenden fünf Argumentationsebenen: ¶

- wissenschaftlich → Z.B.: Rückholung von CO₂ aus der Atmosphäre erfordert...
- technisch → → Z.B.: Rückholung von CO₂ aus der Atmosphäre in Stil möglich. ¶
- wirtschaftlich → → Z.B.: Rückholung von CO₂ aus der Atmo... ¶
- politisch → → Z.B.: Rückholung von CO₂ ist keine private, sondern eine öffentliche Aufgabe. ¶
- weltanschaulich → Z.B.: Anstatt CO₂ zurückzuholen, sollte man es gar nicht freisetzen. ¶

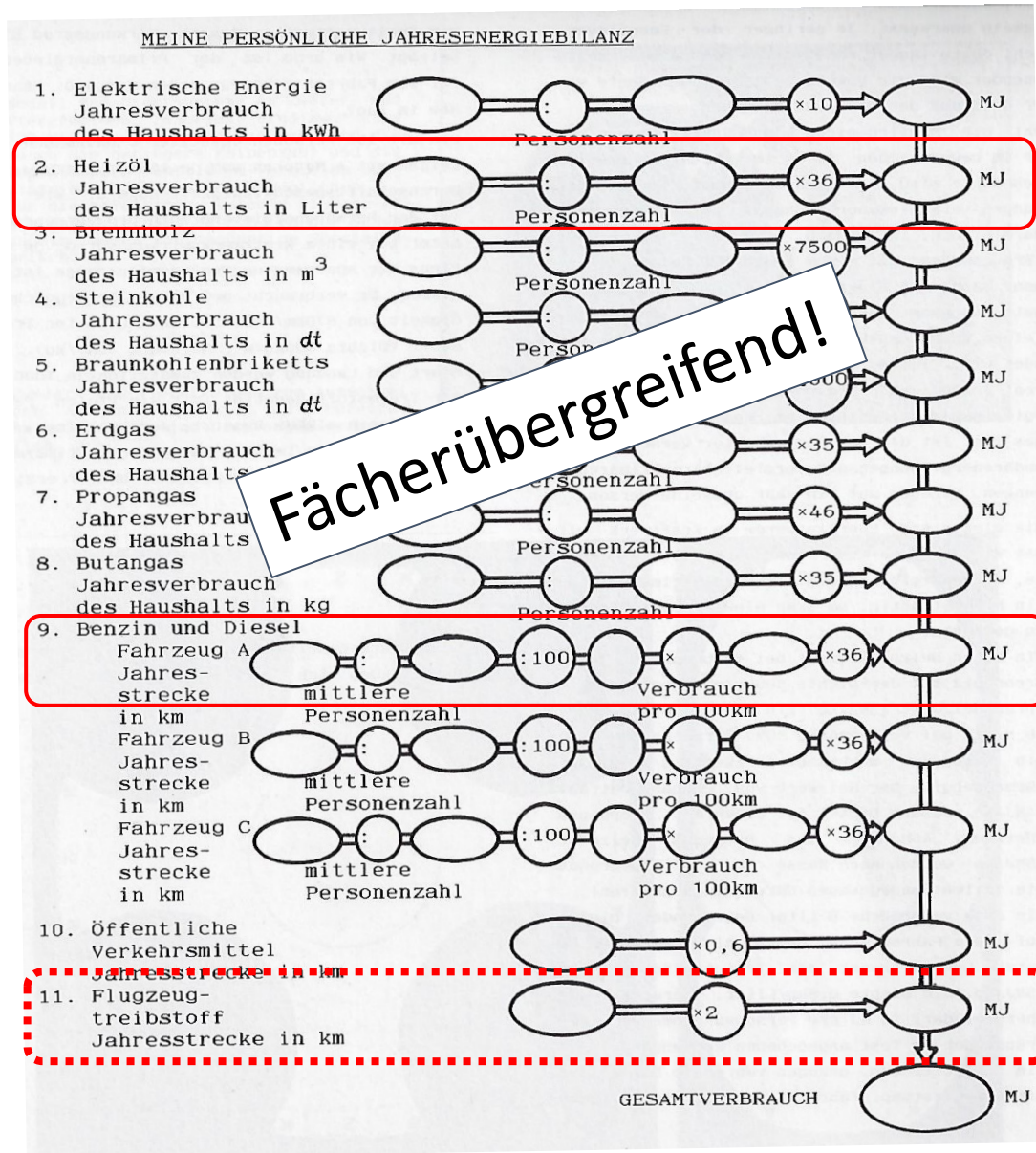
Fächerübergreifend!

Nicht gestattet: Bewertung – auch immateriell - nach Gesinnung.

Erwünscht: Analyse fremder und eigener Argumente.

Grauzone: Beeinflussung der subjektiven Werthaltungen. Achtung auf die Gruppendynamik!

Ein persönlicher Beitrag zur Klimapolitik



Die Problemlösung ... beginnt bei mir!

Werner Schmidt, 1986, *Physikaufgaben - Beispiele aus der modernen Arbeitswelt*, Klett, 77-78.

Jahresenergiebilanz konkret:

CH im Diagramm pro Kopf 100 GJ/a
 Ideal der Stadt Zürich: 2 kW => 64 GJ/a
 HP. Dreyer 2024,
 mit Fotovoltaik, ohne graue Energie:
 ohne Sizilienreise 50 GJ
 mit Sizilienreise 60 GJ

CO₂ Ausstoss (mit fossiler Umrechnung):

10 GJ entspricht einem Ausstoss von 1 t CO₂
 HP. Dreyer 2024 ohne graue Energie 6 t CO₂
 CH pro Kopf 2021 mit grauer Energie 13 t CO₂
 + weitere Treibhausemissionen

Es gibt viele Klimarechner im Web.



Soll Klimaphysik unterrichtet werden?

Welche Erfahrungen mit diesem Thema haben Sie?

**Möchten Sie «*Klima & Quanten» erproben?
(und zur Verbesserung des *Materials beitragen)**



QR-Code zur Online-Umfrage



Einzelnes aus der Geschichte der Klimaphysik – nur bis 1967

1767 Horace B. de Saussure	«Sonnenofen» = Kiste mit 3-fach Verglasung gleich heiss auf 2200 und 700 m/M
1800 Joseph Herschel	Filter für Sonnenbeobachtung => «radiant heat» => «dunkles Licht» => Infrarot
1824 Joseph B. Fourier	physikalische Aussagen zur Klimaphysik; Treibhaus ohne Energieerhaltung
1859 John Tyndall	misst Einfluss von H₂O und CO₂ auf IR-Strahlung; Konzept «Treibhauseffekt»
1885 Samuel P. Langley	entwickelt Bolometer und untersucht Rückstrahlung vom Mond
1890 J. Stefan & L. Boltzmann	Experiment & Theorie zum Gesetz zur Gesamtstrahlungsleistung
1893 Wilhelm Wien	Verschiebungsgesetz zum Strahlungsmaximum
1894 Arvid Högbom	analysiert als Geologe den CO ₂ -Zyklus; zieht anthropogenen Einfluss in Betracht
1896 Svante Arrhenius	1. Modellrechnung «Über den Einfluss des CO₂ in der Atmosphäre auf das Klima»
1900 Knut Angström	«Über die Bedeutung des Wasserdampfs ... bei der Absorption in der Atmosphäre»
1926 Lucy Mensing	«Die Rotations-Schwingungsbanden nach der Quantenmechanik»
1958 Charles D. Keeling	Beginn systematischer CO₂-Messung auf Mouna Loa, Hawaii
1967 Hans Oeschger u. a.	Luft aus Eiskernbohrungen erlaubt quantitative Paläoklima-Rekonstruktion
1967 Syukuro Manabe u. a.	Computermodelle der Atmosphäre mit Berücksichtigung der H ₂ O-Rückkopplung