

# Zéphyros

Das Klima-Lernprogramm

## Teil A

Volker Jentsch

<https://www.volkerjentsch.de>

Januar 2023



## 1 Einführung

Bitte nicht schon wieder das Klima, könnten Sie sagen. Aber haben Sie auch verstanden, warum die Erde mit zunehmendem Ausstoß von Kohlendioxyd wärmer wird? Welche Mechanismen den Effekt verstärken, welche ihn schwächen können?

Hier sind Sie Klimamacher. Sie selbst verändern das Klima, wenn Sie mit **Zéphyros** (Griechische Mythologie: Ζεφύρος, der Westwind) experimentieren.<sup>1</sup> *Zéphyros* ist eine vereinfachte Version eines Modells, das ich 1991 veröffentlicht

---

<sup>1</sup>Bild von Wikipedia

habe.<sup>2</sup>

Es basiert auf dem fundamentalen Prinzip der Energieerhaltung. Was lässt sich damit anfangen? Sie können, zum Beispiel, eine Prise Kohlendioxyd der Atmosphäre beimischen. Sie tun dann genau das, was tagein tagaus auf der Erde passiert, wenn Kohlenstoffhaltige Substanzen unter Zugabe von Sauerstoff verbrennen. Mit dem Unterschied, dass Sie, weil virtuell, mit Ihrem Eintrag keinen Schaden anrichten. *Zéphyros* sagt Ihnen, wie Ihre Prise  $CO_2$  die Temperatur des Globus ändert. Sie bestimmen die Dosierung von  $CO_2$ , sei es die Menge, die Sie eingeben oder die Art, sei es alles auf einmal oder nach und nach. Sie können es auch wieder entnehmen, symbolisch im Boden versenken (vorausgesetzt, die Anzahl dafür erforderlicher Bohrlöcher reicht aus). Sie simulieren einen Vulkanausbruch durch Erhöhung des Aerosol-(Schwefel) Anteils in der Atmosphäre. Sie entwalden die tropischen Urwälder und lassen sie brennen. Sie schalten Rückkopplungsmechanismen an und aus. Das Ergebnis dieser Manipulationen ist eine Änderung der globalen Temperatur. Diese wird von meinem Modell berechnet und Ihnen mitgeteilt.<sup>3</sup> Wie *Zéphyros* funktioniert, erkläre ich jetzt.

## 2 Zéphyros, Physik 1

Das Klimasystem besteht aus den vier Sphären. Die für unser Modell wichtigste ist die Troposphäre, deren obere Grenze, die Tropopause, 10 km oberhalb der Meereshöhe liegt; sie enthält den gesamten Wasserdampf der Atmosphäre, Wolken und Niederschlag, sowie die klimawirksamen Spurengase, darunter vor allem das Kohlendioxyd ; charakteristisch ist die Abnahme von Druck, insbesondere die Abnahme der Temperatur mit  $6.5^\circ \text{C}$  pro Kilometer. Die anderen, für das Klimasystem ähnlich wichtigen, sind die Hydrosphäre, Biosphäre und Kryosphäre; dazu kommt die Landoberfläche, ergänzt um diverse Stoffkreisläufe, wie zum Beispiel der viel diskutierte Kohlenstoff-Zyklus. Alle Komponenten interagieren miteinander. Integriert man diese über den Globus und addiert sie auf, reduziert sich das Klimasystem auf das zwar fundamentale, im Vergleich zur Komplexität des detaillierten Systems eher einfältige Prinzip der Erhaltung der Energie, hier in Form elektromagnetischer Strahlung: im Gleichgewicht emittiert der Planet genau so viel Energie in Form von langwelliger Strahlung, wie er von der Sonne in Form kurzwelliger Strahlung absorbiert (zur Illustration

---

<sup>2</sup>Jentsch, V., An energy balance climate model with hydrological cycle, J.Geophys. Res., 17169-17179, 1991

<sup>3</sup>Eine Anmerkung vorweg, um eventuelle Entrüstung von gestandenen Klimamodellierern in Grenzen zu halten; von denen bekanntlich einige, besonders telegene, jedes extreme Wetterereignis – unbewiesen – lautstark dem Klimawandel zuschlagen. Mein Modell ist die einfachste Version eines Klimamodells. Es hat den Vorteil, auch auf weniger leistungsfähigen Rechnern schnell Ergebnisse zu liefern und damit die wichtigsten Ursachen der Temperatur-Änderung zu simulieren, mithin die Auswirkungen von menschlichem Tun zu verstehen. Allerdings gilt: Sie sollten die vom Modell errechneten Änderungen *with a pinch of salt* betrachten. Sie zeigen die Richtung an, nicht aber die exakten Quantitäten. Wobei ich mir an dieser Stelle den Hinweis nicht verkneifen kann, dass selbst die subtilsten Modelle in ihren Angaben auf Verdoppelung der atmosphärischen Kohlenstoff-Konzentration eine Änderung der Bodentemperatur errechnen, die bis zu 2 Grad oder mehr voneinander abweichen können.

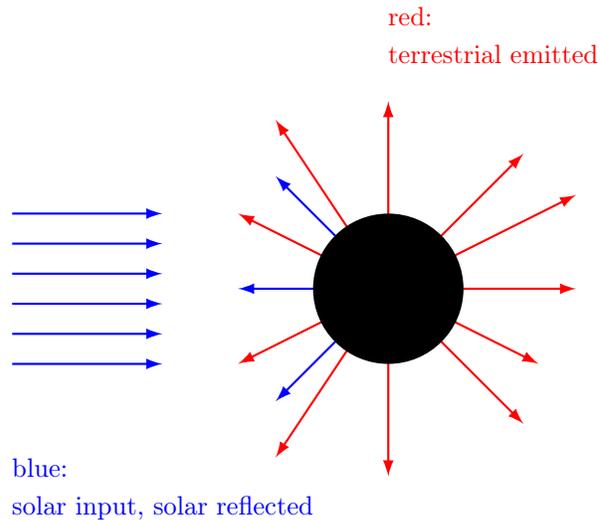
des Szenarios: Fig. 1). Damit ist sichergestellt, dass sich die Erde langfristig weder abkühlt noch aufheizt. Die planetare, vom Satelliten aus meßbare Temperatur beträgt  $254\text{ K}$  oder  $-18^\circ\text{ C}$ . Die globale Luft-Temperatur in Bodennähe liegt aktuell bei etwa  $15^\circ\text{ C}$ . Die Differenz von  $33\text{ K}$  ist Folge des sogenannten Treibhauseffektes (siehe unten) und kann aus der Strahlungs-Bilanz errechnet werden.

Was ist das aber für ein seltdames Gebilde, die globale Lufttemperatur in Bodennähe, die in der Debatte um die Klimaänderung eine so beherrschende Rolle einnimmt? Gemessen werden Temperaturen zu festen Zeitpunkten und ausgewählten Orten der Erde, sind also abhängig vom „wann“ und „wo“. Unser Thermometer zeigt uns im Augenblick der Anzeige die aktuelle Temperatur auf dem Land oder über Wasser, in der Wüste oder im Regenwald, über Berg und Tal. Die Messergebnisse werden in eine Tabelle eingetragen, und daraus wird nach den Regeln der Statistik ein Mittelwert gebildet. Dieser ist wie alle Mittelwerte, sei es Körpergröße, Gewicht etc., eher eine fiktive Größe. Doch er gibt einen Eindruck dessen, was die Erde als ganzes charakterisiert. Die globale Temperatur in Bodennähe ist demnach die über alle Längen- und Breitengrade, sowie Jahreszeiten gemittelte und auf Meereshöhe reduzierte Temperatur der Luft. Der Zahlenwert differiert, je nach Autorenschaft, um bis zu einem halben Grad. Folglich vergleichen die Klimaforscher in ihren Szenarien nicht die Temperatur mit der aktuell gemessenen, sondern die *Änderung* der Temperatur, bezogen auf einen definierten Referenzwert. Daran wird das 1.5 Grad- oder 2 Grad-Ziel gebunden. Höher darf nach Ansicht der Fachleute die Erwärmung durch zusätzliche Treibhausgase nicht ausfallen, ohne dass gravierende Konsequenzen auf der Erde zu erwarten sind. Und da die aktuelle Klima-Erwärmung menschengemacht ist, liegt es an uns, den Erdbewohnern, Schlimmeres zu verhindern.

Allerdings interessiert die Menschen in erster Linie nicht die globale, sondern viel eher die regionale Erwärmung, die sich durch Änderung der Umwelt, insbesondere der Vermehrung der atmosphärischen Treibhausgase einstellen wird. In der Schweiz soll sie nach neusten Messungen bei mehr als  $2^\circ\text{ Celsius}$  liegen. Um diese lokalen Unterschiede zuverlässig anzugeben, rechnen seit Jahren gigantische Supercomputer Modelle, vom Kondensationskeim in der Wolke bis zur Abgas produzierenden Weltwirtschaft, Tage- und Wochen-lang.

Zurück zu *Zéphyros*. Falls Sie noch etwas mehr wissen wollen über die Physik das Modell, sind Sie eingeladen, das Folgende zu lesen. Wollen Sie aber sogleich zum Modell und es für Ihre Experimente ausprobieren, müssen Sie die Webseite aufrufen [https://www.volkerjentsch.de/Klima\\_II.html](https://www.volkerjentsch.de/Klima_II.html).

### 3 Zéphyros, Physik 2



**Fig. 1**

Die 6000 Grad (Kelvin) heiße Sonne emittiert Strahlung in Form elektromagnetischer Wellen mit Wellenlängen zwischen 0.2 und 10 Mikrometern. Das Maximum liegt im sichtbaren Bereich bei etwa 0.5 Mikrometern ( $1\mu m = 10^{-5}m$ ); die Leistung beträgt, über alle Wellenlängen integriert,  $1360 W/m^2$ .<sup>4</sup> Man bezeichnet sie als kurzwellig, relativ zur langwelligen Strahlung der Erdoberfläche und Atmosphäre. Die Strahlung von der Sonne regiert das Klima und Leben auf der Erde: sie liefert die Energie für den vertikalen Wärmeaustausch zwischen Himmel und Erde, den hydrologischen Zyklus aus Verdunstung und Niederschlag, sowie – besonders wichtig – den Wärmetransport vom Äquator zu den Polen. Sie ermöglicht mittels Photosynthese das Wachstum der Pflanzen und sichert so die Existenz von Mensch und Tier auf der Erde. Der durch die Sonne erwärmte Globus emittiert seinerseits elektromagnetische Strahlung (siehe Fig.1). Das Maximum der Abstrahlung liegt im Infraroten bei etwa 10 Mikrometern, was einer Temperatur von 300 Grad Kelvin entspricht. Sie ist somit deutlich gegen die Einstrahlung der Sonne abgesetzt; deshalb wird die terrestrische Strahlung als langwellig, die solare als kurzwellig bezeichnet. Der

<sup>4</sup>Die Physik der elektromagnetischen Strahlung wird regiert von der Quantenmechanik und drei fundamentalen Gesetzen: der Planck-Funktion (Intensität der emittierten Strahlung als Funktion von Wellenlänge  $\lambda$  und Temperatur  $T$ ) und daraus abgeleitet das Wien'sche Verschiebungsgesetz ( $\lambda_{max} \sim 1/T$ ) sowie das Stefan-Boltzmann Gesetz (Fluss-Dichte des Strahlungsflusses  $F \sim T^4$ , die für unser Modell wichtigste Beziehung)

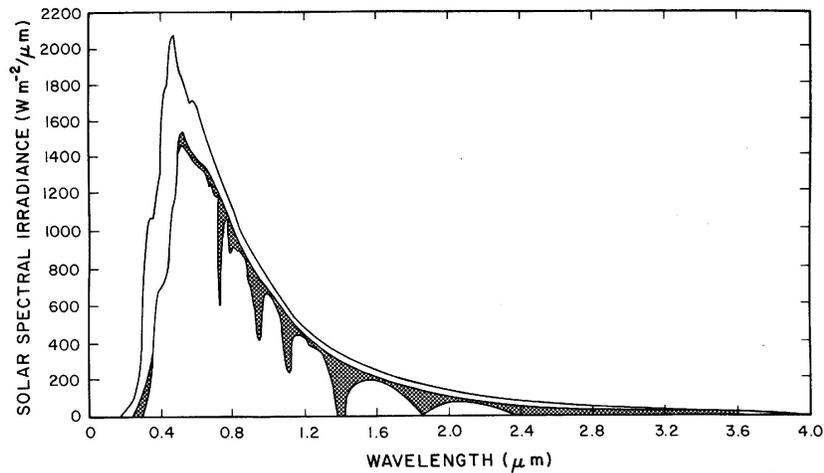


Abbildung 1: Die obere Kurve ist das am oberen Rand der Atmosphäre gemessene Spektrum des kurzwelligen Strahlungsflusses; die untere das am Boden gemessene. Die schraffierten Bereiche markieren die Absorption durch  $O_3$  und  $H_2O$ . Aus: K.-N. Liou, An Introduction to Atmospheric Radiation, Academic Press, 1980.

Unterschied der Temperaturen zwischen Sonne und Erde (6000 gegen 300 Grad Kelvin) impliziert (entsprechend den in Fußnote (3) erinnerten Gesetzen), dass die Erde einen geringeren Betrag an Strahlung emittiert als die Sonne. Aus diesem Ungleichgewicht müßte folgen, dass sich die Erde kontinuierlich aufheizt. Das tut sie offensichtlich nicht; im Gegenteil – es besteht ein Gleichgewicht zwischen Input und Output. Betrachten wir Abb.1. Ein Teil der kurzwelligen Energie wird beim Durchgang durch die Atmosphäre von Ozon ( $O_3$ ) und Wasserdampf absorbiert, kommt also am Boden nicht an; ein anderer, weitaus bedeutender wird von den Wolken reflektiert und gestreut (womit schon an dieser Stelle zu vermuten ist, dass fehlende Bedeckung durch Wolken den Boden aufheizen würde). Der durchgehende Anteil (etwa 45%) wird vom Boden teils absorbiert, teils reflektiert. Der Grad der Reflexion ist abhängig von der Bodenbeschaffenheit; über Eis und Schnee ist er hoch, über Wasser gering. Insgesamt verbleiben ziemlich genau 70% der einfallenden Solarstrahlung in Atmosphäre und Boden. Der Verlust der eingestrahnten Sonnenenergie von 30% wird als planetare Albedo bezeichnet.

In Abb. 2 ist das Spektrum der infraroten Strahlung, vom Satelliten aus gesehen, als gezackte, irreguläre Linie gezeichnet. Gäbe es keine Troposphäre, mithin auch keine Wolken, würde der Boden (mit Temperatur  $T \approx 300 K$ ) ungeschwächt abstrahlen. Das geschieht aber in Anwesenheit der Troposphäre nur im sogenannten atmosphärischen Fenster, das sich im Wellenlängenbereich von  $8 - 13 \mu m$  (oder Wellenzahlen von  $800 - 1300 cm^{-1}$ ) öffnet. Rechts und links davon bilden die sogenannten Treibhausgase, wie zum Beispiel  $H_2O$  und  $CO_2$  eine

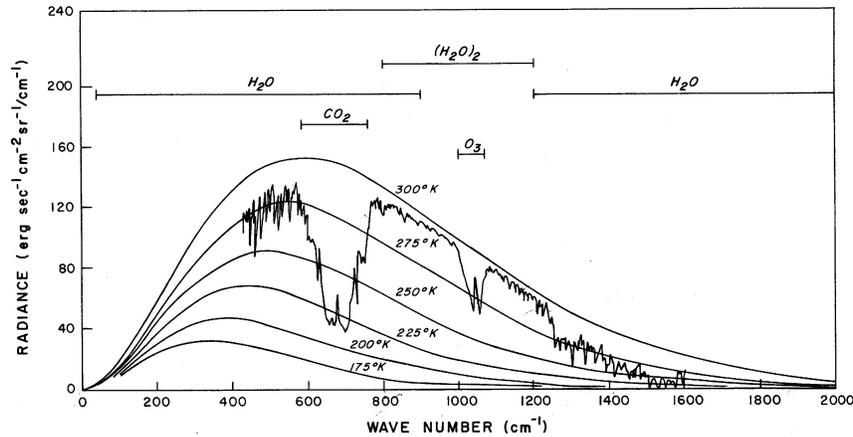


Abbildung 2: Infraroter Strahlungsfluss mit Absorptionsbändern, als Funktion der Wellenzahl. Die fluktuierende Kurve ist die vom Satelliten aufgenommene Emission der langwelligen Strahlung von Erde und Atmosphäre. Zusätzlich eingezeichnet sind die Spektren für verschiedene Temperaturen. Der Einbruch zwischen  $600\mu\text{m}$  und  $800\mu\text{m}$  verweist auf maximale Absorption der Spurengase, entsprechend 220 Grad Kelvin, aus Schichten in der Nähe der Tropopause. Aus: K.-N. Liou, An Introduction to Atmospheric Radiation, Academic Press, 1980.

weitgehend undurchlässige Schicht. Eine weitere Schicht sind die Wolken, die entsprechend ihrer Höhe, mit niedrigerer Temperatur als der Boden emittiert. Allerdings ist das spektrale Fenster nicht völlig offen, sondern wird, wie aus Abb. 2 ersichtlich, wenn auch in geringerem Maß als außerhalb desselben, von Wolken und den Spurengasen verschlossen. Abb.2 entschlüsselt das Geheimnis des sogenannten Treibhauseffekts.<sup>5</sup> Diese Schichten fangen die vom Boden emittierte Wärmestrahlung auf und emittieren, mit  $T < 300\text{ K}$ , ihrerseits Wärme nach oben, aber eben auch nach unten, mit der Folge, dass der Boden Energie zurückgewinnt.

Mein Modell basiert auf einer einzigen Gleichung: die Bilanz zwischen Input (solare Einstrahlung) und Output (terrestrische Abstrahlung) des Planeten. Daraus lässt sich die Bodentemperatur  $T$  der Erde, in Abhängigkeit zahlreicher Parameter errechnen. Welche Vorstellung ist damit verbunden? Man reduziert die Erde auf einen Punkt, in dem sich nichts bewegt, also sämtliche Dynamik von Atmosphäre und Ozean eliminiert ist; somit nur die Strahlungsflüsse übrigbleiben, die durch die Eigenschaften von Atmosphäre und Boden, also vorwie-

<sup>5</sup>Exkurs Treibhaus. In der (wolken-) freien Luft (A) wird die vom warmen Boden emittierte Strahlung von den Treibhausgasen absorbiert, wodurch deren Moleküle in Schwingungen geraten und Energie nach oben und unten emittieren; im Treibhaus (B) kann die vom Boden aufsteigende, gewärmte Luft wegen des Glasdachs nicht entweichen. In (A) handelt es sich vorwiegend um (masselosen) Transport von *Photonen*, in (B) um Transport von *Luftmolekülen*.

gend durch Reflektion und Absorption bestimmt werden. Die Funktionsweise des Modells sei am Beispiel der Zunahme von  $CO_2$  demonstriert. Wir erhöhen den Anteil von  $CO_2$  in der Atmosphäre und gehen davon aus, dass er dort verbleibt. Wie reagiert die Temperatur? Es gibt verstärkende und abschwächende Faktoren, oder positive und negative Feedbacks. Einige der wichtigsten sind:

- Verstärkend
  - (a) im langwelligen Bereich: Mehr  $CO_2$  macht die Luft undurchlässiger für die abgehende Wärmestrahlung vom Boden (Verstärkung des Treibhauseffekts): die Folge ist eine Temperaturzunahme, mithin auch die Zunahme von Wasserdampf, was den weiteren Anstieg der Temperatur auslöst. Dadurch verstärkt sich die Eis-Schmelze und heizt die Erwärmung solange weiter an, bis ein neues Gleichgewicht zwischen einfallender und abgehender Strahlung erreicht ist;
  - (b) im kurzwelligen Bereich: mehr Wasserdampf absorbiert mehr kurzwellige Strahlung, höhere Temperatur verursacht einen Rückgang der Eisbedeckung, mithin Abnahme der Reflexion, in Folge weitere Zunahme der Temperatur.
- Abschwächend
  - Erhöhte Temperatur hat gemäß dem  $T^4$  - Gesetz von Stefan-Boltzmann eine erhöhte Emission zur Folge. Dieses Feedback ist besonders wirksam; es garantiert, dass bei einer Temperatur-Zunahme die Abstrahlung steigt, mithin die einfallende Sonnenenergie balanciert werden kann.

Was aus den sich gegenseitig beeinflussenden Prozesse herauskommt, lässt sich im Sinne von wärmer/kälter abschätzen; wie groß die Änderung der Temperatur tatsächlich ausfällt, ist von deren Stärke abhängig und kann definitiv nur errechnet werden, was mit Hilfe von *Zéphyros* gelingt. Wie das funktioniert, wird in *Zéphyros Teil B* erklärt.