

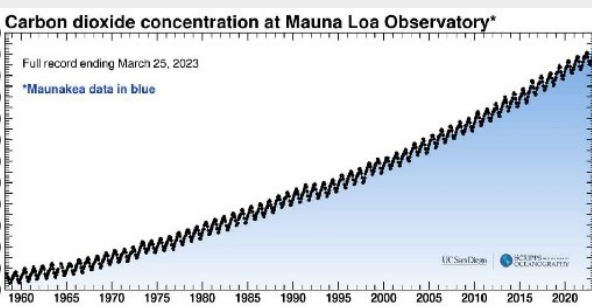


ELEMENTE DER KLIMAPHYSIK

EIN ROTER FADEN FÜR
GYMNASIASTINNEN UND GYMNASIASTEN

VON HANS PETER DREYER

WARNUNG VOR NEBENWIRKUNGEN:
DAS LERNEN VON KLIMAPHYSIK KANN IHRE WAHRNEHMUNG DER UMGEBUNG
UND IHR VERHALTEN DAUERND VERÄNDERN!



hp.dreyer@thurweb.ch

Version 0.9 – Oktober 2024



ELEMENTE DER KLIMAPHYSIK

INHALTSVERZEICHNIS

K1 Strahlungsgleichgewicht

- K1.1 Erste Annäherung an das Klima
- K1.2 Die Sonne liefert uns viel Energie
- K1.3 Plancks Strahlungsgesetz ist die Basis für klimarelevante Strahlungsgesetze
- K1.4 Einfaches Modell: Die Erde ohne Atmosphäre im Strahlungsgleichgewicht
- K1.5 Ein besseres Modell: Die Erde mit Atmosphäre und Treibhauseffekt
- K1.6 Nachweis der Wirkung von Treibhausgasen auf den IR-Strahlungsfluss

K2 Quanten und Klima: Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie

- K2.1 Ein genauerer Blick in die Atmosphäre, dem Zentrum des «Treibhaus Erde»
- K2.2 Svante Arrhenius findet den menschlichen Einfluss aufs Klima
- K2.3 Ein genauerer Blick auf Absorption und Emission am Boden
- K2.4 Ein genauerer Blick auf Absorption und Emission in der Atmosphäre
- K2.5 Wie wirkt IR-Strahlung um 14 μm mit CO_2 -Molekülen zusammen?

K3 Forschung in Klima- und Quantenphysik

- K3.1 Forschung in der Klimaphysik: Klimamodelle
- K3.2 Forschung in der Quantenphysik: Das Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon

K4 Klimaphysik und Klimapolitik

- K4.1 Zur Komplexität der Klimaphysik
- K4.2 Energienutzung, CO_2 -Freisetzung und das ICCP
- K4.3 Zur Komplexität der Politik

VERBINDUNGEN ZU DEN «ELEMENTEN QUANTENPHYSIK»

K1 Strahlungsgleichgewicht

Dieses Kapitel kann optimal im Anschluss an das Modul «Was ist Licht?» durchgearbeitet werden.

K2 Quanten und Klima: Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie

Dieses Kapitel kann zur Motivierung vor oder zur Repetition nach dem Modul «Wo ist das Elektron?» durchgearbeitet werden.



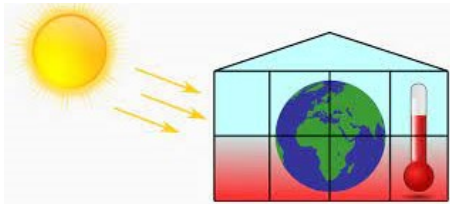



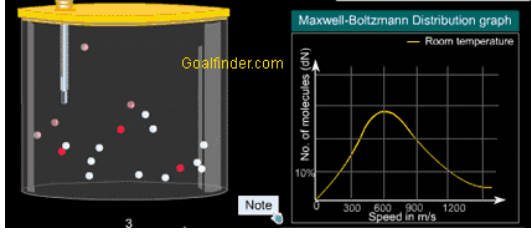



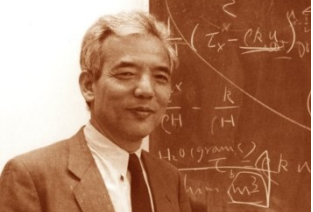
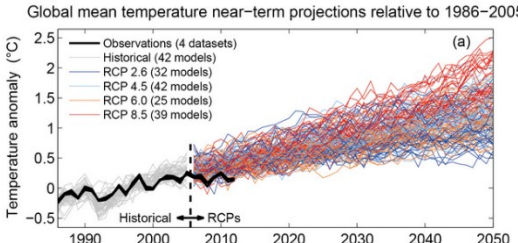
K3 Forschung in Klima- und Quantenphysik

Zwei aktuelle Nobelpreise und ihre Vorgeschichte kurz zusammengefasst: Einmal zur Klimaphysik und (als Ergänzung) zur Quantenphysik.

K4 Klimaphysik und Klimapolitik

Einige Hinweise auf die Komplexität sowohl der Klimaphysik als auch der Klimapolitik können Anregungen zu vertieftem und fächerübergreifendem Arbeiten geben.

ELEMENTE DER KLIMAPHYSIK

Menschen	Ideen und Vorstellungen	Experimente und / oder Anwendungen																																																												
	<p>Archimedes von Syracusa 250 v. Chr.</p> <p>Mathematiker Physiker Ingenieur</p>	<p>Gemäss römischer Überlieferung soll Archimedes angreifende Schiffe mit Sonnenlicht in Brand gesetzt haben, das durch einen Hohlspiegel gebündelt wurde.</p>																																																												
	<p>J. B. Joseph Fourier 1824:</p> <p>Er macht erste physikalische Aussagen zur Klimafrage noch ohne Einsicht in das Strahlungsgleichgewicht.</p>																																																													
	<p>John Tyndall 1859:</p> <p>Tyndall misst im Labor den Einfluss von H₂O und CO₂ auf den Fluss von IR-Strahlung und entdeckt den Treibhauseffekt.</p>																																																													
	<p>Joseph Stefan 1879:</p> <p>Strahlungsgesetz: Die Strahlungsleistung wächst mit T^4. L. Boltzmann leitet es aus der Thermodynamik her.</p>																																																													
	<p>Svante Arrhenius 1896:</p> <p>Erste Modellrechnung: «Über den Einfluss des CO₂ in der Atmosphäre auf das Klima»</p>	<p style="text-align: center;">TABLE VII.—Variation of Temperature ca</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="3">Latitude.</th> <th colspan="5">Carbonic Acid = 0.67.</th> <th rowspan="3">Mean of the year.</th> <th colspan="5">Carbonic Acid = 1.5.</th> <th rowspan="3">Mean of the year.</th> </tr> <tr> <th>Dec.</th> <th>Feb.</th> <th>May.</th> <th>Aug.</th> <th>Nov.</th> <th>Dec.</th> <th>Feb.</th> <th>May.</th> <th>Aug.</th> <th>Nov.</th> </tr> <tr> <th colspan="11">—</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>70</td> <td>-2.9</td> <td>-3.0</td> <td>-3.4</td> <td>-3.1</td> <td>-3.1</td> <td>-3.1</td> <td>3.3</td> <td>3.4</td> <td>3.8</td> <td>3.6</td> <td>3.6</td> <td>3.52</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>-3.0</td> <td>-3.2</td> <td>-3.4</td> <td>-3.3</td> <td>-3.22</td> <td>-3.22</td> <td>3.4</td> <td>3.7</td> <td>3.6</td> <td>3.8</td> <td>3.62</td> <td>3.6</td> </tr> </tbody> </table>	Latitude.	Carbonic Acid = 0.67.					Mean of the year.	Carbonic Acid = 1.5.					Mean of the year.	Dec.	Feb.	May.	Aug.	Nov.	Dec.	Feb.	May.	Aug.	Nov.	—											70	-2.9	-3.0	-3.4	-3.1	-3.1	-3.1	3.3	3.4	3.8	3.6	3.6	3.52	60	-3.0	-3.2	-3.4	-3.3	-3.22	-3.22	3.4	3.7	3.6	3.8	3.62	3.6
Latitude.	Carbonic Acid = 0.67.					Mean of the year.	Carbonic Acid = 1.5.					Mean of the year.																																																		
	Dec.	Feb.		May.	Aug.		Nov.	Dec.		Feb.	May.		Aug.	Nov.																																																
	—																																																													
70	-2.9	-3.0	-3.4	-3.1	-3.1	-3.1	3.3	3.4	3.8	3.6	3.6	3.52																																																		
60	-3.0	-3.2	-3.4	-3.3	-3.22	-3.22	3.4	3.7	3.6	3.8	3.62	3.6																																																		
	<p>Charles D. Keeling 1958:</p> <p>Startet CO₂-Messungen auf Mouna Loa, Hawaii im Geophysikalischen Jahr.</p>																																																													
	<p>Syukuro Manabe 1967:</p> <p>Der Japaner berücksichtigt früh in Computer-Modellen die Rückkopplung des Wasserdampfs.</p>																																																													

K1 Die Erde im Strahlungsgleichgewicht

K1.1 Erste Annäherung an das Klima

Schon im alten Ägypten spielte der Licht und Wärme spendende Sonnengott Re eine wichtige Rolle. Zu behaupten, aus dem Bild gehe bereits 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.*

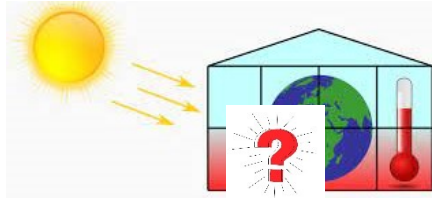


Um 1800 begann sich auch die Naturwissenschaft mit dem wärmenden Licht als Voraussetzung für das Leben auf der Erde zu befassen. J. B. Joseph Fourier

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.



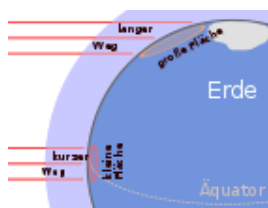
K1.2 Die Sonne liefert uns viel Energie

An einem klaren Tag liefert die Sonne pro Sekunde eine Energie von rund 1 kJ auf jeden Quadratmeter, der senkrecht zur Strahlungsrichtung steht. Dies bezeichnen wir als **Energiestromdichte $J = 1 \text{ kW/m}^2$** . Diese Grösse können wir uns folgendermassen veranschaulichen:

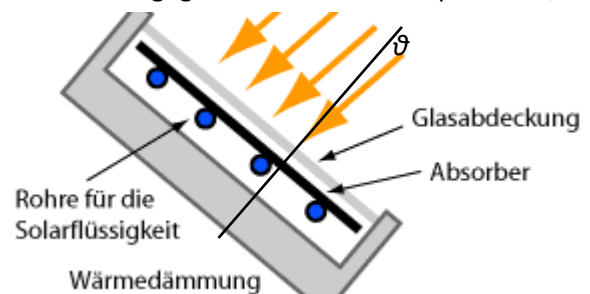
«Die Sonne liefert auf jeden Quadratmeter, was ein kleiner Wasserkocher leistet.»

Am Äquator könnte man diese 1 kW/m^2 mit einem schwarzen Kuchenblech, etwas Wasser und einem empfindlichen Thermometer leicht nachweisen. In gemässigten Breiten muss man den Kollektor, den «Sonnenenergiesammler», neigen. Zur Messung benutzt man eine gegen Wärmeverluste optimierte, geschwärzte Metallplatte, aus der mit einer Flüssigkeit die gesammelte Energie laufend abtransportiert wird. Man misst ΔT , die Temperaturzunahme der Flüssigkeit beim Durchlaufen des Kollektors und $\Delta m/\Delta t$, die Flüssigkeitsmasse, die pro Zeit durchströmt. Mit der spezifischen Wärme c der Flüssigkeit ergibt sich die gewonnene Wärmeleistung zu:

$$P = \Delta Q/\Delta t = c \cdot \Delta m \cdot \Delta T/\Delta t.$$



Man erkennt leicht, dass der Winkel ϑ zwischen dem Lot auf die Kollektorfläche und der Richtung der Sonneneinstrahlung mit $\cos \vartheta$ eine Rolle spielt: Optimal ist $\vartheta = 0^\circ$. Wenn wir die Erde als Ganzes betrachten, wie es bei Klimafragen notwendig ist, dann spielt nur die Querschnittsfläche $A_Q = \pi r_E^2$ eine Rolle, wie die Figur nebenan sichtbar macht.



Aus den 1 kW/m^2 lassen sich verschiedene Schlüsse ziehen:

- (1) Die Erdbevölkerung könnte vollständig mit Sonnenenergie versorgt werden, wenn alle Menschen sich an die Zielvorgabe der Stadt Zürich hielten: 2 kW pro Person.
- (2) Die Erde muss laufend viel Energie abgeben, sonst wäre schon längst alles Wasser am Kochen.
- (3) 2 kW/m^2 sind 10^{22} feinste Lichtquanten à $2 \cdot 10^{-19} \text{ J} \approx 1 \text{ eV}$. Das ist eine riesige Zahl, rund ein Zehntel Mol. Der Teilchenaspekt des Lichts wird bedeutungslos..

K1.3 Plancks Strahlungsgesetz ist die Basis für klimarelevante Strahlungsgesetze.

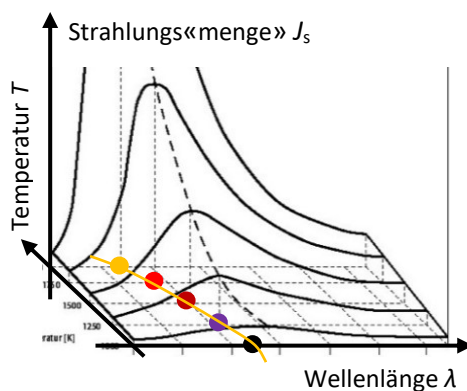
Wenn die Sonneneinstrahlung jeden Quadratmeter zu einem Wasserkocher werden lässt, dann kann das Klima auf der Erde nur konstant sein, wenn es einen Prozess gibt, der diese Energie laufend wieder abgibt. Dieser Prozess ist die Abgabe von elektromagnetischer Strahlung, und der Empfänger der Energie ist das ganze Weltall! Das Foto wurde mit einem winzigen Teil dieser Strahlung gemacht. Die Gesetze dieser Strahlung sind nicht simpel, sie sind aber für das Klima zentral und werden nun vorgestellt:



In Figur K1.1 ist Plancks Strahlungsgesetz ähnlich wie in → Figur 1.3a graphisch dargestellt. Wir haben bisher vermieden, es als Funktionsgleichung anzugeben: Die Strahlungs«menge» J_s ist genau genommen die **spektrale Energiestromdichte**. Sie ist eine Funktion von zwei Variablen, (1) der Wellenlänge λ und (2) der Temperatur T . Demnach muss die Darstellung der Funktion räumlich sein. Zudem ist die Funktion aus einer komplizierten Exponential- und einer Potenzfunktion zusammengesetzt.

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 **Gesetz von Stefan und Boltzmann**.

Joseph Stefan hat es 1879 empirisch gefunden. Der nebenan abgebildete Ludwig Boltzmann, der Gründervater der statistischen Wärmelehre, hat das Gesetz – noch vor der Quantenphysik – aus der Thermodynamik abgeleitet.

Alle (schwarzen) Körper mit der Temperatur T geben ein Gemisch von elektromagnetischer Strahlung aller Wellenlängen ab mit der totalen Leistungsdichte J in W/m^2 gemäss folgendem Ausdruck:



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

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.

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

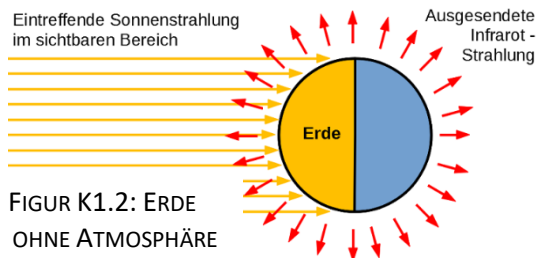
Es handelt sich um eine indirekte Proportionalität: Die Erde mit $T = 300$ K strahlt am stärksten bei einer grösseren Wellenlänge (etwa $10 \mu\text{m}$, also im Infraroten) als die Sonne mit ihren 6000 K. Diese strahlt bei $0.5 \mu\text{m} = 500 \text{ nm}$ (also im sichtbaren Bereich des Spektrums) am stärksten.

In allen Klimaüberlegungen sind klar auseinanderzuhalten:
(I) das **sichtbare Sonnenlicht** (um 500 nm) und (II) das **unsichtbare IR-Licht der Erde** (um $10 \mu\text{m}$).

K1.4 Ein einfaches Modell: Die Erde ohne Atmosphäre im Strahlungsgleichgewicht

Das Klima und seine Änderung zu verstehen ist sehr kompliziert. Wir gehen schrittweise vor und betrachten die Erde in einer ersten Annäherung als Körper ohne Atmosphäre, der die Gesetze (K1.2) und (K1.3) eines ideal schwarzen Körpers erfüllt. Sie soll alle Arten von Strahlung vollkommen verschlucken und aussenden können. Indem wir bewusst Vereinfachungen vornehmen, arbeiten wir mit einem Klimamodell. Die Ergebnisse müssen dementsprechend kritisch bewertet werden

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



FIGUR K1.2: ERDE OHNE ATMOSPHERE

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 \rightarrow K1.2 festgestellt worden ist.

Für die Energieabgabe ist hingegen die gesamte Erd-

oberfläche $A_E = 4\pi r_E^2$ bedeutsam. 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:

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

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

Ohne Atmosphäre wäre die Erde ebenso lebensfeindlich wie der Mond!

Im Modell haben wir nicht berücksichtigt, dass die Erde nicht überall schwarz ist wie Vulkanasche, dass der Erdboden Wärme speichern kann und dass die Erde rotiert und leitet und Wärme mitführt.

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

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

Weil die Erdoberflächentemperatur um 300 K liegt, strahlt die Erde am stärksten im Wellenlängenbereich von $10 \text{ } \mu\text{m}$, 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.

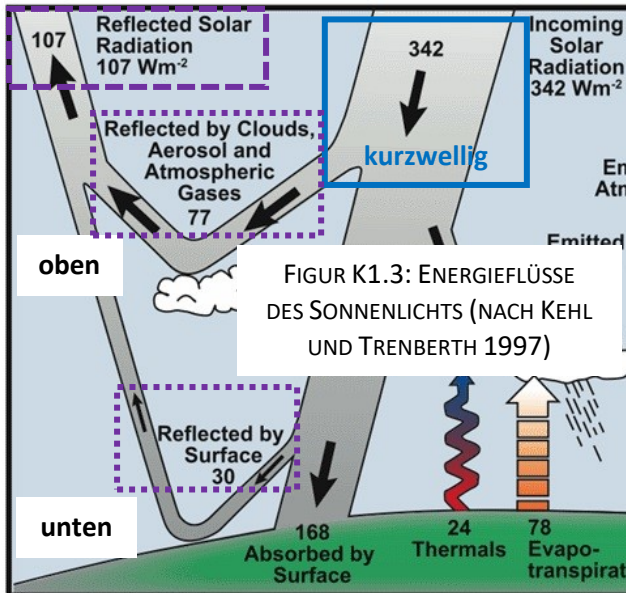
Ganz anders wirken sich Veränderungen im Gesetz von Stefan und Boltzmann aus: Wegen der vierten Potenz ist eine kleine Temperaturänderung mit einer grossen Strahlungsleistungsänderung verknüpft

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.

K1.5 Ein besseres Modell: Die Erde mit Atmosphäre und Treibhauseffekt

Glücklicherweise ist die Erde so schwer, dass sie Gase an der Flucht ins Weltall zu hindern und in einer Atmosphäre zu halten vermag. Die Atmosphäre schützt flüssiges Wasser am Boden und ermöglicht damit das Leben. Die Atmosphäre verändert die in Figur K1.2 dargestellten, einfachen Energieflüsse:

Wir betrachten in Figur K1.3 die Auswirkungen auf die 342 W/m² kurzwellige Strahlung, die «von oben»



einfällt (blau). Sie stammt von der 6000 K heißen Sonnenoberfläche und besitzt nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz (K1.3) das Maximum im sichtbaren Teil des Spektrums:

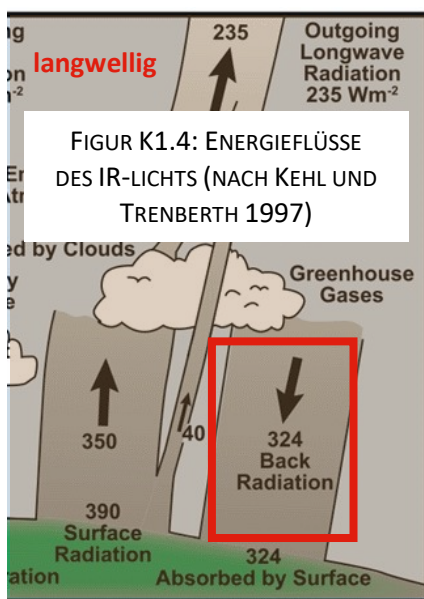
$$\lambda_{\max} \cdot 6000 \text{ K} = 2.898 \text{ mmK} \Leftrightarrow \lambda_{\max} = 483 \text{ nm, also im gelb-grünen Bereich (} \rightarrow \text{Figur 1.1).}$$

Figur K1.3 zeigt, dass 77 W/m², fast ein Fünftel des Sonnenlichts, von Wolken, Schwebeteilchen (Aerosolen) und Gasen der Atmosphäre ins Weltall zurückgeworfen wird.

30 W/m², etwa ein Zehntel, wird am Boden von gefrorenem Wasser in Form von Schnee und Eis und von flüssigem Wasser an der Oberfläche von Meeren, Seen und Flüssen zurückgeworfen. Nur die restlichen 168 W/m² erreichen die Erdoberfläche und werden von ihr absorbiert, verschluckt, oder «verwandelt», wie Einsteins

ursprüngliche Terminologie 1905 lautete.

Der für unser Klima entscheidende Einfluss der Atmosphäre auf die langwellige IR-Strahlung, die gemäss den Überlegungen von K1.2 von der Erde ins Weltall zurückgestrahlt werden muss, wird in Figur K1.4 dargestellt. Sie ergänzt die Figur K1.3. Wir lesen heraus:



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):

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

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

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

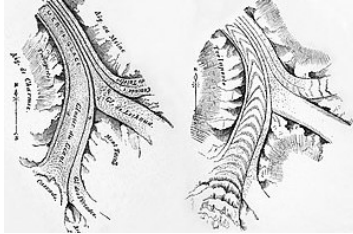
Gemäss diesem Modell mit Atmosphäre ist die Erdoberfläche im Mittel 15 °C warm.

Der atmosphärische Treibhauseffekt ist lebensnotwendig.

Es wäre günstig, wenn die Treibhausgase und damit der Treibhauseffekt und damit auch die Erdoberflächentemperatur konstant wären. Die Eiszeiten zeigen, dass dieser Idealzustand allerdings auch ohne Einwirkungen durch den Menschen nicht gegeben ist.

K1.6 Nachweis der Wirkung von Treibhausgasen auf den IR-Strahlungsfluss

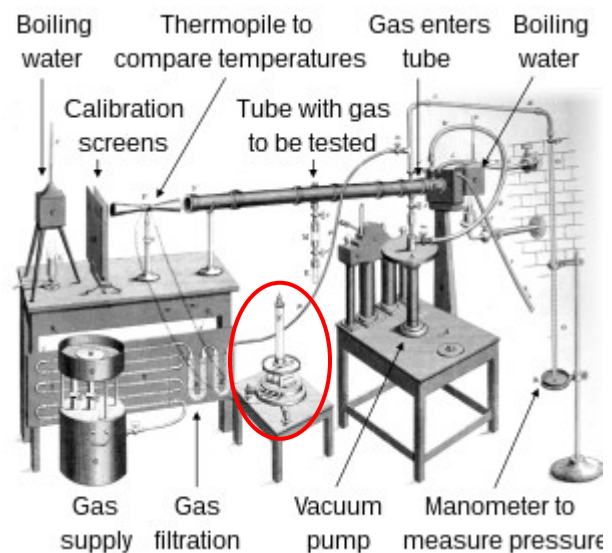
Der aus armen Verhältnissen stammende universell interessierte John Tyndall konnte seine Physikausbildung erst in höherem Alter bei Bunsen in Marburg starten. Seine vielseitigen Interessen – er war u. A. ein Advokat für Darwins Evolutionstheorie – führten ihn auch in die Schweiz, wo er als erster das Weisshorn bestieg. Er beobachtete und zeichnete auch die Gletscherflüsse und fragte sich, wie das aktuelle Gletscherwachstum mit den früheren Eiszeiten zusammenpasse. Dabei stiess er auf die Ideen von Fourier, die unterdessen weiter entwickelt und durch die Rolle der IR-Strahlung ergänzt worden waren. Tyndall



begann 1859 mit Messungen zum Absorptionsverhalten verschiedener Gase und entwickelte das Konzept des Treibhauseffekts. Zur Illustration der Bedeutung von Experimenten für die Entwicklung der Naturwissenschaft ist in Figur K1.5 seine Messapparatur von 1861 reproduziert.



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 links stammende Referenzstrahlung. Die kleine Spannung wird mit dem Galvanometer (= Voltmeter, rot 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



Tyndall konnte nur Vergleichsmessungen machen, aber trotzdem die zentralen Rollen von H_2O und CO_2 im atmosphärischen Treibhauseffekt nachweisen. Später begann er mit verschiedenen heissen Würfeln zu experimentieren und stiess auf die Vermutung, dass die «Strahlungsmenge» mit der 4. Potenz der Temperatur wachse. Das brachte Josef Stefan (im Foto) zu langen Experimentierreihen mit der Folgerung im Original von 1879: *Man kann also aus der hier durchgeführten Vergleichung das Resultat ziehen, (...) dass aber den Versuchen von de la Provostaye und Desains, welche zum Theil bei niedrigeren Temperaturen ausgeführt sind, die von Dulong und Petit aufgestellte Formel sich weniger gut anschliesst, als die neue Formel der vierten Potenzen.* → Gesetz (K1.2)

Die Arbeit von Stefan führte zur Arbeit von Wien, (nicht nur) diese führten zu den Arbeiten in Berlin an der PTR (→ 1.2.1) und diese zu Max Planck und der Quantenphysik. Man kann also zusammenfassen:

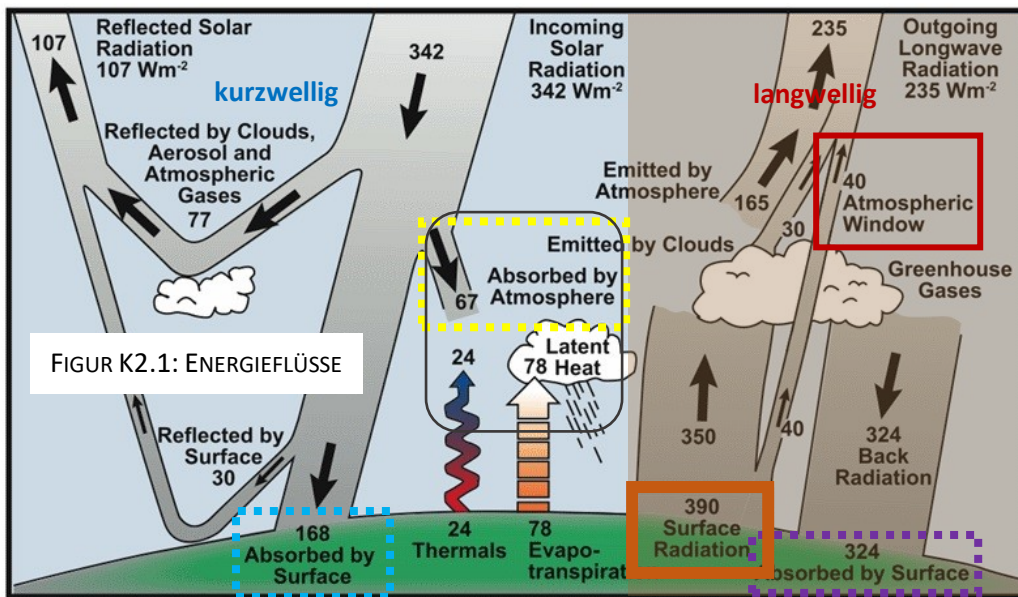
Die Quantenphysik bildet eine wichtige Grundlage für die Klimaphysik.
Die Klimaphysik ist auch eine von vielen Quellen für das Entstehen der Quantenphysik.

K2 Quantenphysikalische Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie steuert das Klima

Quanten und Klima: Bei beiden Gebieten, die scheinbar nichts miteinander zu tun zu haben, geht es um Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie. Der Fokus der Quantenphysik liegt im Atomaren: Die Fluoreszenz eines Kristalls wird verursacht durch auftreffende Strahlung. Albert Einstein konnte mit der Annahme des Lichtquants erklären, weshalb das ausgesandte Licht eine kleinere Frequenz hat als das einfallende. Das Klima betrifft die ganze Welt und den Strahlungsaustausch mit dem Weltall. John Tyndall wies die grosse Rolle des CO₂ nach. In diesem Molekül, in diesem Stein des Anstosses bei der Debatte um den menschlichen Einfluss aufs Klima, treffen sich beide Gebiete.

K2.1 Ein genauerer Blick in die Atmosphäre, dem Zentrum des «Treibhaus Erde»

Nach den Vorarbeiten im Kapitel K1 ist es an der Zeit, sich tiefer mit der Materie zu beschäftigen.



In Figur K2.1 sind eine ganze Reihe von z. T. neuen Energieflüssen gezeichnet: Es geht um die Absorption und um die Emission von kurz- und langwelligem Licht oder um Wärmetransport.

(1) Wir stellen fest, dass im Gegensatz zur vereinfachten Betrachtung in Kapitel K1.5, nicht die ganzen 168 W/m² an sichtbarem Licht, die von der Erdoberfläche absorbiert werden, als IR abgestrahlt werden müssen. Ein Teil (24 W/m²) wird als warme Luft in die Atmosphäre abgeleitet. Ein weiterer Teil von 78 W/m² dient dazu, Wasser zu verdampfen. Dieses gelangt mit der warmen Luft in die Höhe und bildet dort zum Teil Wolken. Diese beiden Energieflüsse treiben den **Wettermechanismus** an. Als «Surface Radiation» im IR abgestrahlt werden deshalb «nur»

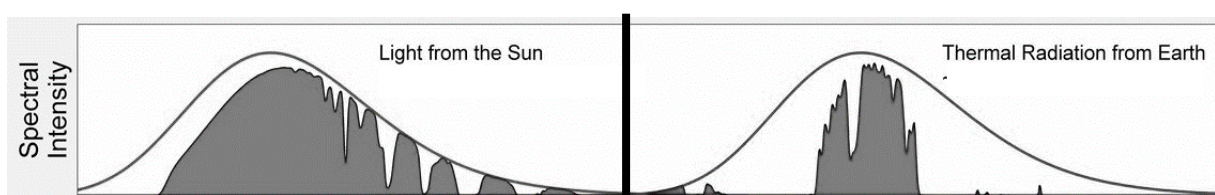
$$(168 - 24 - 78 + 324) \text{ W/m}^2 = 390 \text{ W/m}^2.$$

(2) Die Atmosphäre ist für Sonnenlicht nicht vollkommen transparent. Ein beachtlicher Teil (rund 20 %, genauer 67 W/m²) wird von den Gasen der Atmosphäre absorbiert. Er heizt zusammen mit der erwärmten aufgestiegenen Luft (24 W/m²) und dem Teil des Wasserdampfs, der zu Wolken kondensiert und teilweise gefriert (ein Bruchteil von 78 W/m²), die Atmosphäre auf.

(3) Kontrolle: Mit den angegebenen Energieflüssen ist die Atmosphäre im stationären Gleichgewicht: Auf diverse Arten werden der Atmosphäre zugeführt: $(67 + 24 + 78 + 390) \text{ W/m}^2 = 559 \text{ W/m}^2$.

Von der Atmosphäre werden nur als IR abgegeben: $(165 + 30 + 40 + 324) \text{ W/m}^2 = 559 \text{ W/m}^2$.

(4) Bemerkenswert ist das **«atmosphärische Fenster» für IR-Strahlung**, durch das nur 40 W/m² ungehindert fließen. Das sind nur rund 10 % der 390 W/m², die durch die Atmosphäre hindurchmüssen. Die Atmosphäre ist im IR fast undurchsichtig. Figur K2.2 illustriert den Unterschied sichtbar/Infrarot.



FIGUR K2.2: DURCHLÄSSIGKEIT DER ATMOSPHERE IM SICHTBAREN (LINKS) UND IM INFRAROTEN (RECHTS) BEREICH

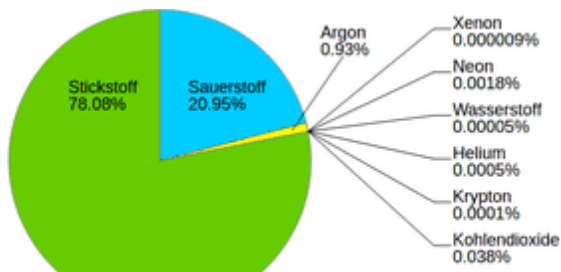
K2.2 Svante Arrhenius und Arvid Högbom analysieren den menschlichen Einfluss aufs Klima

Die grosse Rolle, die das CO₂ im Verhalten der Atmosphäre spielt, hat der Schwede **Svante Arrhenius** schon festgestellt, als Plancks Wirkungsquantum noch unbekannt war. Dank eines grosszügigen Stipendiums durfte er sich in Mitteleuropa weiterbilden, unter anderem 1887 bei Ludwig Boltzmann in Graz. Im Bild sieht man Arrhenius 1878, zwei Jahre nach seinem Gymnasialabschluss.



Zurück in Schweden benützte Arrhenius unter anderem das Stefan-Boltzmann-Gesetz (K1.2), um der Frage nach den **Ursachen für die Eiszeiten** nachzugehen. Der Wasserdampf schien dabei keine Rolle zu spielen, denn dessen Anteil wechselt täglich, während das CO₂ möglicherweise über geologische Zeiträume schwankt. Arrhenius machte 1896 ein Klimamodell, in dem er die Erde zwischen 70° Nord und 60° Süd in Segmente unterteilte und für jedes von Hand die Strahlungsbilanz mit vier verschiedenen Werten des CO₂-Gehalts ausrechnete. Er fand, dass eine Halbierung des CO₂-Gehalts zu einer Abkühlung von etwa 5 °C führen und damit die Eiszeiten erklären könnte.

Was aber konnte einen derartigen Wechsel des CO₂-Gehalts der Atmosphäre bewirken? Da spielt die



FIGUR K2.3: ZUSAMMENSETZUNG TROCKENER LUFT

Zusammensetzung der Luft eine Rolle, die im Diagramm aus WIKIBOOKS dargestellt ist. Wir veranschaulichen den Mix durch die Anteile an einer fiktiven, total 10 km hohen Luftschicht. Sie umfasst:

7.8 km inerter Stickstoff als N₂,

2.1 km lebenswichtiger Sauerstoff als O₂,

knapp 100 m inerte Edelgase wie Argon,

aktuell rund **3,8 m Kohlendioxid CO₂** und

zusätzlich zwischen 0 m und 400 m **Wasserdampf**.

Der Anteil des CO₂ ist also gering. Die Menge CO₂, die die Menschheit pro Jahr durch das Verbrennen von Kohle usw. in die Luft setzt, beträgt nach einer Rechnung von Arrhenius' Kollegen Arvid Högbom nur 1 ‰ dieses Werts. Im Verlaufe geologischer Zeiträume würde sich dieser Anteil aber aufsummieren. Der Mensch könnte via CO₂ das Klima beeinflussen, das ist die Bilanz der 1896 publizierte Arbeit «On the influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature on the Ground». – Diese Prognose kümmerte aber in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts kaum jemanden. Für Arrhenius schien das Aufschieben der nächsten Eiszeit eher positiv. Walter Nernst (→ 1.4.1) schlug sogar vor, zur «Klimaverbesserung» technisch zusätzliches CO₂ zu erzeugen und in die Atmosphäre zu lassen.

K2.3 Ein genauerer Blick auf Absorption und Emission durch Materie am Boden

In den Figuren K1.3 und K1.4 geht es an zwei Stellen um Absorption am Boden: einerseits um 168 W/m² absorbiertes Sonnenlicht, andererseits um 324 W/m² absorbiertes IR-Licht, das aus der Erdatmosphäre stammt. In einem einfachen Modell kann man annehmen, viele Bereiche der Erdoberfläche verhielten sich wie ein schwarzer Körper in Plancks Strahlungsgesetz. Sie bestünden aus Atomen mit Elektronen die für jede Frequenz als vollkommen absorbierende oder emittierende Antennen wirkten: fiktive Oszillatoren.



FIKTIVER OSZILLATOR



Die Wirklichkeit ist komplexer. Die Atome in einem grünen Blatt absorbieren nur gewisse Teile des Sonnenlichts und senden eine Lichtmischung zurück, die wir als grün wahrnehmen. Schwarze Vulkanasche erfüllt die Annahme eines schwarzen Körpers sehr gut, ein Schneefeld aber sehr schlecht.

Je besser ein Klimamodell sein will, umso genauer muss es neben vielen anderen Faktoren auch das spektrale Verhalten der Erdoberfläche berücksichtigen. Gips zum Beispiel absorbiert bei $\lambda = 10 \mu\text{m}$ etwa zu 90 %, bei $\lambda = 1 \mu\text{m}$ jedoch nur etwa 20 %. Das gleiche Problem macht sich auch bei der kontaktlosen Temperaturmessung (→ 1.2.1) bemerkbar.

Ein genauerer Blick auf das absorbierende und emittierende Material erfordert mehr Quantenphysik.

Doch die Quantenphysik der Materie ist anspruchsvoll. An dieser Stelle geben wir uns mit einer Aussage von 1910 von Walter Nernst zufrieden: *Derzeit ist die Quantentheorie im Wesentlichen eine Rechenregel, man darf wohl sagen eine Regel mit höchst wunderlichen, ja sogar grotesken Eigenschaften.* Zu diesen «grotesken Eigenschaften» gehörte die Annahme, dass in einem Kristallgitter schwingenden Atome Energie nur quantisiert aufnehmen und abgeben können. Diese Energiequanten sind durch h und die Frequenz f des Oszillators bestimmt: $\Delta E_{\text{mechanisch}} = hf$. Von hier bis zur quantenphysikalischen Erklärung des grünen Blatts ist ein langer Weg. (Mehr in → 2.7.)

K2.4 Ein genauerer Blick auf Absorption und Emission durch Materie in der Atmosphäre

Dem vielseitigen John Tyndall gelang nicht nur die Einsicht in den Treibhauseffekt, sondern auch die Erklärung einer Wechselwirkung zwischen Licht und Materie. In der Atmosphäre gibt es Schwebeteilchen, die kleiner als $1 \mu\text{m}$ sind: Stäubchen, Wassertröpfchen usw. Wenn Licht auf sie trifft, wird es abgelenkt, gestreut. Diese Tyndall-Streuung lenkt blaues Licht stärker ab als rotes, so dass hindurchkommendes Licht rötlich erscheint. Tyndall benutzte diesen Effekt, um schon 1871 Londons Luftverschmutzung zu quantifizieren.



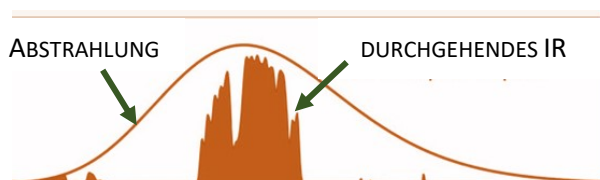
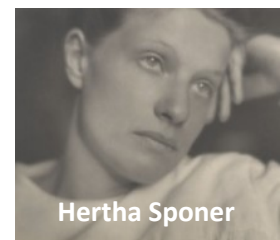
Dass die Atmosphäre für verschiedene Lichtarten unterschiedlich durchlässig ist, ist aber nicht auf die Tyndall-Streuung oder die Rayleigh-Streuung, welche die Blaufärbung des Himmels verursacht, zurückzuführen, sondern auf Prozesse in atomarer Ebene, als in der Größenordnung 10 nm .

FIG. K2.4a: ABSORPTION DER ATMOSPHÄRE IM SICHTB.

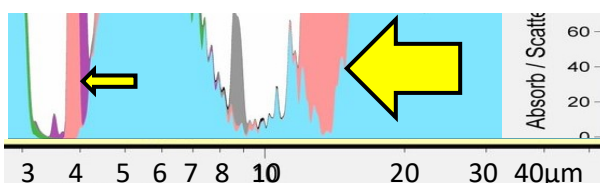


Die blauen Flächen zeigen den Anteil, der bei verschiedenen Wellenlängen hindurchgelangt. Auffällig ist, dass bei kleinen Wellenlängen alles Licht absorbiert wird. Die energiereichen UV-Quanten bewirken Photoionisation in der Luft und werden dabei absorbiert.

Schon um 1920, als man sich noch keine Sorgen um den Zustand der Atmosphäre machte, war es gelungen, Schwingungs- und Rotationseigenschaften von **Molekülen** wie N_2 oder O_2 zu erklären, die den Hauptteil der Luft ausmachen. Man stellte sich im Modell diese Moleküle als zwei Kügelchen vor, die durch eine Feder verbunden waren. Diese Moleküle durften nur quantisiert schwingen und auch nur quantisiert rotieren. Hertha Spöner war eine der ersten Frauen, die in der theoretischen Physik arbeiteten. Sie schrieb ihre Dissertation «Über ultrarote Absorption zweiatomiger Gase». Von ihren männlichen Kollegen gefördert, wurde sie die erste Physik-Professorin in Göttingen. Später wanderte sie in die USA aus. Offenbar ist bereits bei zweiatomigen Molekülen der Infrarot-Bereich interessanter.



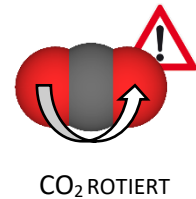
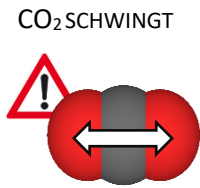
FIGUR K2.4b: ABSORPTION DER ATMOSPHÄRE IM IR



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 K2.4b 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 H_2O (blau) und CO_2 (rosa) verantwortlich sind. Die Absorption von CO_2 bei $14 \mu\text{m}$ ist wichtig, denn dort absorbiert H_2O nicht und dort strahlt die Erde mit grosser Intensität. Die Absorption von CO_2 bei $4 \mu\text{m}$ ist weniger wichtig; dort ist die Intensität der Abstrahlung kleiner.

K2.5 Wie wirkt IR-Strahlung von etwa 14 μm mit CO_2 -Molekülen zusammen?

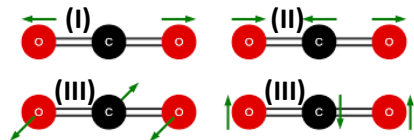
Wir beantworten diese Frage hier mit der Quantenphysik von 1920. Wir nehmen an, auf irgendeine Art und Weise existierten stabile Moleküle aus Atomen mit einem positiven Kern und negativen Elektronen in einer Hülle von etwa 100 pm Ausdehnung. Das CO_2 -Molekül im Besonderen sei gestreckt und könne als Ganzes schwingen und rotieren, wie die beiden Figuren es andeuten. Natürlich ist das eine Modellvorstellung. Zusätzlich akzeptieren wir die Forderung der frühen Quantenphysik, dass Schwingungen und Rotationen nur mit bestimmten Energie-Portionen erfolgen könnten.



ABSCHÄTZUNG DER BEI SCHWINGUNGEN AUSGETAUSCHTEN ENERGIE

Bekannt ist aus der Chemie, dass beim Entstehen von CO_2 jede der zwei Doppelbindungen eine Energie von 745 kJ/mol freisetzt. Wir stellen uns vor, das C-Atom und jedes der beiden O-Atome seien durch eine Feder verbunden, in der eine Energie von $1.24 \cdot 10^{-26}$ J stecke. Wenn wir das Federgesetz mit der Federkonstanten k und der Verlängerung y für die gespeicherte Energie $E = \frac{1}{2}ky^2$ benutzen, können wir die Federkonstanten der «molekularen Feder» bestimmen. Für y setzen wir die Bindungslänge ein, die 120 nm beträgt; für E benutzen wir die Bindungsenergie. Man erhält $k = 172$ N/m.

Ein Molekül wie das CO_2 kann auf verschiedene Arten schwingen: (I) die beiden O-Atome schwingen symmetrisch, während das C-Atom ruht; (II) die O-Atome bewegen sich gemeinsam entgegengesetzt zum C-Atom auf der Symmetrieachse; (III) wie (II), aber quer zur Symmetrieachse. Wenn der Schwerpunkt ruht, sind bei (II) und (III) die Bewegungen der schwereren O-Atome viel kleiner als die des leichteren C-Atoms.

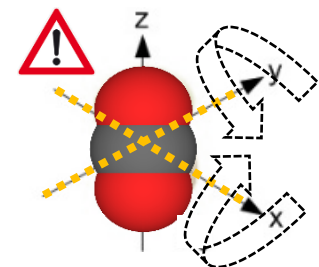


Wir benutzen die Formel für die Berechnung der Schwingung eines Federpendels: $\omega = (k/m)^{1/2}$ und setzen entsprechend der Schwingung (I) die Masse eines O-Atoms = $2.7 \cdot 10^{-26}$ kg ein. Wir erhalten für die Frequenz $f = \omega/2\pi = 40$ THz.

Ist es möglich, dass IR-Strahlung von 40 THz, also von einer Wellenlänge $\lambda = c/f = 7.5 \cdot 10^{-6}$ m = 7.5 μm , das Molekül in Resonanz zu Schwingungen (I) anregt? – Leider nein! Nur mit den Schwingungsformen (II) und (III) sind elektrische Dipolmomente verbunden, die für den Energieaustausch zwischen dem elektrischen Feld der Strahlung und der Materie nötig sind. Aber diese Schwingungen werden ähnliche Frequenzen besitzen, wie die Schwingung (I). Die Rechnung zeigt, dass die Schwingungen (III) für die Absorption bei 14 μm und die Schwingung (II) für die Absorption bei 4 μm verantwortlich sind.

ABSCHÄTZUNG DER BEI ROTATIONEN AUSGETAUSCHTEN ENERGIE

Das CO_2 -Moleküle kann um drei Achsen rotieren: (Z) um die z-Achse und (X) um die x- oder die y-Achse, die in der Figur angedeutet sind. (Z) ist kompliziert, da Spin und Bahndrehimpuls der Elektronen ins Spiel kommen, und spielt in der Atmosphäre keine Rolle. Für (X) benutzen wir die Gesetze der klassischen Drehbewegungen: $E = \frac{1}{2}J\omega^2 = L^2/2J$ und $J = mr^2$ und $L = rp$ der Drehimpuls. Dabei sind r die Entfernung der Masse m von der Drehachse, J das Trägheitsmoment und E die Rotationsenergie. Zusätzlich kommt:



Auch der Drehimpuls ist quantisiert. Die frühe Quantenphysik schreibt $L_j = j \cdot h/2\pi$ mit Quantenzahl j .

Wenn wir mit der Bindungslänge und der Masse des O-Atoms unter Vernachlässigung des C-Atoms das Trägheitsmoment des CO_2 -Moleküls ausrechnen, erhalten wir $J = 3.8 \cdot 10^{-46}$ kgm². Mit der Drehimpulsquantenzahl $j = 1$ erhalten wir $L = 1.1 \cdot 10^{-34}$ Nms und daraus für die kleinste Rotationsenergie des CO_2 -Moleküls den Wert $E = 1.5 \cdot 10^{-23}$ J = 92 μeV . Entsprechend sind die Werte für $j = 2, 3, 4$ usw. Mehr oder weniger viele von diesen kleinen Energieportionen sorgen für die Verbreiterung der Schwingungslinien bei 4 $\mu\text{m} \cong 310$ meV und 14 $\mu\text{m} \cong 90$ meV. Die Spektrallinien verbreitern sich zu Spektralbanden.

CO_2 absorbiert elektromagnetische Strahlung bei 14 μm und bei 4 μm , indem eine antisymmetrische Schwingung und zusätzlich eine der vielen Rotationsstufen angeregt werden.

K3 Aktuelles aus Klima- und Quantenphysik

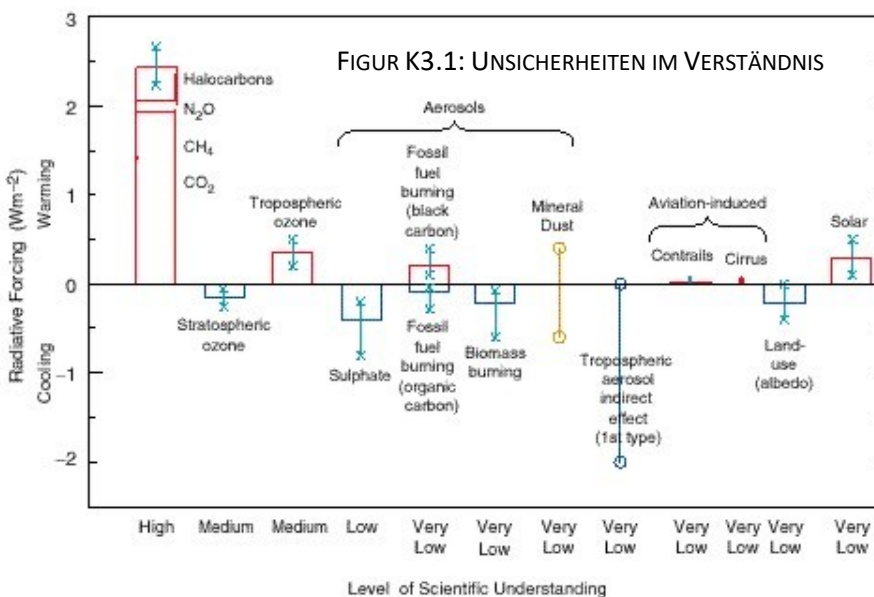
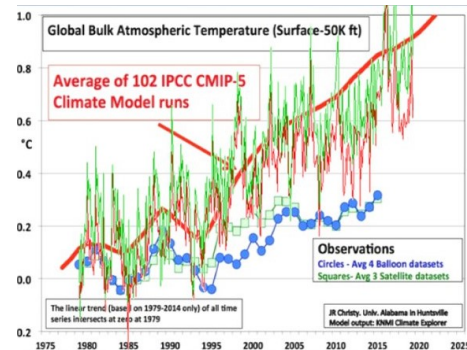
K3.1 Forschung in der Klimaphysik: Klimamodelle

AKTUELLES



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 the other half to **Giorgio Parisi** for the discovery of the interplay of disorder and fluctuations in physical systems from atomic to planetary scales.

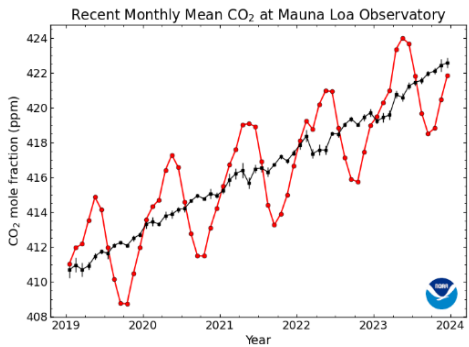
Aus der Sicht des Nobel-Komitees ist das Erdklima ein Beispiel für ein komplexes physikalisches System, natürlich ein besonders wichtiges. Die Schwierigkeiten komplexer Systeme wurde vom Mathematiker Poincaré schon um 1900 im Zusammenhang mit der Stabilität des Sonnensystems erkannt. Sobald man die Kräfte 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. Mit Grosscomputern kann man Näherungslösungen finden. Das Bild deutet an, wie stark 102 verschiedene Modelle untereinander und von Messungen abweichen. Eine zentrale Schwierigkeit beim Klima stellt die Variable «Zeit» dar. Sie spielt z. B. auch beim Sonnensystem eine Rolle. Dort gibt es aber eine «vernünftige» Zeitbasis, etwa die Umlaufzeit eines mittleren Planeten. So etwas gibt es beim Berechnen von Klimamodellen nicht. Wenn «Klima» als «Durchschnittswetter» betrachtet wird, dann spielen sich manche Prozesse innerhalb von Tagen, andere innerhalb von Monaten ab. Das El Nino-Phänomen taucht alle paar Jahre auf, Sonnenfleckentaktivitäten variieren innerhalb von Jahrzehnten, die Erdbahnparameter variieren innerhalb von Jahrhunderten, der CO₂-Austausch zwischen Atmosphäre, Ozeanen und Gesteinen beansprucht Jahrtausende usw. Hasselmann und Parisi haben mit vielen anderen dazu beigetragen, soviel Ordnung in das scheinbare Chaos zu bringen, dass es möglich wird, die verschiedenen Modelle und ihre Schwankungen untereinander und mit den Messwerten in Beziehung zu setzen.



Das Problem sind die unsicheren Voraussetzungen, die in die Modelle eingehen müssen. Die Strahlungsauswirkungen der Treibhausgase sind wissenschaftlich gut bekannt (1. Säule links), die ähnlich grossen, umgekehrten Auswirkungen der Aerosole in der Troposphäre hingegen sind nur sehr schlecht bekannt (Säulen 4 bis 7 von links).

VORGESCHICHTE

Seit den Zeiten von Arrhenius ist klar, dass die Menschheit **ein Einmal-Experiment** macht, indem sie die fossilen Kohlenstoffvorräte verbrennt. Nicht klar ist, ob dadurch das Klima weltweit in einer Weise verändert wird, die für die meisten Menschen negativ ist. Unterdessen sind zwar die wissenschaftlichen Grundlagen der Atmosphären- und Geophysik viel besser, so dass Angström, ein erster «Klimaleugner», der 1901 die Folgerungen von Arrhenius anzweifelte, widerlegt ist. Die Messdaten, die sogar den Einfluss der jahreszeitlich schwankenden Begrünung klar zeigen, sind beeindruckend. Mit zunehmendem Kenntnisstand wächst langsam das Bewusstsein für die **ungeheure**



Komplexität der Klimathematik.

Die Zeit ist in der Klimaphysik eine wichtige und schwierige Variable. Im Bild von 1967 untersucht Hans Oeschger, einer der Pioniere der Paläoklimatologie, Grönlands. Vor allem die Analyse von Isotopenverhältnissen in Eisbohrkernen und Sedimenten hat zeigen können, dass sich das Erdklima schon in ganz verschiedenen relativ stabilen Zuständen befunden hat, teilweise mit 10mal mehr CO₂ als heute. Zwischen diesen Zuständen gab es Übergänge. Schon anfangs des 20. Jahrhunderts wurde darüber diskutiert, wieweit die Ozeane und die Pflanzenwelt in der Lage seien, innert nützlicher Zeit genügend CO₂ aus der Atmosphäre herauszuholen, damit unser Klima stabil bleibe: **negative Rückkopplung**.

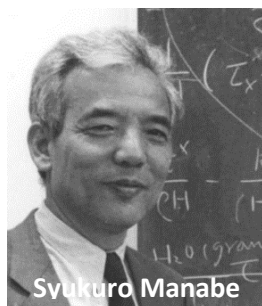


Hans Oeschger

Noch 1951 stand im *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*. Bessere Spektroskopie führte zur Widerlegung dieser Behauptung, wie die Figur K2.4b zeigt.

Das in der Gesamtwirkung stärkste Treibhausgas ist der *Wasserdampf*, dessen Anteil am natürlichen Treibhauseffekt zwischen 36 und 70 Prozent schwankt. Da wärmere Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann, sorgt die Temperaturerhöhung zu einer **positiven Rückkopplung**: Je mehr Wasserdampf, umso mehr IR-Rückstrahlung, umso höhere Erdoberflächentemperatur und umso mehr Wasserverdampfung. Positive Rückkopplungen können katastrophal schnelle Übergänge verursachen. Ein solches Ereignis wird hier vorgestellt: de.wikipedia.org/wiki/Dansgaard-Oeschger-Ereignis

Erst relativ spät wurde die **Bedeutung der Schichtung**, insbesondere der Wolken, erkannt und in immer raffinierteren Klimamodellen eingebaut. Syukuro Manabe entwickelte mit seinen Mitarbeitern bereits 1967 das *one-dimensional, single-column model of the atmosphere in radiative-convective equilibrium with positive feedback effect of water vapor*.

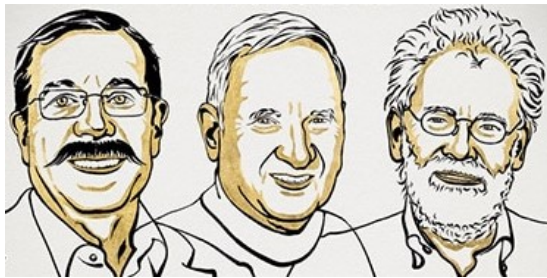


Syukuro Manabe

Manabe et al. fanden mit wachsendem CO₂ eine Temperaturzunahme auf der Erdoberfläche und eine -abnahme in der Troposphäre. Bis in die Gegenwart werden dank wachsender Leistungsfähigkeit der Computer immer raffiniertere Modelle gerechnet. Deren Ergebnisse werden mit vorhandenen Messwerten und rekonstruierten Daten von früher verglichen. Verschiedene Modelle weichen in ihren Vorhersagen naturgemäss voneinander ab. Das gibt zwar interessante Kontroversen unter den Forschern, die sich über den Trend einig sind. Aber in der Politik und im breiten Publikum sind diese Unsicherheiten Anlass zu heissen und oft turbulenten und unfruchtbaren Diskussionen und sogar zur Verleugnung des menschlichen Beitrags am Klimawandel.

K3.2 Forschung in der Quantenphysik: das Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon (Ergänzung)

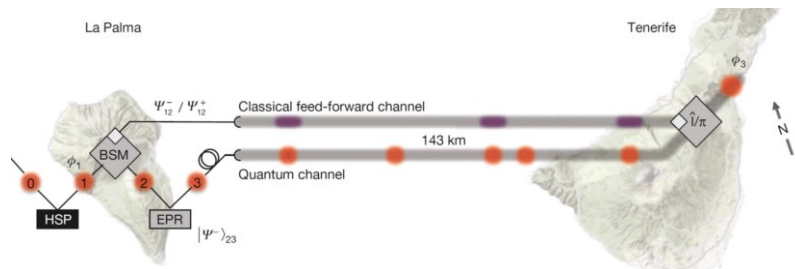
AKTUELLES



The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics 2022 to **Alain Aspect**, Université Paris Saclay, **John F. Clauser**, Walnut Creek (CA) and **Anton Zeilinger**, University of Vienna, for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science.

Manchmal wird die Physik mit der Schrödingergleichung und ihren vielen Anwendungen in der Elektronik, der Chemie usw. als «Quantenphysik 1.0» bezeichnet. Zunehmend spielt die quantenphysikalische Informationsverarbeitung eine Rolle, die mit den Stichworten **Verschränkung (entanglement)** und **Bells Ungleichungen** verknüpft ist und QP 2.0 heisst.

Spektakulär ist die Übertragung von Information über 143 km zwischen La Palma und Teneriffa



mit verschränkten Lichtquanten durch Zeilingers Gruppe (Ma et al., 2012). Doch nicht die technischen Einzelheiten von abhörsicherer Kommunikation, von Quanten-Teleportation oder von Quantencomputern sollen hier erläutert werden, sondern ihre physikalischen Grundlagen.

Die Hintergründe des Nobelpreises 2022 reichen fast ein Jahrhundert zurück. Idee und Begriff «Verschränkung» wurden von Erwin Schrödinger 1935 geprägt und im gleichen Artikel publiziert wie seine berühmte Katze (→ 2.8.1). Dort schreibt er im Abschnitt «Theorie des Messens, zweiter Teil»:

*Wenn zwei getrennte Körper, die einzeln maximal bekannt sind, in eine Situation kommen, in der sie aufeinander einwirken, und sich wieder trennen, dann kommt regelmässig das zustande, was ich eben **Verschränkung unseres Wissens** um die beiden Körper nannte.*

Schon damals war es klar, dass beispielsweise die beiden Elektronen im Helium-Atom und im H₂-Molekül verschränkt sind. Die Zustandsfunktionen von verschränkten Quantensystemen zeichnen sich dadurch aus, dass **ψ nicht als reines Produkt** von Ein-Teilchen-Zustandsfunktionen geschrieben werden kann. Weil sich solche Systeme aber lange Zeit nur auf atomare Dimensionen begrenzten, schien Verschränkung zwar irritierend, aber nicht spektakulär.

VORGESCHICHTE

Einstein hatte sich an den Solvay-Konferenzen 1927 und 1930 noch mit Bohr über die Gültigkeit der Quantenmechanik gestritten und erfolglos versucht, die Unbestimmtheitsrelation (UBR) zu widerlegen. Bohr, Heisenberg und Pauli formulierten darauf eine Sicht, die als Kopenhagener Interpretation der Quantenphysik in die Geschichte eingegangen ist. Die Kopenhagener Interpretation überzeugte den Physik-Mainstream. Einstein und Schrödinger schienen ältere Herren zu sein, nicht mehr in der Lage, den Fortschritt der Physik mitzumachen.



Bohr und Einstein

Nach der Flucht aus Nazi-Deutschland schrieb Einstein aus seinem Exil maliziös an Schrödinger, ebenfalls im Exil, noch in Oxford: **Die Heisenberg-Bohrsche Beruhigungsphilosophie – oder Religion? – ist so fein ausgeheckt, dass sie dem Gläubigen einstweilen ein sanftes Ruhekitzen liefert.**

Einstein war überzeugt, dass die Quantenmechanik noch unvollkommen und verbesserungsfähig sei. Er hoffte, eine im Hintergrund wirkende Variable könnte die Kausalität und die lokale Realität retten. 1935 schreckte er «die Gläubigen» auf mit dem Artikel *Can Quantum-Mechanical Description of*

Physical Reality Be Considered Complete? Einstein hatte ihn in Princeton zusammen mit Boris Podolsky und Nathan Rosen verfasst, daher die Abkürzung EPR. Wie er später schrieb, ging es ihm weniger um den Zufall als um den Realitätsbegriff (Besitz das Elektron auch dann die Eigenschaft «Ort», wenn niemand hinschaut und misst? Beim klassischen Objekt «Mond» ist die Antwort klar.) als um die Frage: **«Lokalität [= Trennbarkeit] oder spukhafte Fernwirkung?»**. Gibt es eine Wirkung von «hier und jetzt» auf «dort und jetzt» jenseits der Grenzen der Relativitätstheorie?

EPR gingen von einem Gedankenexperiment aus, bei dem ein angeregtes Quantensystem (radioaktives Atom usw.) zerfällt und zwei Quantenobjekte (Lichtquanten, Elektronen usw.) aussendet, die auseinanderfliegen: Man könnte schreiben: $\psi_{\text{AnfangAB}} \rightarrow (\psi_{\text{EndeA}} \& \psi_{\text{EndeB}})$.

Misst man bei A beispielsweise die z-Komponente des Drehimpulses, so ist wegen der Drehimpulserhaltung bekannt, dass in B das ψ_{EndeB} den entgegengesetzten Wert zeigt. Nun sagt die UBR, dass man bei A nicht gleichzeitig auch noch die x-Komponente des Drehimpulses messen könne. Bei ψ_{EndeB} hingegen kann man sie messen, wenn man dort den Gesamtdrehimpuls nicht gemessen hat. Doch man kann auf die x-Komponente von A zurückschliessen! Macht man diese Abfolge von Messungen bei diesem *kombinierten System* (angedeutet durch das &) erst dann, wenn die Objekte so weit voneinander entfernt sind, dass sie *keinerlei Wechselwirkung* mehr aufeinander ausüben, kommt man zur Folgerung:



EPR-Experiment: Idee

EPR behaupten 1935: Entweder gibt es **eine verborgene Variable** [d.h. die Quantenmechanik ist unvollständig], **oder** es gibt **eine spukhafte Fernwirkung**.

Einstein, Podolsky und Rosen glaubten natürlich nicht an Spuk und schlossen ihren Artikel: *Während wir somit gezeigt haben, dass die [Zustands-] Funktion keine vollständige Beschreibung der physikalischen Realität liefert, lassen wir die Frage offen, ob eine solche Beschreibung existiert oder nicht. Wir glauben jedoch, dass eine solche Theorie [mit verborgenen Variablen] möglich ist.* Der «Outsider» Einstein trat damit eine breite Lawine los, die bis heute in Bewegung ist.

Wolfgang Pauli war sehr aufgebracht, als er den EPR-Artikel las: *Einstein hat sich wieder einmal zur Quantenphysik öffentlich geäußert. (...) Bekanntlich ist das jedes Mal eine Katastrophe, wenn es geschieht. «Weil, so schliesst er messerscharf – nicht sein kann, was nicht sein darf.»*

Niels Bohr reagierte sofort mit einem Artikel, der den gleichen Titel trug, und kündigte an: *Es wird gezeigt, dass ein [von EPR formuliertes] gewisses «Kriterium der physikalischen Realität» eine wesentliche Mehrdeutigkeit aufweist, wenn man es auf Quantenphänomene anwendet. In diesem Zusammenhang wird ein mit «Komplementarität» bezeichneter Gesichtspunkt erklärt, unter dem die quantenmechanische Beschreibung physikalischer Systeme innerhalb des Geltungsbereichs allen rationalen Erfordernissen der Vollständigkeit genügt.*

Die meisten Physiker schlossen sich Bohr an. Einstein, Schrödinger und de Broglie verstummten. Die «orthodoxe» Kopenhagener Interpretation siegte. Die unkritische Haltung hat David Mermin später als «Shut up and calculate!» karikiert. Wer an «Kopenhagen» zweifelte, galt als nicht ganz seriös.

Während des 2. Weltkriegs interessierte man sich nicht für naturphilosophische Finessen, und auch in der anschließenden Aufbauphase spielten der Transistor (1947 erste Vorführung im BELL-Industrie-labor) und der Laser (1954 erster Mikrowellen-MASER) die führenden Rollen.

Alles änderte sich 1964 mit dem Artikel: *On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox.* Im CERN hatte der irische Theoretiker John Bell (→ PANORAMA 1950) die Grundlagen der Quantenmechanik analysiert und gefunden, dass der Satz in John von Neumanns Grundlagen der Quantenphysik, welcher verborgene Variablen als unmöglich erklärte, nicht stimmte. Die Voraussetzungen waren nicht erfüllt. Bell gelang eine spektakuläre Einsicht: Es gibt keine Theorie mit verborgenen Variablen, die *alle* Ergebnisse der Quantenphysik reproduziert. Ausgehend von der Bohm-Version des EPR-Gedankenexperiments konnte er eine **Ungleichung** ableiten, auf Grund derer **das Experiment entscheidet**, ob es verborgene Variablen gibt. Die Experimente zeigen: **Es gibt Verschränkung, es gibt «spukhafte Fernwirkung», aber es gibt keine verborgenen Variablen.**



John Bell

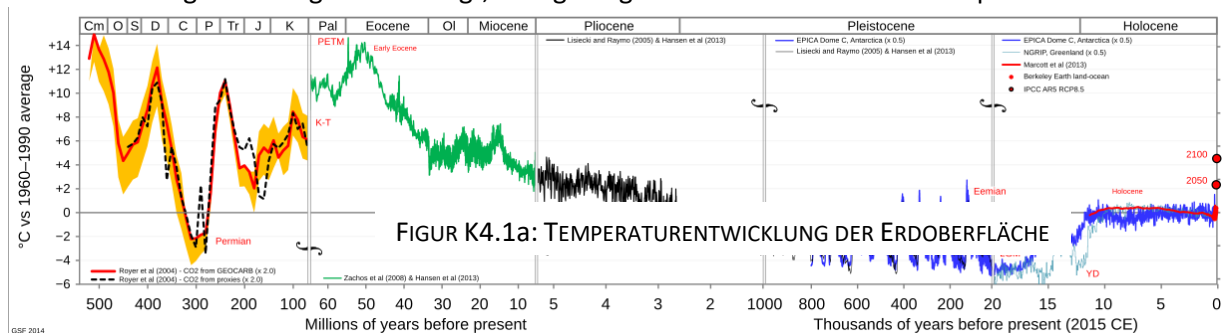
K4 Klimaphysik und Klimapolitik

K4.1 Zur Komplexität der Klimaphysik

Wir auf der Erde haben Glück. Lebten wir auf der Venus, näher bei der Sonne, hätten wir zu heiss, wären wir auf dem Mars, wäre es zu kalt. Das vermuten wir jedenfalls aufgrund der Überlegungen von Kapitel 1. Doch die Wirklichkeit ist viel komplizierter: Wir erwarten, dass es auf der etwa gleich grossen Venus 464 °C heiss ist, doch weshalb ist der Atmosphärendruck dort 92mal höher als auf der Erde? Und wieso beträgt der CO₂-Gehalt volle 96 %? Auf dem nur halb so grossen Mars schwankt die Temperatur zwischen –153 °C und +20 °C bei einem Luftdruck von bloss 6 Millibar!

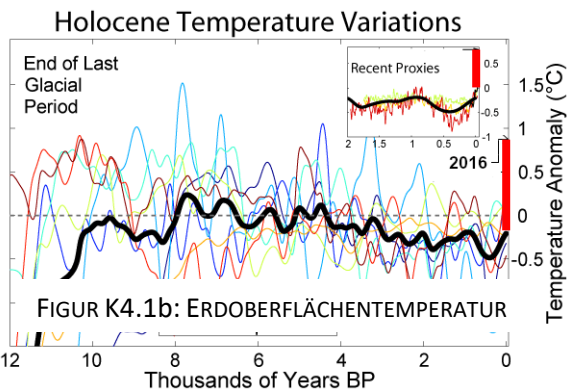
PALÄOKLIMA: DAS KLIMA FRÜHER

Die zusammengesetzte Figur K4.1a zeigt, dass geologische Prozesse die Erd-Atmosphäre und damit das



Klima mitbestimmt haben, wie die Oberflächentemperatur anzeigt. Auf der Venus und dem Mars geschahen andere Prozesse, was zu ganz anderen Zuständen in der Gegenwart führt.

Die Temperaturänderungen im Pleistozän betrafen die Saurierforscher – uns interessiert nur, was vor kurzem, also seit der letzten Eiszeit geschah. Das zeigt die ausgezogene Kurve in Figur K4.1b. Rot hervorgehoben sind im Hauptdiagramm und im Einsatz die Werte von 2016. Sie illustrieren, dass die Menschheit seit 300 Jahren im Begriff ist, ein grosses, einmaliges Klima-Experiment durchzuführen.



Wie wird überhaupt die Temperatur vor 10'000 Jahren gemessen? Die vielen farbigen Linien sind die Werte, die verschiedene «Proxies» liefern: Wachstum von Baumstämmen oder Muschelschalen, Isotopenverhältnisse C-14/C-12 oder O-18/O-16 von Luft im Gletschereis usw. Mehr dazu unter:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Paleoclimatology>

EXTERNE UND INTERNE EINFLÜSSE AUF DAS KLIMA

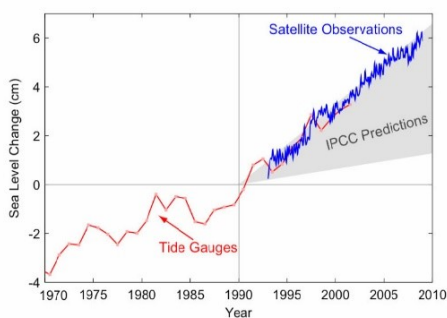
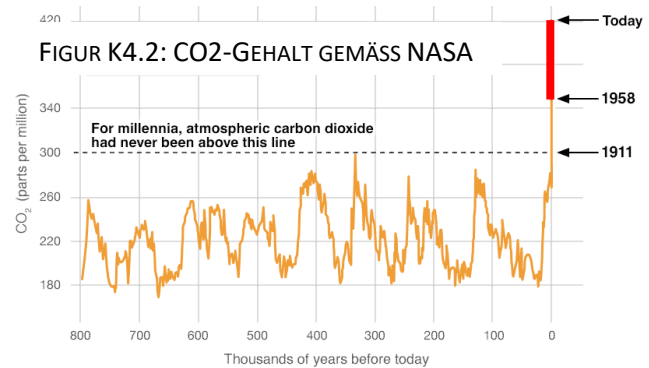
Sonnenaktivität und Abstand Sonne-Erde sind nicht konstant. Die Sonne entwickelt sich in astronomischen Zeiträumen zu einem helleren, roten Riesenstern, und sie ändert kurzfristig ihre Leuchtkraft ebenso wie ihre Sonnenfleckenaktivität. Die Entfernung Sonne-Erde und die Neigung der Erdachse variieren nicht nur entsprechend den Keplergesetzen, sondern unterliegen den Einflüssen anderer Planeten. Typisch sind Zyklen in der Grössenordnung von 10'000 Jahren.

AUFBAU DER ATMOSPHÄRE UND WECHSELWIRKUNG MIT DEM MEER

In der Gegenwart ist die Erdatmosphäre folgendermassen geschichtet: Zuerst ist die etwa 12 km hohe Troposphäre, die Wasser als Dampf und als Wolken enthält und deren Temperatur ziemlich gleichmässig bis auf –60 °C an der Tropopause abnimmt. Von dort beginnt die trockene Stratosphäre, die bis in 50 km Höhe reicht und in der die Temperatur bis auf rund 0 °C ansteigt, weil die absorbierte UV-Strahlung so stark heizt. Unten tauschen Atmosphäre und Meere je nach Strömungsverhältnissen untereinander Energie, Wasser, Salzpartikel und auch CO₂ aus.

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 «Klimaleugnern» 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.

K4.3 Zur Komplexität der Politik

Unter dem Eindruck der IPCC-Berichte wurde in Paris 2015 für die Zeit nach 2020 ein neues Übereinkommen verabschiedet, welches erstmals alle Staaten zur Reduktion der Treibhausgasemissionen verpflichtet. Die Schweiz hat das Übereinkommen 2017 ratifiziert und ist damit ein Reduktionsziel von minus 50 Prozent bis 2030 gegenüber 1990 eingegangen. Allerdings hat das Stimmvolk 2021 die Gesetzesrevision abgelehnt, die die anvisierte Reduktion hätte konkretisieren sollen, so dass aktuell und weiterhin eine schwächere Version der CO₂-Gesetzgebung gilt.

«Klimapolitik ist Energiepolitik», sagt Bundesrat Rösli im Zusammenhang mit der Autobahn-Ausbau-Abstimmung im Herbst 2024 und verbindet weniger Staustunden nicht nur mit geringeren Lohnkosten, sondern auch mit geringerer CO₂-Freisetzung. Die grüne Nationalrätin Ryser ist hingegen überzeugt, der geplante Ausbau widerspreche der Pariser Übereinkunft.

Die entgegengesetzten Positionen entspringen verschiedenen Argumentationsebenen. Rösli 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 Energie.
- technisch Z. B.: Rückholung von CO₂ aus der Atmosphäre ist im grossen Stil möglich.
- wirtschaftlich Z. B.: Rückholung von CO₂ aus der Atmosphäre ist teuer.
- 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.

Wie schnell und wie gut es der Schweiz und anderen reichen Ländern gelingt, ihren CO₂-Ausstoss zu reduzieren hängt vom Ergebnis des politischen Kräftespiels ab. Unabhängig davon kann jedes Individuum einen Beitrag leisten. Das Programm des deutschen Bundesamts für Umwelt berücksichtigt auch die «graue Energie», also Nahrung, Kleidung usw. https://uba.co2-rechner.de/de_DE/
Den grössten Einfluss auf den individuellen CO₂-Ausstoss hat der Entscheid: Fliegen JA oder NEIN?

Über den Daumen gepeilt verursacht ein zweistündiger Flug nach Sizilien und zurück 1 Tonne CO₂.