
Der Treibhauseffekt

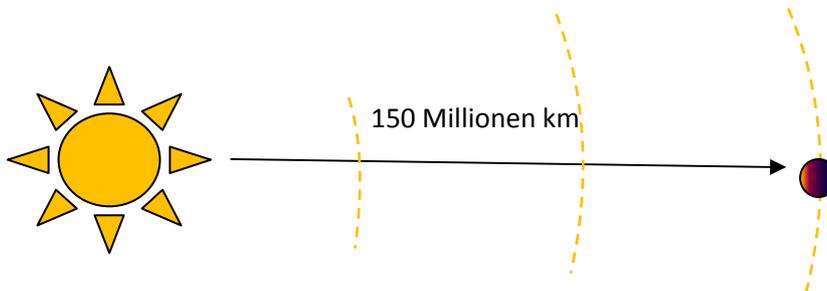
Themenheft zu den Grundlagen des Klimawandels

© Marc Eyer, 2009

Abteilung Physik, Gymnasium Neufeld, Bern

1 Sonneneinstrahlung auf der Erde

☞ Die Sonne strahlt dauernd eine riesige Menge an Energie in den Weltraum ab und zwar mit einer Leistung von etwa $3.9 \cdot 10^{26}$ Watt. Dieser dauernde Energiestrom verteilt sich radial im Raum. Die Erde stellt sich diesem Energiestrom in einem Abstand von etwa 150 Millionen Kilometern in den Weg und fängt einen kleinen Teil davon mit ihrer Querschnittsfläche auf.



1. Berechne, welche Leistung im Abstand dieser 150 Millionen Kilometern noch auf einen Quadratmeter fällt.

☞ Die Grösse, die du in Aufgabe 1 berechnet hast, heisst *Solar konstante* S_0 . Der Name ist etwas verwirrend, da es sich bei dieser Zahl (ca. 1360 Watt/m^2) in keiner Weise um eine Konstante handelt. Vielmehr verändert sich die Intensität der Sonneneinstrahlung als Folge verschiedener Ursachen. Grob können diese in zwei Kategorien eingeteilt werden:

- I. Ursachen auf Grund der Veränderung der Erdbahnparameter (→ Arbeitsheft *Warmzeit - Eiszeit; Die Rolle der Sonne*)
- II. Ursachen aufgrund der Variabilität der Sonnenaktivität

Die Einflüsse beider Kategorien variieren zyklisch, das heisst, unterliegen periodischen Schwankungen mit Periodizitäten zwischen Dekaden bis Jahrtausenden.

☞ Die Erde fängt mit ihrem Querschnitt einen kleinen Teil der von der Sonne abgestrahlten Energie auf.



2. Rechne aus, welche Sonnen-Leistung auf die Querschnittsfläche der Erde trifft.

2 Die Erdoberfläche

☞ Die Sonnenenergie, die auf die Erde gelangt, wird nur zum Teil von ihr aufgenommen, *absorbiert*. Ein beträchtlicher Teil der Sonnenenergie wird von den Wolken und der Erdoberfläche zurückgespiegelt. Die „Reflexivität“ von Oberflächen heisst *Albedo* α . Die Stärke der Albedo kann je nach Beschaffenheit einer Oberfläche beträchtlich variieren.

Albedo des Erdbodens

Satellitendaten vom 7.-22. April 2002

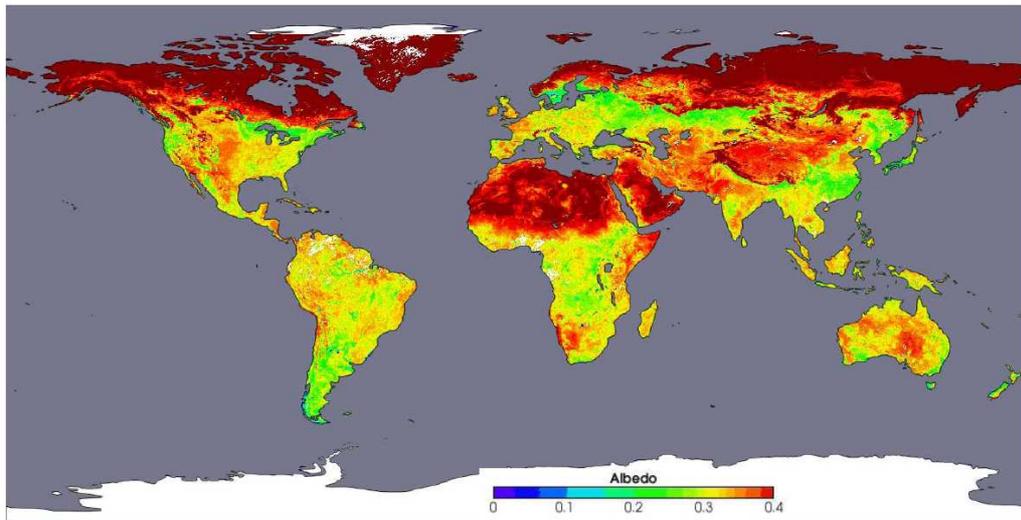


Abbildung 1: Die Albedo der Erdoberfläche im April 2002

☞ Die Abbildung 1 zeigt die Albedo der Erdoberfläche im April 2002. Die roten und braunen Farben geben eine hohe Albedo, die grünen bis blauen eine niedrige Albedo an. Weisse Flächen bedeuten, dass für diese Regionen keine Daten vorliegen. Offenbar nimmt die Erde in verschiedenen Regionen unterschiedlich viel Energie auf. Dort wo die Albedo klein ist viel und dort wo die Albedo gross ist wenig Energie.



3. Interpretiere die Karte, warum gibt es in Grönland, warum in der Sahara eine hohe Albedo? Warum ist die Albedo in Nordeuropa und den Tropen eher tief?

Für die gesamte Erde kann ein Albedo-Durchschnittswert errechnet werden. Dieser liegt bei etwa 0.3. Das bedeutet, dass etwa 30% der Sonnenenergie ungenutzt in den Weltraum zurückgespiegelt wird.

3 Das Strahlungsgesetz nach Stefan-Boltzmann

☞ Jeder Körper, der eine von 0 Kelvin verschiedene Temperatur hat, strahlt elektromagnetische Strahlung ab. Je nach Temperatur des Körpers ist diese Strahlung mehr oder weniger energiereich. Welche Strahlungsleistung P von einem Körper mit einer bestimmten Temperatur T abgegeben wird, beschreibt *das Gesetz von Stefan-Boltzmann*.

$$P = \sigma \cdot T^4 \cdot A,$$

(mit $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Watt/m²K⁴, der Stefan-Boltzmann Konstanten)

Die Leistung die von einem Körper abstrahlt, hängt also auch noch von der Oberfläche A des Körpers ab, über welche die Strahlung abgegeben wird.

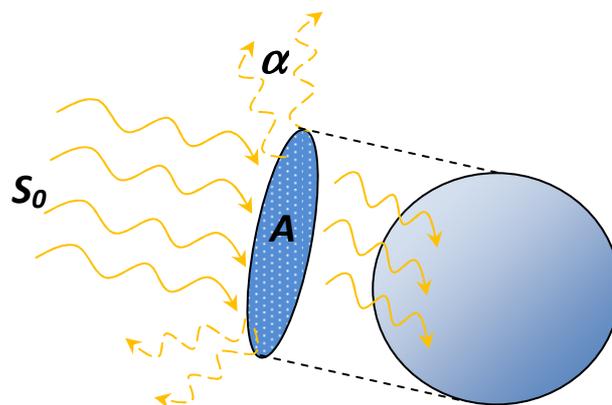


4. In Kapitel 1 findest du die Leistung, mit der die Sonne Strahlung abgibt. Berechne daraus die Oberflächentemperatur der Sonne, wenn ihr Radius 700'000 km beträgt.

4 Strahlungsbilanz der Erde

☞ Die Erde wird also dauernd von der Sonne mit Energie bedient. Die Erde gibt aber auch dauernd wieder Energie ins Weltall ab. Wenn wir davon ausgehen, dass zumindest in den vergangenen 10'000 Jahren die globale Temperatur etwa gleich geblieben ist, so muss gelten, dass die von der Erde aufgenommene Energie gleich der von der Erde abgegebenen Energie sein muss. Ansonsten würde sich die Temperatur auf der Erde stetig erhöhen oder sinken. Es herrscht also ein *Strahlungs-Gleichgewicht* zwischen einfallender und abgegebener Strahlung.

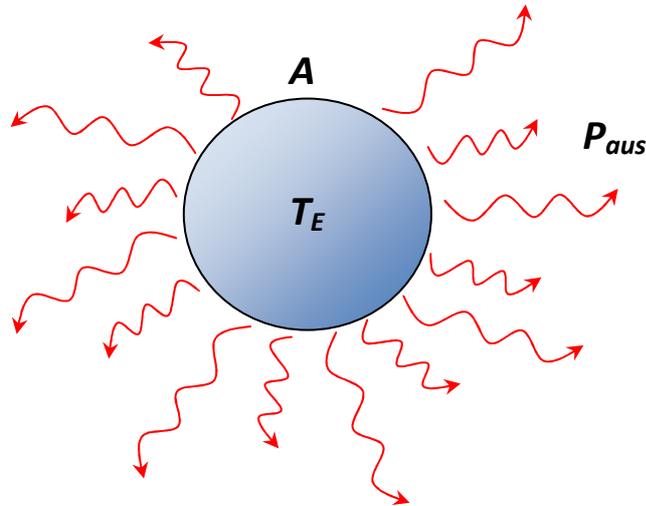
In Aufgabe 2 hast du berechnet, mit welcher Leistung die Erde von der Sonne Energie aufnimmt. Hier dazu nochmals eine schematische Darstellung:



S_0 bezeichnet die Solarkonstante, also die Leistung pro Quadratmeter, die auf die Erde fällt. α ist die Albedo (die Rückstrahlung) und A die Fläche, mit welcher die Erde die Leistung aufnimmt. Diese Fläche A ist eine Kreisscheibe mit dem Radius der Erde. Die von der Erde aufgenommene Leistung beträgt daher

$$P_{ein} = S_0 \cdot A \cdot (1 - \alpha) = S_0 \cdot R_E^2 \pi \cdot (1 - \alpha)$$

Wie oben erwähnt, muss die Erde, damit sie thermisch im Gleichgewicht bleibt, genau dieselbe Leistung auch wieder ins All abstrahlen.



Diese abgestrahlte Leistung P steht nun gemäss dem Strahlungsgesetz von Stefan-Boltzmann in Beziehung mit der Temperatur T_E der Erde. Die Fläche A über welche die Erde Energie abgibt ist jetzt allerdings die ganze Kugeloberfläche der Erde. Damit kann die Abgestrahlte Leistung geschrieben werden als:

$$P_{aus} = \sigma \cdot T_E^4 \cdot A = \sigma \cdot T_E^4 \cdot 4R_E^2\pi$$

Da P_{ein} und P_{aus} gleich sein müssen können wir die beiden Gleichungen gleichsetzen. Dies gibt die einfachst mögliche Energiebilanz der Erde:

$$S_0 \cdot R_E^2\pi \cdot (1 - \alpha) = \sigma \cdot T_E^4 \cdot 4R_E^2\pi$$



5. Errechne aus der eben erarbeiteten Formel die Temperatur der Erde, indem du folgende Werte annimmst (Achte darauf, die richtigen Einheiten zu nehmen!):
 - Solarkonstante: $S_0 = 1370 \text{ Watt/m}^2$
 - Radius Erde: $R_E = 6371 \text{ km}$
 - Albedo der Erde: $\alpha = 0.3$
 - Stefan-Boltzmann-Konst.: $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Watt/m}^2 \text{ K}^4$

6. Wie ändert sich das Resultat, wenn wir die gleiche Rechnung für einen Körper irgendwelcher Grösse machen, zum Beispiel für einen Stein, der im gleichen Abstand wie die Erde um die Sonne kreist?

5 Der Treibhauseffekt

Möglicherweise warst du über das Resultat der Aufgabe 5 etwas erstaunt. Die Lösung für die Temperatur der Erde aus der obigen Gleichung beträgt unter den getätigten Annahmen nämlich -18°C ! Dieses Resultat steht in krassem Gegensatz zu dem, was wir auf der Erde beobachten. Die auf diese Weise errechnete globale Temperatur wäre weit

unter dem Gefrierpunkt von Wasser und Leben in seiner heutigen Form wäre unter diesen Umständen nicht möglich. Die tatsächliche mittlere globale Temperatur beträgt etwa +15°C.

Im Verlaufe der Erdgeschichte hat sich um die Erde eine Hülle aus Gasen, Ionen, flüssigem und festem Wasser sowie aus Staub (*Aerosolen*) gebildet, die *Atmosphäre*. Diese greift wesentlich in den Strahlungshaushalt der Erde ein. Die wichtigste Eigenschaft der Atmosphäre in Bezug auf den Strahlungshaushalt ist deren *Treibhauseffekt*.

Der Begriff Treibhauseffekt (Greenhouse effect) wird in Anlehnung an die Eigenschaft eines Gewächs- oder eben Treibhauses für das Verhalten von Materialien oder Gasen verwendet, welche durchlässig (*transparent*) für kurzwellige Strahlung, aber undurchlässig (*opak*) für langwellige Wärmestrahlung sind. Die Atmosphäre beinhaltet nun Gase, die diese Eigenschaft in hohem Masse besitzen. Sie heißen *Treibhausgase*.

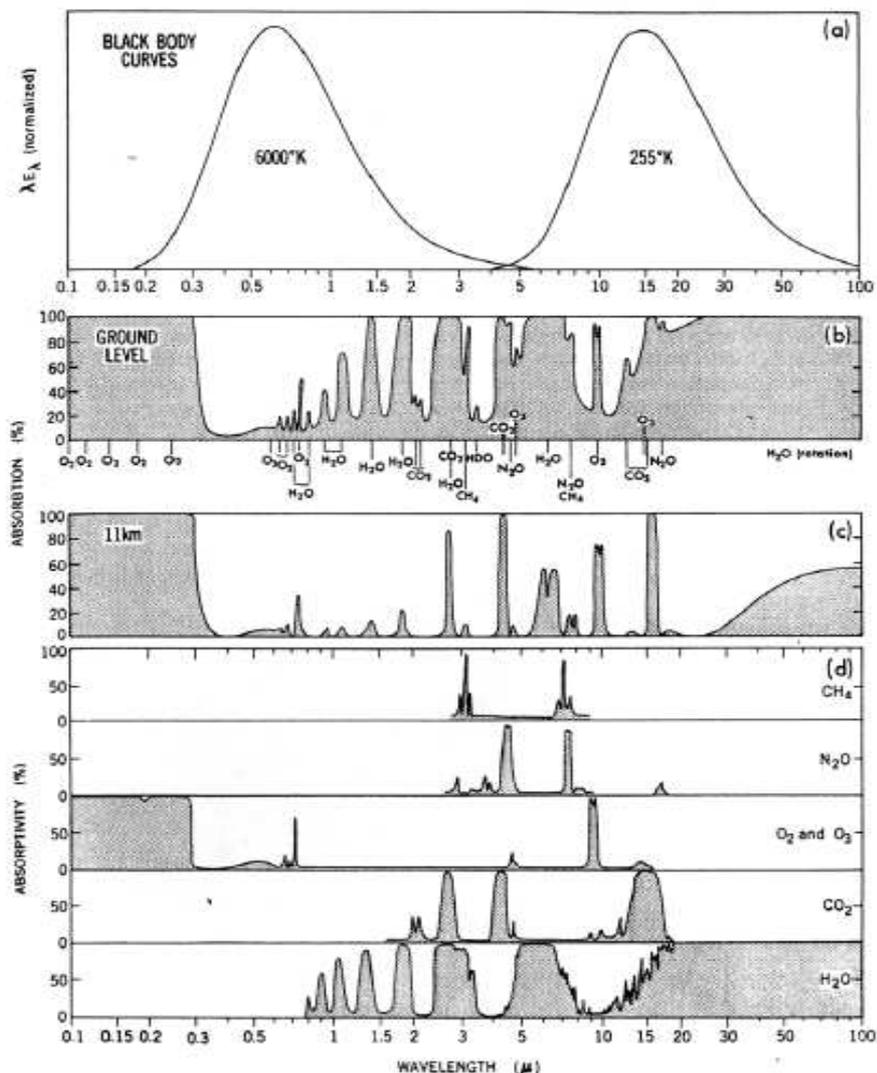


Abbildung 2: (a) Strahlungsintensitäten der Sonne (links oben) und der Erde (rechts oben) in Abhängigkeit der Wellenlängen der Strahlung. (b) Dargestellt ist die totale Absorption in % der Strahlung durch die Atmosphäre am Erdboden gemessen. (c) Gleich wie (b), aber in 11 km Höhe. (d) zeigt verschiedene Treibhausgase mit ihren jeweiligen Absorptionsbereichen.

Die Sonnenstrahlung liegt hauptsächlich im kurzwelligen Bereich, die von der Erde abgestrahlte Energie hingegen ausschliesslich im langwelligen Wärmestrahlungsbereich. Dies hat zur Folge, dass die Sonnenstrahlung die unbewölkte Atmosphäre quasi ungehindert durchdringen kann, die Wärmestrahlung der Erde aber nicht.



7. Versuche aufgrund der Abbildung 2 folgende Fragen zu beantworten:
- Warum ist die Ozonschicht (O_3) für uns so wichtig? Was macht sie?
 - In welcher Höhe liegt die Ozonschicht und in welcher Höhe der meiste Anteil an Wasserdampf?
 - Warum ist Wasserdampf (H_2O) das wichtigste Treibhausgas?

Die wichtigsten Treibhausgase in der Atmosphäre sind die Folgenden:

- Wasserdampf H_2O
- Kohlendioxid CO_2
- Methan CH_4
- Lachgas N_2O
- Ozon O_3
- Eine Vielzahl verschiedener Fluor-Kohlen-Wasserstoffe (sog. FCKWs)

Diese Treibhausgase sorgen nun dafür, dass die von der Erde abgestrahlte langwellige Wärmestrahlung zum Teil nochmals auf die Erde zurückgelangt. Daraus ergibt sich ein neues Strahlungsgleichgewicht.

Die folgende Abbildung zeigt die Intensität der Erdatstrahlung in verschiedenen Wellenlängen, wie sie ausserhalb der Atmosphäre über dem Äquator gemessen wird. Die oberste gestrichelte Linie zeigt die erwartete Strahlung der Erde ohne Atmosphäre.

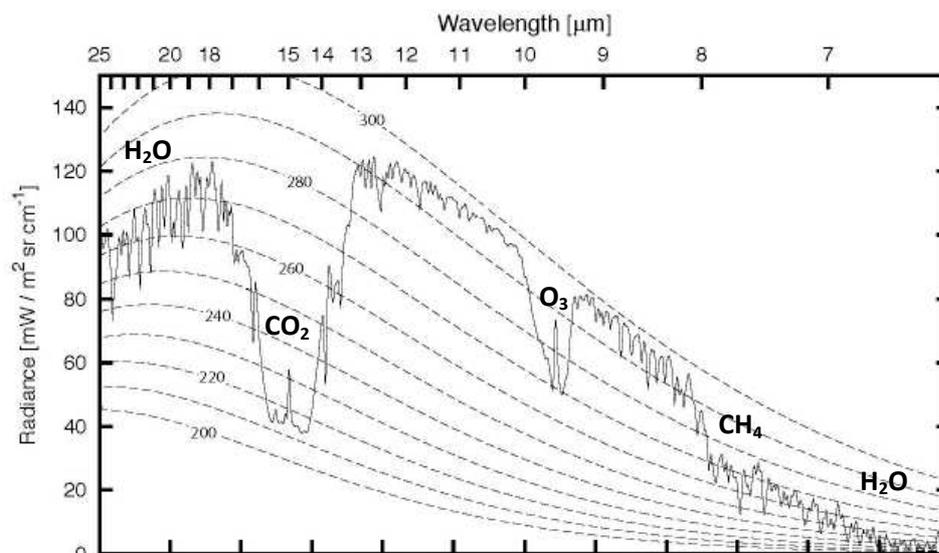


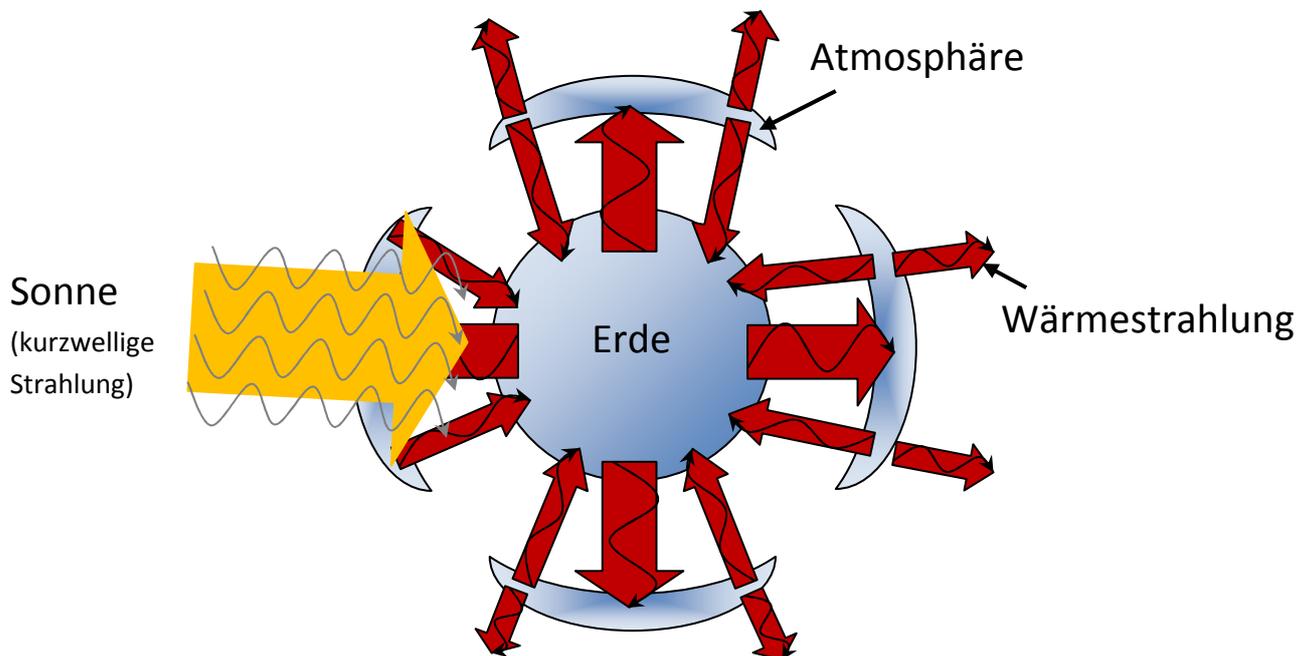
Abbildung 3: Spektrum der terrestrischen Abstrahlung über Afrika



8. Informiere dich im Internet oder in einem Lehrbuch über die natürlichen und künstlichen Quellen dieser Treibhausgase!
9. Erkläre, was in der Abbildung 3 zu sehen ist!

6 Einfachstes Klimamodell

Wir wollen nun den Treibhauseffekt in unsere Energiebilanz aus dem Kapitel 4 mit einbauen. Wir modellieren uns daher eine Atmosphäre! Diese Atmosphäre soll den kombinierten Effekt der Wolken, des Wasserdampfes und aller anderen Treibhausgase repräsentieren und soll insbesondere transparent sein für kurzwellige Strahlung und undurchlässig (opak) für langwellige Wärmestrahlung. Undurchlässig bedeutet, dass die Atmosphäre die Strahlung aufnimmt, sie aber dann auch *in alle Richtungen* wieder abgibt. Das bedeutet, dass etwa die Hälfte der Wärmestrahlung trotzdem in den Weltraum abgestrahlt wird! Die Hälfte aber geht zurück auf die Erde. Wir nehmen weiter an, dass diese modellierte Atmosphäre die Erde nur teilweise umhüllt (gleich einer Wolkendecke). Diesen Teil wollen wir mit c bezeichnen. Ferner soll unsere Atmosphäre vernachlässigbar dünn sein und sich schalenförmig mit dem gleichen Radius wie jener der Erde um diese herum spannen.



Wir stellen nun zwei Energiebilanzen auf; eine für die Atmosphäre und eine für die Erde:

Erde:

Einfallende Leistung auf die Erde:

- Einfallende Leistung von der Sonne:

$$P_{\text{einS}} = S_0 \cdot R_E^2 \pi \cdot (1 - \alpha) \quad P_{\text{einS}} = S_0 \cdot R_E^2 \pi \cdot (1 - \alpha)$$

- Einfallende Leistung von der Atmosphäre:

$$P_{\text{einA}} = \sigma \cdot T_A^4 \cdot (4R_E^2 \pi) \cdot c \quad P_{\text{einA}} = \sigma \cdot T_A^4 \cdot (4R_E^2 \pi) \cdot c$$

Abgegebene Leistung von der Erde:

- Abgegebene Leistung von der Erde:

$$P_{\text{ausE}} = \sigma \cdot T_E^4 \cdot (4R_E^2 \pi) \quad P_{\text{ausE}} = \sigma \cdot T_E^4 \cdot (4R_E^2 \pi)$$

Energiebilanz Erde:

$$S_0 \cdot R_E^2 \pi \cdot (1 - \alpha) + \sigma \cdot T_A^4 \cdot (4R_E^2 \pi) \cdot c = \sigma \cdot T_E^4 \cdot (4R_E^2 \pi)$$

Atmosphäre:

Einfallende Leistung in die Atmosphäre:

- Einfallende Leistung von der Sonne: nichts (durchlässig für kurzwellige Strahlung)

- Einfallende Leistung von der Erde: $P_{\text{einE}} = \sigma \cdot T_E^4 \cdot (4R_E^2 \pi) \cdot c$

Abgegebene Leistung von der Atmosphäre:

- Abgegebene Leistung von der Atmosphäre: $P_{\text{ausA}} = 2 \cdot \sigma \cdot T_A^4 \cdot (4R_E^2 \pi) \cdot c$

Energiebilanz Atmosphäre:

$$\sigma \cdot T_E^4 \cdot (4R_E^2 \pi) \cdot c = 2 \cdot \sigma \cdot T_A^4 \cdot (4R_E^2 \pi) \cdot c$$

Die beiden Energiebilanzen beinhalten je zwei unbekannte Grössen; die Temperatur der Erde T_E und die Temperatur der Atmosphäre T_A . Wir haben es also mit zwei Gleichungen und zwei unbekanntem Grössen zu tun. Damit lässt sich das Gleichungssystem lösen.



10. Löse das Gleichungssystem nach den beiden unbekanntem Grössen T_E und T_A auf und berechne die Grössen unter Verwendung der folgenden Parameter (Achte darauf, die richtigen Einheiten zu nehmen!):

- Radius Erde: $R_E = 6371 \text{ km}$
- Die Solarkonstante: $S_0 = 1360 \text{ Watt/m}^2$
- Albedo der Erde: $\alpha = 0.3$

- „Deckungsgrad“ der Atmosphäre: $c = 0.77$
- Stefan-Boltzmann-Konst.: $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Watt/m}^2 \text{ K}^4$

☞ Wir rekapitulieren:

Aufgrund des Strahlungsgesetzes von Stefan-Boltzmann und der von der Sonne auf die Erde fallenden Leistung sollte die mittlere globale Temperatur auf der Erde etwa -18°C betragen. Wegen des Treibhauseffekts der Atmosphäre liegt diese aber (wie als Lösung aus der Aufgabe 10 erfolgt) über 30°C höher bei etwa $+15^\circ\text{C}$. Die Temperatur der Atmosphäre beträgt etwa -30°C . Der natürliche Treibhauseffekt ist für das Leben auf der Erde also von grosser Wichtigkeit!

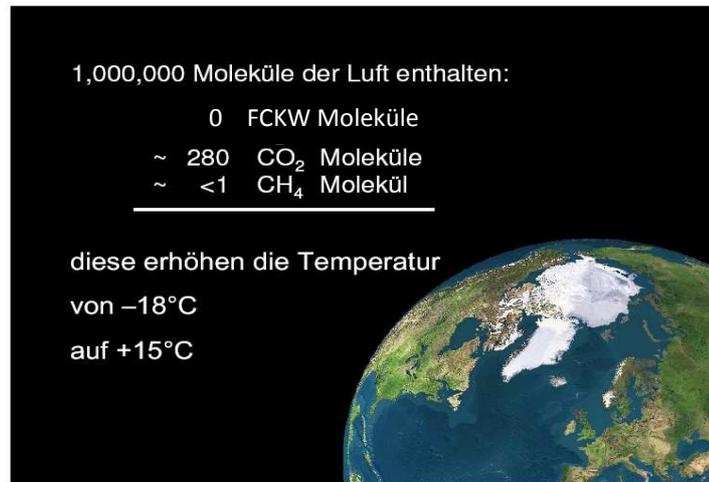


Abbildung 4: Vorindustrielle Treibhausgas-Konzentration

7 Der menschliche Einfluss auf den Treibhauseffekt

☞ Seit der Industrialisierung hat der Mensch durch das Verbrennen *fossiler Brennstoffe* und durch den Ausstoss von CO₂ die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre ständig erhöht. Diese Zunahme an Treibhausgasen ist zwar absolut betrachtet verschwindend klein. Auf 1 Million Moleküle sind seit 1750 durch den Menschen bloss gerade einige Hundert neue Treibhausgas-Moleküle dazugekommen, das sind nur einige Promille. In Kapitel 4 und auf der Abbildung 3 hast du allerdings gesehen, dass die etwa 4300 Treibhausgas-Moleküle (inklusive dem Wasserdampf, der in der Grafik nicht enthalten ist), die sich in einer Million Gasmoleküle befinden, einen Temperaturanstieg von **über 30°C** bewirken!

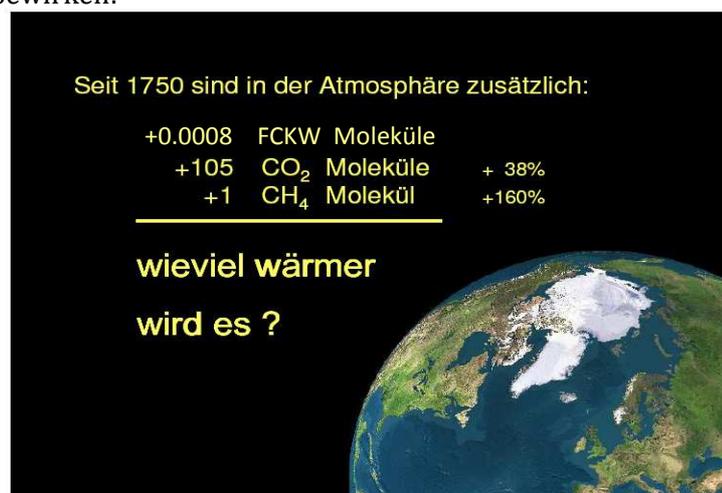


Abbildung 5: Zunahme der wichtigsten Treibhausgase seit 1750

Die Frage stellt sich nun, was die zusätzlichen Treibhausgas-Moleküle auf die Temperatur für eine Auswirkung haben werden!

Die effektivsten Treibhausgase sind die ausschliesslich vom Menschen künstlich hergestellten *Fluor-Kohlen-Wasserstoffe* FCKW. Sie wurden vor allem in den 30er Jahren als Reinigungsmittel in der Textilindustrie, als Kühlmittel in Eisschränken und Klimaanlageanlagen und als Treibgas in Spraydosen oder Schäumen verwendet. Diese unbrennbaren und ungiftigen Gase verhalten sich chemisch äusserst träge, sie sind *inert*. Das bedeutet, dass sie mit anderen chemischen Stoffen keine Verbindungen eingehen und daher, einmal freigesetzt, sehr lange in der Atmosphäre verweilen und nicht abgebaut werden. Die Verweilzeit der FCKWs in der Atmosphäre liegt zwischen 40 und 100 Jahren! Dazu kommt, dass sie ungleich effizienter Wärmestrahlung absorbieren, als die anderen Treibhausgase H_2O , CO_2 oder Methan. Aus der langen Aufenthaltszeit und der guten Absorptionseigenschaft von Wärmestrahlung resultiert ein sehr hohes *Treibhauspotential*. Vergleicht man die Treibhauswirkung von 1 kg FCKW mit 1 kg CO_2 über einen Zeitraum von 20 Jahre, so ist das FCKW bis zu 10'000 mal effektiver. Trotz der geringen Menge an FCKWs in der Atmosphäre (vgl. Abbildung 5) sind sie daher das dritt wichtigste vom Menschen künstlich in die Atmosphäre gebrachte Treibhausgas.

③ Der Wasserdampf und Rückkoppelungseffekte

Das weitaus wichtigste Treibhausgas in der Atmosphäre ist aber der Wasserdampf. Im Unterschied zu den Treibhausgasen CO_2 und CH_4 (Methan) lässt sich der Treibhauseffekt von Wasserdampf aber nicht einfach auf die totale Konzentration in der Atmosphäre zurückführen. Während beispielsweise CO_2 und Methan global in der Atmosphäre relativ gleichmässig gemischt sind, ist der Wasserdampf rund um den Globus sehr ungleich verteilt. Denke dabei nur an die Wüstenregionen wo die *spezifische Feuchte* in der Luft in der oberen Troposphäre wenige mg/kg betragen kann, während sich in den untersten Luftschichten über dem tropischen Ozean bis zu 30 g Wasserdampf pro Kilogramm Luft befinden kann. Seine Konzentration hängt aber auch davon ab, in welcher Höhe sich der Wasserdampf befindet und letztlich ändert sich seine Konzentration auch zeitlich rasch.

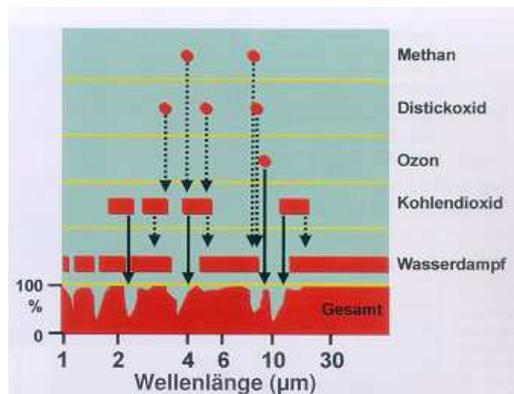


Abbildung 6: Wasserdampf ist das wichtigste Treibhausgas der Atmosphäre, da es in einem breiten Wellenlängenbereich langwellige Strahlung aufnehmen kann. Die übrigen Treibhausgase spielen dort, wo es schon viel Wasserdampf hat, eine geringere Rolle, da der Wasserdampf bereits einen

grossen Teil der Strahlungsenergie aufgenommen hat. (Quelle: Berner, U. und H.Streif (2000 - Hrsg.) Klimafakten, Der Rückblick - Ein Schlüssel für die Zukunft.- Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart. (238 S.))

Das bedrohliche am Wasserdampf ist, dass im Zusammenhang mit dem Treibhauseffekt eine *positive (verstärkende) Rückkoppelung* besteht:

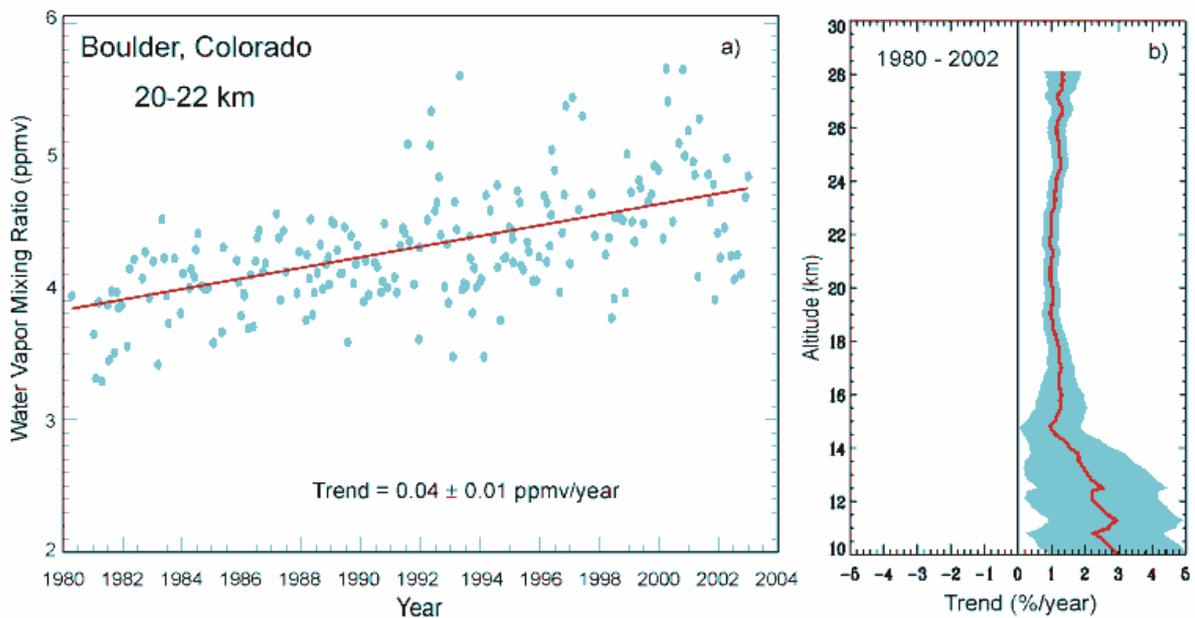
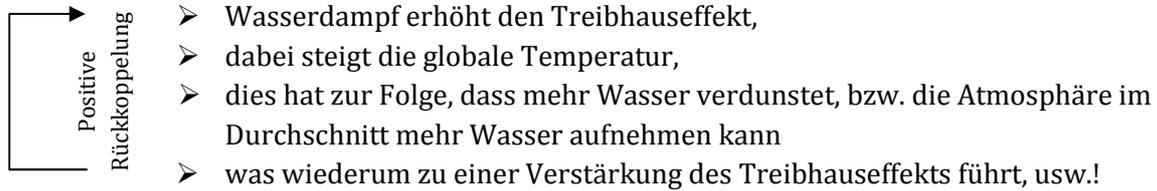


Abbildung 7: (rechts) Veränderung des Wasserdampf-Gehaltes in etwa 20 km Höhe über Colorado in den letzten 25 Jahren.(links)Links ist zu sehen, dass die Stärke und auch die Variation des zunehmenden Trends des Wassers in der Atmosphäre mit der Höhe variiert.(Quelle: NOAA; <http://www.cmdl.noaa.gov/hotitems/watervapor.html>)

Der Wasserdampf trägt heute rund 60% zum Treibhauseffekt bei und die Erhöhung der Oberflächentemperatur infolge einer Zunahme von CO₂ wird durch den Wasserdampf um einen Faktor 1.7 (!) verstärkt.

Die grössere Menge an Wasserdampf in der Atmosphäre bedeutete auch mehr Energie in der Atmosphäre, da Wasserdampf sehr viel *latente Wärme* enthält (→Arbeitsheft *Ozeanströme im Klimasystem*). Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit für Wetterextreme wie Stürme und Starkniederschläge, die zu Verwüstungen und erhöhter Erosion führen können.

Aber nicht nur die Konzentration des Wassers in der Luft ist für die Stärke seines Treibhauseffekts massgebend, sondern auch die Form in welcher es vorkommt. Bilden

sich Wolken? Wie ist die Struktur dieser Wolken? Sind sie aus Eis oder aus flüssigem Wasser?

Die Rolle der Wolken im Zusammenhang mit dem Treibhauseffekt schliesslich ist sehr kompliziert und immer noch Gegenstand intensiver Forschung. Einerseits absorbieren sie Wärmestrahlung und verstärken den Treibhauseffekt, andererseits streuen und reflektieren sie auch das kurzwellige Sonnenlicht und wirken so zum Teil auch kühlend auf das Klima.



11. Überlege dir, welche Grössen in unseren Gleichungen auf der Seite 8 sich durch den Einfluss des Menschen verändern und warum!

*Prof. Dr. Niklaus Kämpfer und sein Team an der **Abteilung für angewandte Physik (IAP)** der Universität Bern ist ein Spezialist für die Physik der Atmosphäre. Unter anderem mit Mikrowellen wird der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre sowie die Veränderung des stratosphärischen Ozons untersucht und beobachtet.*

<http://www.iapmw.unibe.ch>

Lösungen

1. Die Leistung der Sonne P_S wird auf der Kugeloberfläche mit dem Radius $R = 150$ Millionen Kilometern verteilt. Folglich bleibt in diesem Abstand pro Quadratmeter noch eine Leistung von:

$$S_0 = \frac{P_S}{4\pi R^2} = \frac{3.9 \cdot 10^{26} \text{ Watt}}{4\pi (1.5 \cdot 10^{11})^2 \text{ m}^2} = 1379 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2}$$

Diese Grösse S_0 heisst Solarkonstante. Bei unserer Rechnung haben wir einige Grössen etwas gerundet. Gemäss der Formelsammlung beträgt die Solarkonstante heute im Mittel etwa 1360 W/m^2 .

2. Multiplizierst du die Solarkonstante mit der Querschnittsfläche der Erde, bekommst du die Leistung, die die Erde von der Sonne auffängt:

$$P = S_0 \cdot R_E^2 \pi = 1379 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2} \cdot (6.317 \cdot 10^6 \text{ m})^2 \cdot \pi = 1.7 \cdot 10^{17} \text{ Watt}$$

3. Die *Albedo* bedeutet die Reflexivität der Erdoberfläche. Besonders helle Flächen reflektieren viel Sonnenlicht. Allen voran natürlich Schneeflächen. Aber auch Sandflächen reflektieren viel Sonnenlicht. Eher wenig Licht wird durch dunkle Oberflächen reflektiert, wie etwa durch die borealen Nadelwälder des hohen Nordens oder dem tropischen Regenwald. In der Grafik nicht ersichtlich ist die Albedo des Ozeans. Auch der Ozean hat eine geringe Albedo. Der grösste Teil des Sonnenlichtes absorbiert er und nimmt die Energie in Form von Wärme auf.
4. Um die Temperatur der Sonne zu berechnen kannst du das Strahlungsgesetz von Stefan-Boltzmann verwenden.

$$P = \sigma T^4 A$$

Wenn du die Formel nach der Temperatur auflöst und für P die Leistung der Sonne und für A die Oberfläche der Sonne einsetzt kommst du zum Resultat!

$$T = \sqrt[4]{\frac{P}{\sigma \cdot A}} = \sqrt[4]{\frac{P}{\sigma \cdot 4\pi R_S^2}} = \sqrt[4]{\frac{3.9 \cdot 10^{26} \text{ Watt}}{5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \cdot 4\pi (7.1 \cdot 10^7 \text{ m})^2}} = 5781 \text{ Kelvin}$$

Diese Temperatur entspricht der Oberflächentemperatur der Sonne. Im Innern ist die Sonne mehrere Millionen Kelvin heiss!

5. Nach dem Umformen der Formel nach der Temperatur der Erde T_E sieht die Gleichung wie folgt aus:

$$T_E = \sqrt[4]{\frac{S_0 \cdot (1 - \alpha)}{4 \cdot \sigma}} = \sqrt[4]{\frac{1360 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2} \cdot (1 - 0.3)}{4 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \text{K}^4}}} = 255 \text{ Kelvin} = -18^\circ \text{C}$$

6. Da die Grösse (Radius) des Wärmestrahlung abgebenden Körpers in der Formel gar nicht mehr vorkommt, ist das Resultat für einen Körper von beliebiger Grösse gültig, also auch für einen Stein. Entscheidend beeinflusst das Resultat die mittlere Albedo α !

7.

- In der Abbildung 2b ist ersichtlich, dass das Ozon (O_3) Strahlung im für uns gefährlichen Ultraviolett (UV) Bereich der Sonnenstrahlung absorbiert. Die Ozonschicht ist für uns wie ein **Schutzschild vor dieser UV-Strahlung**.
- Die Absorption der UV-Strahlung durch das Ozon ist bereits in 11 Kilometern Höhe fast vollständig (Abbildung 2c). Also muss die Ozonschicht in einer **Höhe grösser als 11 Kilometer** liegen. Die Absorption durch Wasserdampf (H_2O) hingegen wirkt erst am Boden (Groundlevel, Abbildung 2a, rechte Seite des Spektrums) in seiner vollen Stärke. Der Grund dafür ist, dass sich der meiste Wasserdampf in einer Höhe **unterhalb von 11 Kilometern**, der Troposphäre, befindet. Dort findet auch das Wetter statt.
- Die weitaus stärkste Absorption von Wärmestrahlung zeigt **der Wasserdampf**. Auch von der Menge her macht der Wasserdampf den grössten Anteil an den Treibhausgasen aus.

8. **Wasserdampf H_2O :** „Der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre ist sehr unterschiedlich und hängt stark von der Lufttemperatur ab. Kalte Luft (Polargebiete, Troposphäre in ca. 10 km Höhe) ist sehr trocken, warme Luft kann viel Feuchtigkeit aufnehmen. Doch auch in warmen Regionen kann die Luftfeuchte zwischen 0% und 100% (Wüsten u. Regenwald) schwanken. Durch die starken Schwankungen je nach Ort und Höhe ist der Wasserdampf in der Klimavorhersage eine schwer abzuschätzende Grösse.“

(Quelle: <http://www.espere.net/Germany/water/dewaterconcd.html>)

Kohlendioxid CO_2 : Das natürliche Vorkommen von CO_2 geht auf die Photosynthese der Pflanzen (vorerst der ozeanischen Vegetation) zurück. Erst nachdem eine bestimmte Menge CO_2 in der Atmosphäre einen natürlichen Treibhauseffekt erzeugt hatte wurde Leben ausserhalb des Wassers möglich. Seit etwa 200 Jahren sorgen das Verbrennen von fossilen Brennstoffen (Öl, Gas, Kohle) für eine jährliche Zunahme des atmosphärischen CO_2 von 1.5 – 2 ppmv (→Arbeitsheft Kohlenstoffkreislauf).

(Quelle: diverse)

Methan CH₄: Der Methaneintrag in die Atmosphäre stammt aus folgenden Quellen:

- Feuchtgebiete + Reis
- Nutzung fossiler Brennstoffe
- Haltung von Wiederkäuer (Kühe, Schafe, usw.)
- Mülldeponien
- Biomasseverbrennung

(Quelle: z.B. <http://www.atmosphere.mpg.de>)

Lachgas N₂O : „N₂O in der Atmosphäre stammt sowohl aus natürlichen als auch aus anthropogenen Quellen. Natürliche Quellen sind Böden und Ozeane, in der Atmosphäre kann Lachgas aus der Oxidation von Ammoniak entstehen.“

Anthropogene Quellen sind landwirtschaftliche Böden, Viehwirtschaft, Verbrennung fossiler Brennstoffe und von Biomasse, Verkehr (Einsatz von 3-Wege-Katalysatoren) und industrielle Quellen.

Die größten Mengen an N₂O stammen aus der Landwirtschaft (Ackerböden, Viehwirtschaft). Durch mineralische Düngung und Wirtschaftsdüngung (Stallmist, Gülle) wird den Böden Stickstoff zugeführt. Dieser wird bei mikrobiellen Abbauprozessen im Boden (Denitrifikation) teilweise in N₂O umgewandelt.“

(Quelle: Roland Irslinger: <http://www.stz-rottenburg.de/biblio/Vorlesungsskripte/Downloadbereich>; UMWELTBUNDESAMT 2005 [Stand 19.10.2005])

Ozon O₃: Ozon kann hauptsächlich auf drei Arten gebildet:

- Durch Photodissoziation von Sauerstoff: Energiereiche Sonnenstrahlung spaltet Sauerstoff-Moleküle in der Stratosphäre in zwei einzelne Atome, die sich jeweils mit einem weiteren Sauerstoff-Molekül zu Ozon vereinigen. Dieser Vorgang der Spaltung von Sauerstoff-Molekülen durch energiereiche UV-C-Strahlung mit einer Wellenlänge von < 0,242 µm wird als Photodissoziation bezeichnet.
- Durch ein Gewitter: Durch den elektrischen Stromfluss zwischen Wolke und Erdboden bei der Blitzentladung entsteht Ozon (aber auch Salpetersäure und andere Stoffe).
- In Erdnähe bildet sich Ozon aus einer Reaktion zwischen Stickstoffoxiden NO_x, die aus der unvollständigen Verbrennung von fossilen Brennstoffen stammen, und Sauerstoff O₂ unter dem Einfluss von UV-Strahlung.

(Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Ozon>)

FCKWs : Fluor-Kohlenwasserstoffe kommen in der Natur nicht vor und wurden durch den Menschen in die Atmosphäre gebracht. Sie wurden zwischen 1930 und 1990 als Kühlmittel in Kühlgeräten, als Treibgase in Spraydosen, als Treibmittel in Schaumstoffen und als Reinigungs- oder Lösungsmittel eingesetzt. Seit 1990 ist deren Herstellung verboten. Seither nimmt deren Konzentration in der Atmosphäre langsam ab. Allerdings beträgt deren Verweildauer in der Atmosphäre je nach Produkt zwischen 44 und 180 Jahren!

(Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/FCKW>)

9. Die oberste gestrichelte Linie zeigt die aufgrund der Temperatur der Erde (320 K) erwartete Abstrahlung. Gemessen wird aber eine beträchtlich reduzierte Abstrahlung. Dies kommt daher, dass die verschiedenen Treibhausgase bestimmte Teile des Abstrahlungsspektrums zurückhalten.
10. Löse beispielsweise zuerst die Energiebilanz der Erde nach der Temperatur der Atmosphäre T_A auf:

$$T_A = \sqrt[4]{\frac{T_E^4}{c} - \frac{S_0 \cdot (1 - \alpha)}{4c\sigma}}$$

Löse nun die Energiebilanz der Atmosphäre auch nach der Temperatur der Atmosphäre T_A auf:

$$T_A = \sqrt[4]{\frac{T_E^4}{2}}$$

Jetzt kannst du die beiden Gleichungen gleichsetzen und nach der Temperatur der Erde T_E auflösen und die gegebenen Zahlen einsetzen:

$$T_E = \sqrt[4]{\frac{S_0 \cdot (1 - \alpha)}{2\sigma(2 - c)}} = \sqrt[4]{\frac{1360 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2} \cdot (1 - 0.3)}{2 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \cdot (2 - 0.77)}} = 287.4 \text{ Kelvin} = 14.4^\circ \text{C}$$

Diese Temperatur der Erde kann nun in die andere Gleichung für die Temperatur der Atmosphäre eingesetzt werden:

$$T_A = \sqrt[4]{\frac{T_E^4}{2}} = \frac{T_E}{\sqrt[4]{2}} = \frac{287.4 \text{ K}}{1.1892} = 241.7 \text{ K} = -31.3^\circ \text{C}$$

11. Wenn du die beiden obigen Formeln in einem Tabellenkalkulationsprogramm (z.B. Excel) eingibst, kannst du sehr einfach beobachten, was mit den Resultaten geschieht, wenn du die Größen α (Albedo) und c (Deckungsgrad der Wolken) veränderst. Das ist nämlich das, was auf der Erde im Moment geschieht: Das **Abschmelzen der Polkappen**, **die Desertifikation wie auch das Abholzen der Regenwälder** verändert die Albedo der Erde. Das Erhöhen der Treibhausgase in der Atmosphäre erhöht den „Deckungsgrad“ oder - vielleicht hier besser - **die Effizienz der Atmosphäre beim Treibhauseffekt** (in unserer Formel das c). Das Problem, für die Klimamodellierer ist bloss, dass niemand so ganz genau weiss, wie stark sich diese Größen verändern werden. Zum Teil gibt es dabei positive sowie negative Rückkoppelungen. So nimmt beispielsweise durch die Erhöhung der globalen Temperatur der Wasserdampf in der Atmosphäre zu, dies erhöht einerseits das c aber andererseits auch die Albedo!