







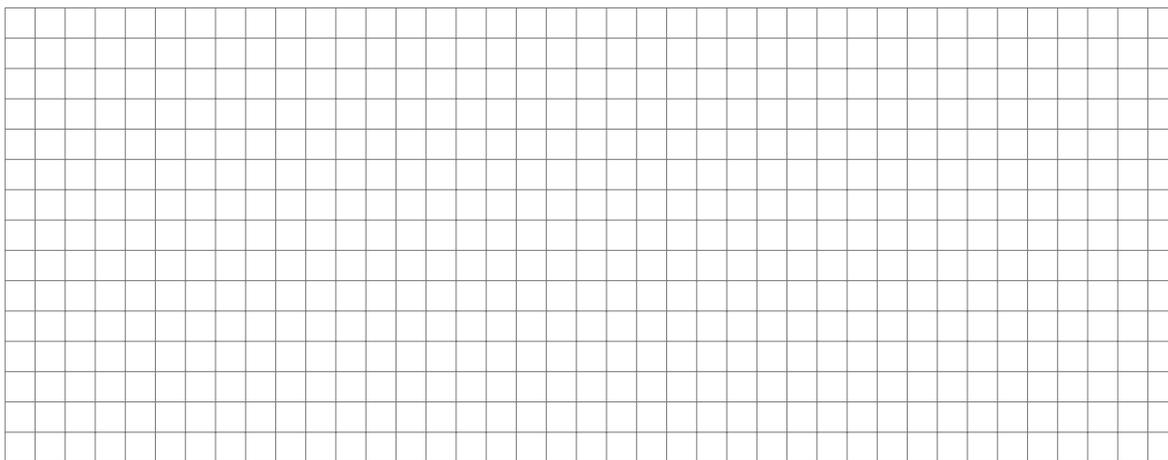
### 1.1.3 Das Strahlungsgesetz nach Stefan–Boltzmann

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*:

$$P = \sigma T^4 A \quad (1.1.1)$$

mit  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$ , der Stefan–Boltzmann–Konstanten. Die Leistung, die von einem Körper abgestrahlt wird, hängt also auch noch von der Oberfläche  $A$  des Körpers ab, über welche die Strahlung abgegeben wird.

**Aufgabe 4:** In Kapitel [1.1.1](#) finden Sie die Leistung mit der die Sonne Strahlung abgibt. Berechnen Sie daraus die Oberflächentemperatur der Sonne, wenn ihr Radius 700'000 km beträgt.



### 1.1.4 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 Strahlungsgleichgewicht zwischen einfallender und abgegebener Strahlung.

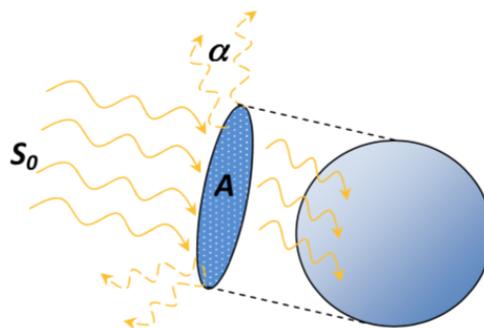


Abbildung 1.4: Aufnahme der Sonnenenergie.

In Aufgabe 2 haben Sie berechnet, mit welcher Leistung die Erde von der Sonne Energie aufnimmt. Hier in [Abbildung 1.4](#) nochmals eine schematische Darstellung.

$S_0$  bezeichnet die Solarkonstante, also die Leistung pro Quadratmeter, die auf die Erde fällt.  $\alpha$  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:

$$P_{\text{ein}} = S_0 \cdot A \cdot (1 - \alpha) \quad (1.1.2)$$

$$= S_0 \cdot R_E^2 \cdot \pi \cdot (1 - \alpha) \quad (1.1.3)$$



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 Gewächshaus- 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.

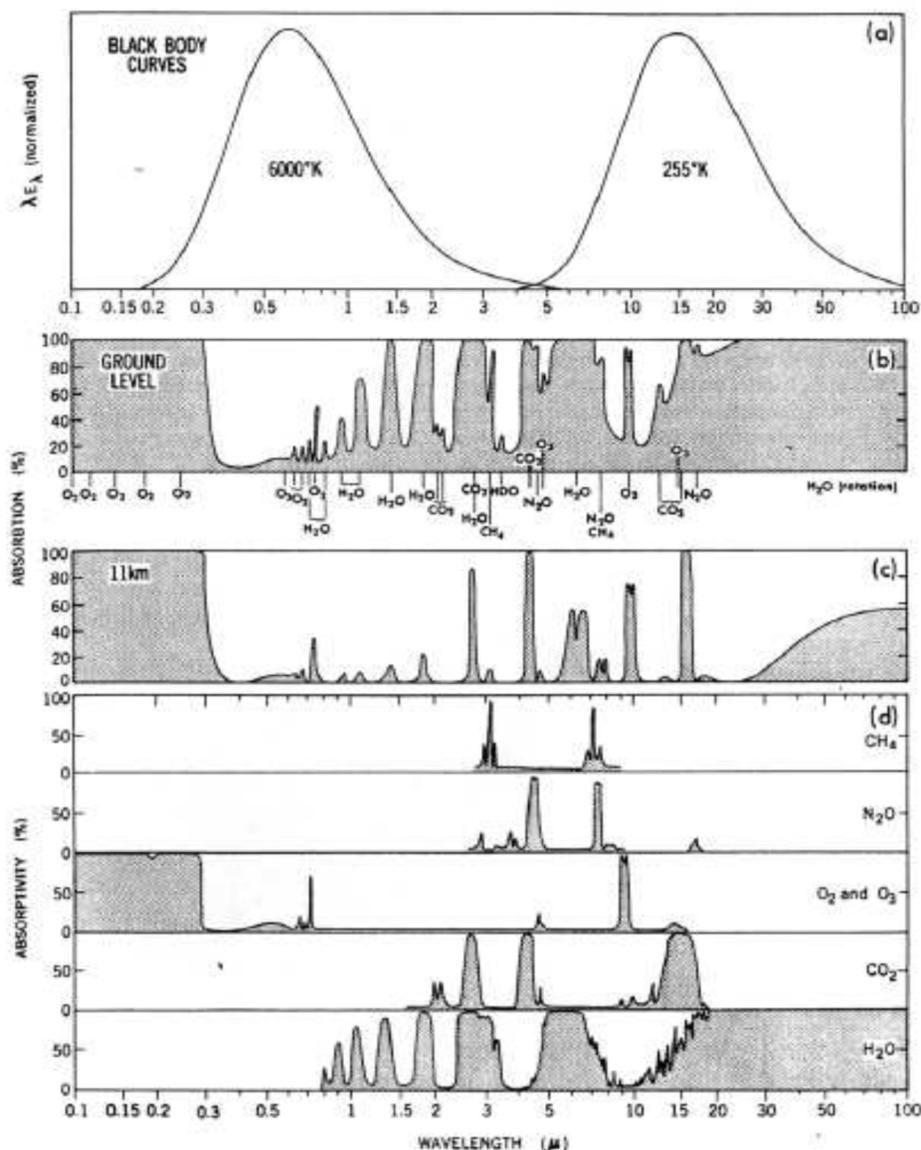


Abbildung 1.6: (a) Strahlungsintensitäten der Sonne (links oben) und der Erde (rechts oben) in Abhängigkeit der Wellenlängen der Strahlung. (b) Dargestellt ist die totale Absorption in % der Strahlung durch die Atmosphäre am Erdboden gemessen. (c) Gleich wie (b), aber in 11 km Höhe. (d) zeigt verschiedene 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.







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

### 1.1.7 Der menschliche Einfluss auf den Treibhauseffekt

Seit der Industrialisierung hat der Mensch durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe und durch den Ausstoss von  $\text{CO}_2$  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 [1.1.5](#) und auf der Abbildung [1.7](#) haben Sie 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  $30^{\circ}\text{C}$  bewirken!

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 Klimaanlage 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  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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 [1.10](#)) sind sie daher das dritt wichtigste vom Menschen künstlich in die Atmosphäre gebrachte Treibhausgas.

### 1.1.8 Der Wasserdampf und Rückkoppelungseffekte

Das weitaus wichtigste Treibhausgas in der Atmosphäre ist aber der Wasserdampf. Im Unterschied zu den Treibhausgasen  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  (Methan) lässt sich der Treibhauseffekt von Wasserdampf aber nicht einfach auf die totale Konzentration in der Atmosphäre zurückführen. Während beispielsweise  $\text{CO}_2$  und

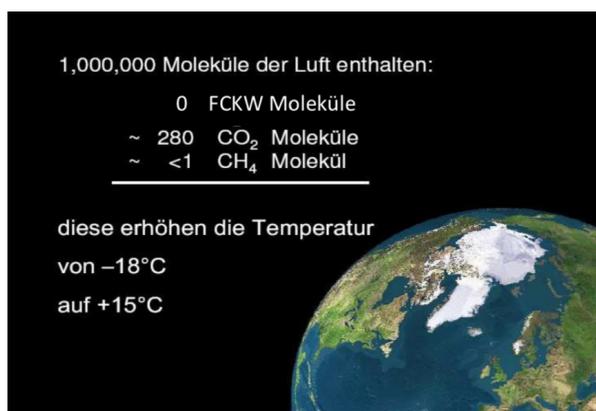


Abbildung 1.9: Vorindustrielle Treibhausgas-Konzentration.

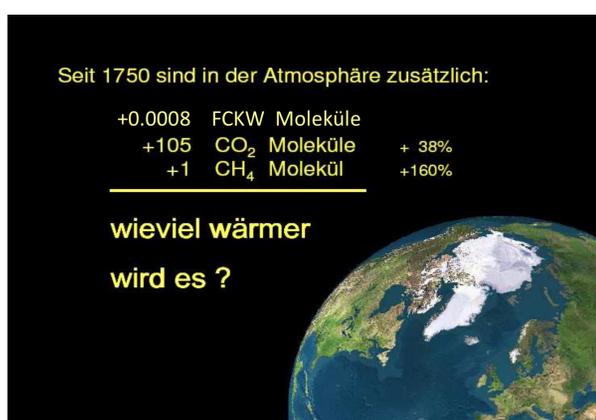


Abbildung 1.10: Zunahme der wichtigsten Treibhausgase seit 1750.

Methan global in der Atmosphäre relativ gleichmässig gemischt sind, ist der Wasserdampf rund um den Globus sehr ungleich verteilt. Denken Sie 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.

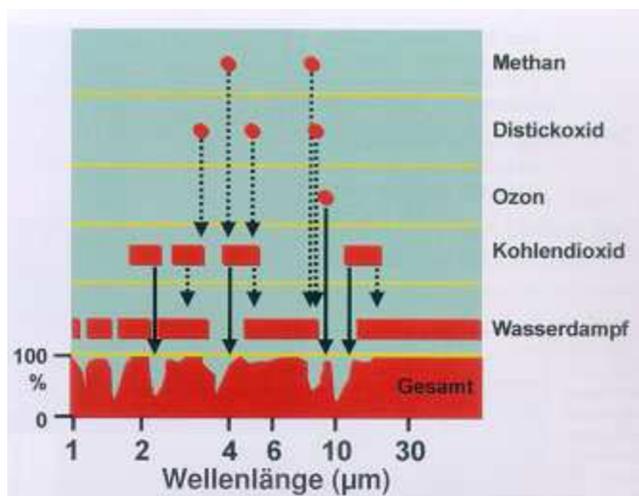


Abbildung 1.11: Wasserdampf ist das wichtigste Treibhausgas der Atmosphäre, da es in einem breiten Wellenlängenbereich langwellige Strahlung aufnehmen kann. Die übrigen Treibhausgase spielen dort, wo es schon viel Wasserdampf hat, eine geringere Rolle, da der Wasserdampf bereits einen grossen Teil der 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:

- Wasserdampf erhöht den Treibhauseffekt,
- dabei steigt die globale Temperatur,
- dies hat zur Folge, dass mehr Wasser verdunstet, bzw. die Atmosphäre im Durchschnitt mehr Wasser aufnehmen kann,
- was wiederum zu einer Verstärkung des Treibhauseffekts führt, usw.!

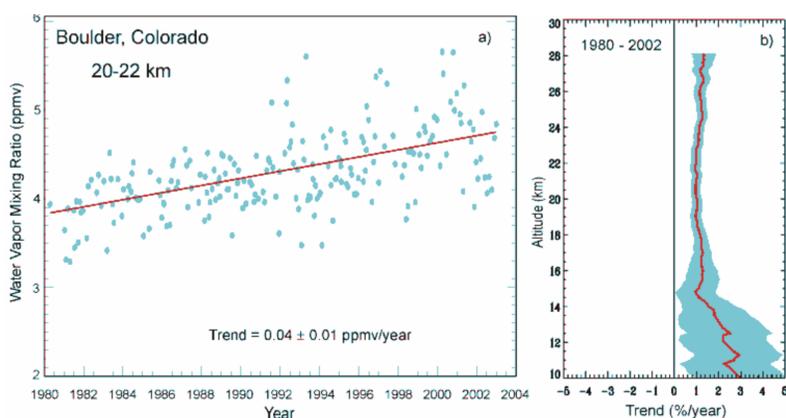


Abbildung 1.12: Links: Veränderung des Wasserdampf-Gehalts in etwa 20 km Höhe über Colorado in den letzten 25 Jahren. Rechts: Es ist zu sehen, dass die Stärke und auch die Variation des zunehmenden Trends des Wassers in der Atmosphäre mit der Höhe variiert. (Quelle: NOAA; <http://www.cmdl.noaa.gov/hotitems/watervapor.html>)

Der Wasserdampf trägt heute rund 60% zum Treibhauseffekt bei und die Erhöhung der Oberflächentemperatur infolge einer Zunahme von  $\text{CO}_2$  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. 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.