

1. Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre

1.1 Anthropogener Einfluss

Zunächst wird diskutiert, inwieweit der gemessene Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf die Verbrennung fossiler Brennstoff zurückgeführt werden kann und somit anthropogen bedingt ist.

Im Jahr 2022 wurden weltweit etwa 184 EJ Öl, 135 EJ Erdgas und 153 EJ Kohle als fossile Energieträger verbrannt und damit Kohlendioxid in die Atmosphäre emittiert (1 EJ = 10¹⁸ J).

In der **Tabelle 1.1** ist der Heizwert (Energieinhalt) der drei fossilen Brennstoffe angegeben, deren Kohlenstoffgehalt und die daraus resultierenden CO₂ – Emissionen. Kohlenstoff hat die Molmasse 12 kgC / kmol und Sauerstoff 32 kg O₂ / kmol. Daraus folgt, dass 1kg C → 44/12 = 3,67kg CO₂ ergibt. Entsprechend des Kohlenstoffgehaltes der fossilen Brennstoffe emittiert Kohle 0,10 kg CO₂/MJ, Erdöl 0,075 kg CO₂/MJ und Erdgas 0,055 kg CO₂/MJ. Wenn Kohle durch Erdgas ersetzt wird, lässt sich also etwa die Hälfte deren Emissionen einsparen.

| | Heizwert MJ/kg _B | C-Gehalt kg _C /kg _B | CO ₂ -Emission kg _{CO2} /MJ |
|--------|--------------------------------|--|--|
| Erdgas | 47,3 | 0,71 | 0,055 |
| Öl | 42,7 | 0,86 | 0,075 |
| Kohle | 29,3 | 0,81 | 0,10 |

Tabelle 1.1: Spezifische CO₂ – Emission der fossilen Brennstoffe

Der energiebedingte in die Atmosphäre emittierte Massenstrom beträgt somit

$$\dot{M}_E = (184 \cdot 0,075 + 135 \cdot 0,055 + 153 \cdot 0,10) \frac{\text{kgCO}_2}{\text{MJ}} \cdot \frac{\text{EJ}}{\text{a}} \approx 37 \cdot 10^{12} \frac{\text{kgCO}_2}{\text{a}} \approx 37 \frac{\text{GtCO}_2}{\text{a}}$$

Entsprechend dem Naturgesetz der Massenerhaltung, muss dieses Kohlendioxid in der Atmosphäre gespeichert werden. Die zeitliche Änderung der gespeicherten Masse M_A beträgt somit

$$\dot{M}_E = \frac{dM_A}{dt}$$

Die Konzentrationsänderung in der Atmosphäre beträgt

$$\frac{dM_A}{dt} = M_L \cdot \frac{dc_A}{dt} \cdot \frac{\rho_{\text{CO}_2}}{\rho_L},$$

worin M_L die Luftmasse der Atmosphäre, c_A die CO₂-Vol.-Konzentration in der Atmosphäre und ρ die Dichte von CO₂ bzw. Luft bedeutet. Die Masse der Luft ergibt sich aus dem Kräftegleichgewicht zwischen der Druckkraft und der Schwerkraft

$$p \cdot A = M_L \cdot g,$$

wobei A die Erdoberfläche ist (Erddurchmesser $d_E = 12740 \text{ km}$). Damit erhält man für den Anstieg des CO_2 in der Atmosphäre ohne Senken ($1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2$)

$$\frac{dc_A}{dt} = \dot{M}_E \cdot \frac{\rho_L}{\rho_{\text{CO}_2}} \cdot \frac{g}{p \cdot \pi \cdot d^2}$$

$$= 37 \text{ Gt/a} \cdot \frac{1,29}{1,98 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 / \text{m}^2} \cdot \frac{9,81 \text{ m/s}^2}{\pi \cdot 12,7^2 \cdot 10^{12} \text{ m}^2} = \frac{4,6 \cdot 10^{-6}}{\text{a}} = 4,6 \frac{\text{ppm}}{\text{a}}$$

In **Bild 1.1** ist die gemessene Konzentration an Kohlendioxid in der Atmosphäre seit 1960 gezeigt. Die Konzentration hat demnach stetig zugenommen. Der Anstieg beträgt zurzeit etwa 2,3 ppm pro Jahr. Dieses ist nur halb so viel, wie es auf Grund des energiebedingten Ausstoßes an CO_2 sein müsste. Dies ist darin begründet, dass die Vegetation und die Weltmeere als Senken für das CO_2 (zum Glück) wirken. Von dem emittierten Kohlendioxid wird etwa ein Viertel von der Vegetation aufgenommen, die dadurch schneller wächst, und ein Viertel von den Weltmeeren, worauf nachfolgend noch eingegangen wird.

Fazit: Der CO_2 -Anstieg in der Atmosphäre ist also eindeutig anthropogen bedingt.

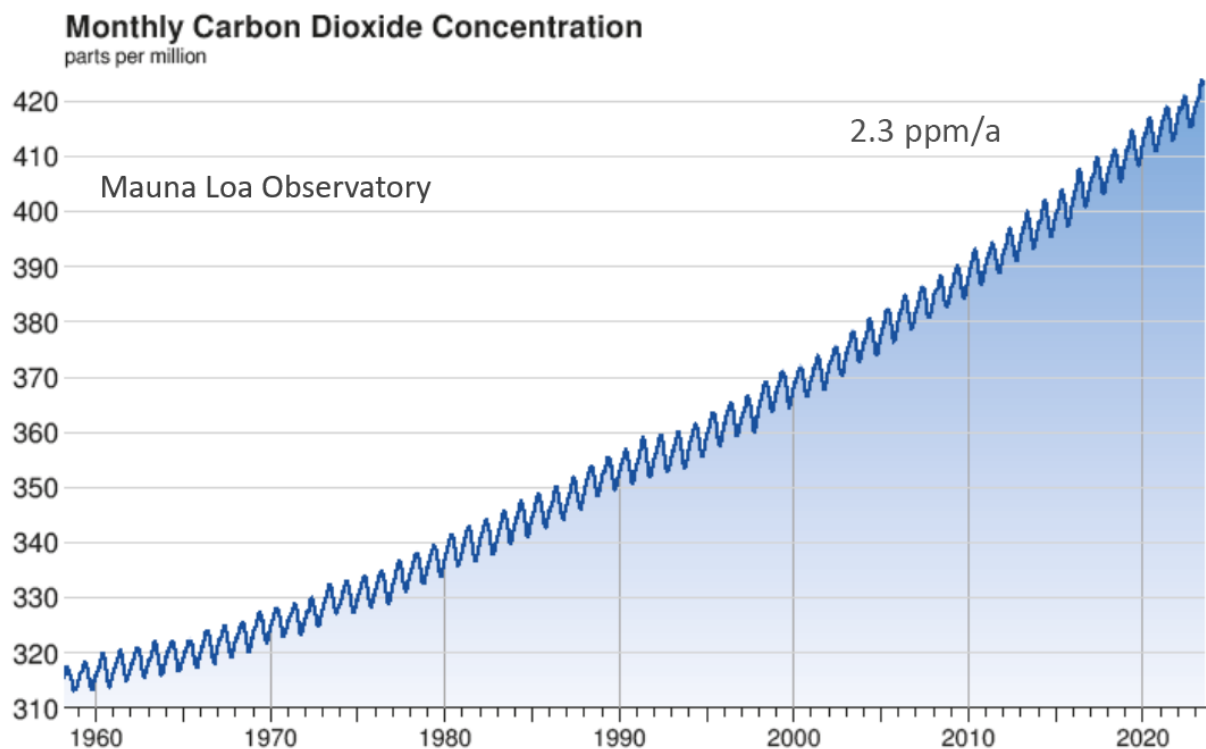


Bild 1.1: Gemessener Anstieg des Kohlendioxids in der Atmosphäre am Beispiel von Mauna Loa (Hawaii) von Scripps Institution of Oceanography

1.2 Aufnahme der Vegetation

Die Vegetation nimmt infolge der Photosynthese CO_2 auf und spaltet dieses durch die Lichtenergie in Kohlenstoff für den Wachstumsprozess und in Sauerstoff auf, wodurch dieser in der Atmosphäre erhalten bleibt. Dieser Effekt ist in Bild 1.1 an dem wellenförmigen Verlauf der Konzentration mit einer Frequenz von einem Jahr zu erkennen. Während der Wachstumsphase der Vegetation nimmt die Konzentration ab, da verstärkt Kohlendioxid aus der Atmosphäre verbraucht wird. Von allen Pflanzen sind ca. 90 % sogenannte C3-Pflanzen, die unterhalb einer CO_2 -Konzentration von 150 ppm die Photosynthese einstellen und absterben. Unsere Bäume, Getreide und Reis wachsen besser mit steigendem CO_2 -Gehalt in der Luft. C4-Pflanzen, wie Gräser und Mais, reagieren nicht so empfindlich auf CO_2 . Von der vorindustriellen Zeit bis heute hat sich die Photosyntheseleistung der meisten Pflanzen um 65 % gesteigert. Zurzeit beträgt die Differenz der Konzentration des Kohlendioxids zwischen Sommer und Winter etwa 8 ppm. Im Jahre 1960 betrug die Differenz nur etwa 5 ppm. Dieses zeigt, dass das Wachstum der Vegetation zugenommen hat. Bei einem weiteren Anstieg des CO_2 in der Luft von den heutigen 410 ppm auf 600 ppm legen die Pflanzen noch einmal 35 % zu. Manche Gewächshausbesitzer machen sich das zunutze, in dem sie die Treibhäuser auf 600 ppm CO_2 anreichern, um damit eine entsprechend bessere Nahrungsmittelausbeute von mehr als einem Drittel zu erreichen.

1.3 Absorption in den Weltmeeren

Die Absorption von Gasen in Wasser wird mit dem Henry-Gesetz beschrieben

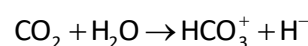
$$p_i = H_e \cdot \tilde{x}_i.$$

Dies besagt, dass der Partialdruck einer Gaskomponente p_i proportional der Molkonzentration \tilde{x}_i (mol i/mol Wasser) dieser Gaskomponente im Wasser ist. Das heißt, der Partialdruck und die Molkonzentration stehen im Gleichgewicht. Der Proportionalfaktor heißt Henry-Koeffizient H_e . Dieser ist temperaturabhängig entsprechend der Arrhenius-Beziehung, die für alle Gleichgewichte gilt,

$$H_e = H_{e_0} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta h}{R \cdot T}\right).$$

Hierin ist Δh die Lösungsenthalpie, R die universelle Gaskonstante und T die absolute Temperatur. Der Henry-Koeffizient nimmt mit der Temperatur zu. Bleibt der Partialdruck gleich, muss also die Molkonzentration mit der Temperatur abnehmen. Kalte Flüssigkeiten können somit mehr Gase lösen als warme Flüssigkeiten. Dieser Effekt ist an Sprudelflaschen sichtbar. Kommt diese aus dem Kühlschrank, perlt das CO_2 nur langsam nach dem Öffnen aus. Steht diese dagegen in der Sonne, zischt das CO_2 stark aus.

Das Kohlendioxid dissoziiert nun im Wasser entsprechend



zu Kohlensäure HCO_3 . Deren Konzentration ist in der Regel auf dem Etikett von Mineralwasserflaschen angegeben. Die Molkonzentrationen \tilde{p} stehen im Gleichgewicht, für das gilt

$$\frac{\tilde{p}_{\text{HCO}_3} \cdot \tilde{p}_{\text{H}}}{\tilde{p}_{\text{CO}_2}} = k,$$

wobei k die Gleichgewichtskonstante ist. Die Molkonzentration des Wasserstoffs H ist der pH -Wert (power of Hydrogen). Im **Anhang A1** sind die Konzentrationen berechnet. Daraus ist ersichtlich, dass das Kohlendioxid überwiegend in Form von Kohlensäure im Wasser enthalten ist. Die mittlere Kohlensäurekonzentration im Meer ist erheblich niedriger als der Wert an den Oberflächen, der im Gleichgewicht mit der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre steht. Folglich muss stets CO_2 aus der Atmosphäre in den Meeren absorbieren. Die Meere nehmen das CO_2 aus der Atmosphäre auf.

Der in die Meere übergehende Massenstrom an CO_2 ist im Anhang A2 – unter vereinfachten Annahmen – analytisch berechnet. Die Eindringtiefe des CO_2 in die Meere ist ebenfalls im Anhang A2 berechnet. Daraus ist ersichtlich, dass die Eindringtiefe in der Größenordnung von nur 100 m liegt. Damit findet eine starke Anreicherung an Kohlensäure vornehmlich in oberflächennahen Bereichen statt. Man spricht konsequenterweise von einer Versauerung der Meere. Erst in sehr großen Zeiträumen (mehr als 1000 Jahre) wird die Kohlensäure auf Grund der globalen Meeresströmungen in größere Tiefen transportiert. Auf diese Strömungen wird nachfolgend noch eingegangen.

1.4 Schlussfolgerungen

1.4.1 Vergleich Kohlendioxid- und Temperaturanstieg in der Atmosphäre

Der CO_2 – Anstieg in der Atmosphäre ist eindeutig anthropogen bedingt auf Grund des Verbrauches fossiler Brennstoffe. **Bild 1.3** zeigt den weltweiten Energieverbrauch seit dem Jahre 1860. Die Energie wurde stets zu mehr als 85% durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe erzeugt. Vor dem Jahre 1850 ist der Energieverbrauch gegenüber dem heutigen Wert vernachlässigbar klein. Daher wird das Jahr 1850 als Beginn des industriellen Zeitalters definiert. Die globale Erwärmung wird folglich auf die Temperatur des Jahres 1850 bezogen. Der Energieverbrauch ist seit dieser Zeit kontinuierlich angestiegen. Kleine Einbrüche beim Anstieg gab es nur 1930 wegen der Weltwirtschaftskrise auf Grund des Börsencrash, 1945 wegen des 2. Weltkrieges, 1975 wegen der Ölkrise und 2008 wegen der Finanzkrise.

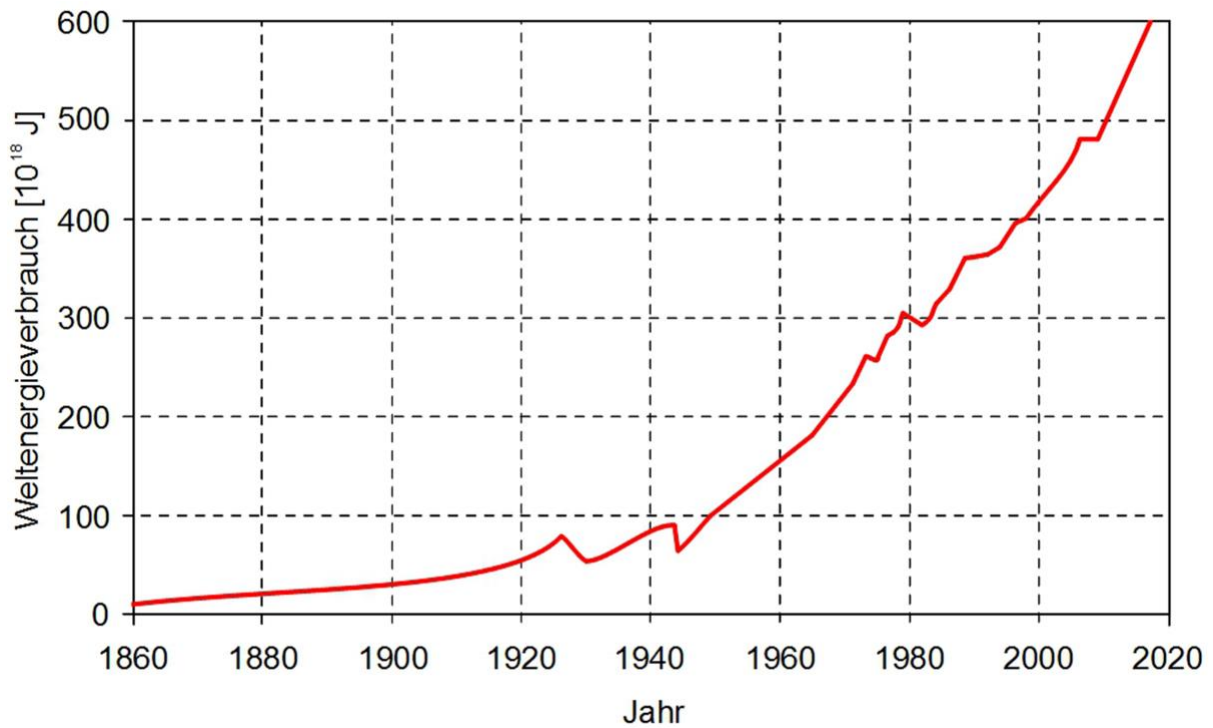


Bild 1.3: Weltenergieverbrauches seit 1860

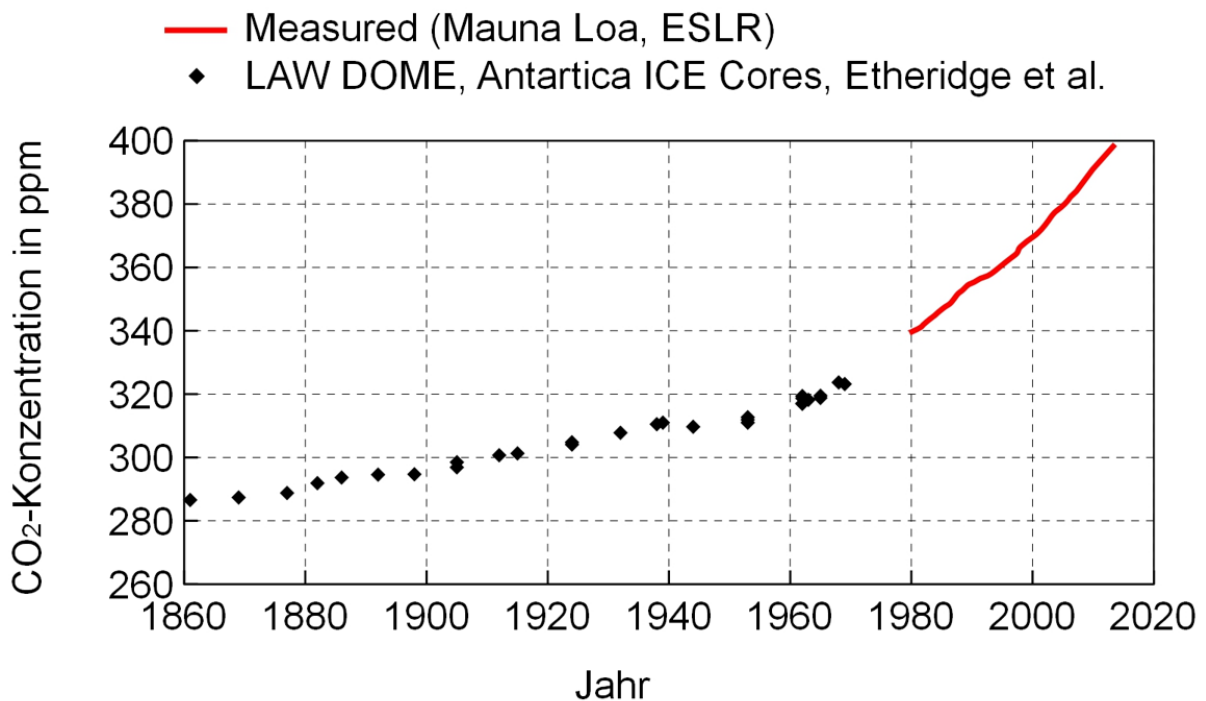


Bild 1.4: Anstieg der CO₂ – Konzentration in der Atmosphäre seit 1860

Im **Bild 1.4** ist der Anstieg der CO₂ – Konzentration in der Atmosphäre seit dem Jahre 1860 gezeigt, wiederum gemessen auf dem Vulkan Mauna Loa auf Hawaii. Der Anstieg folgt tendenziell dem Anstieg der Energie. Bis etwa 1950 ist der Anstieg jeweils moderat. Danach steigt er jedoch steil an.

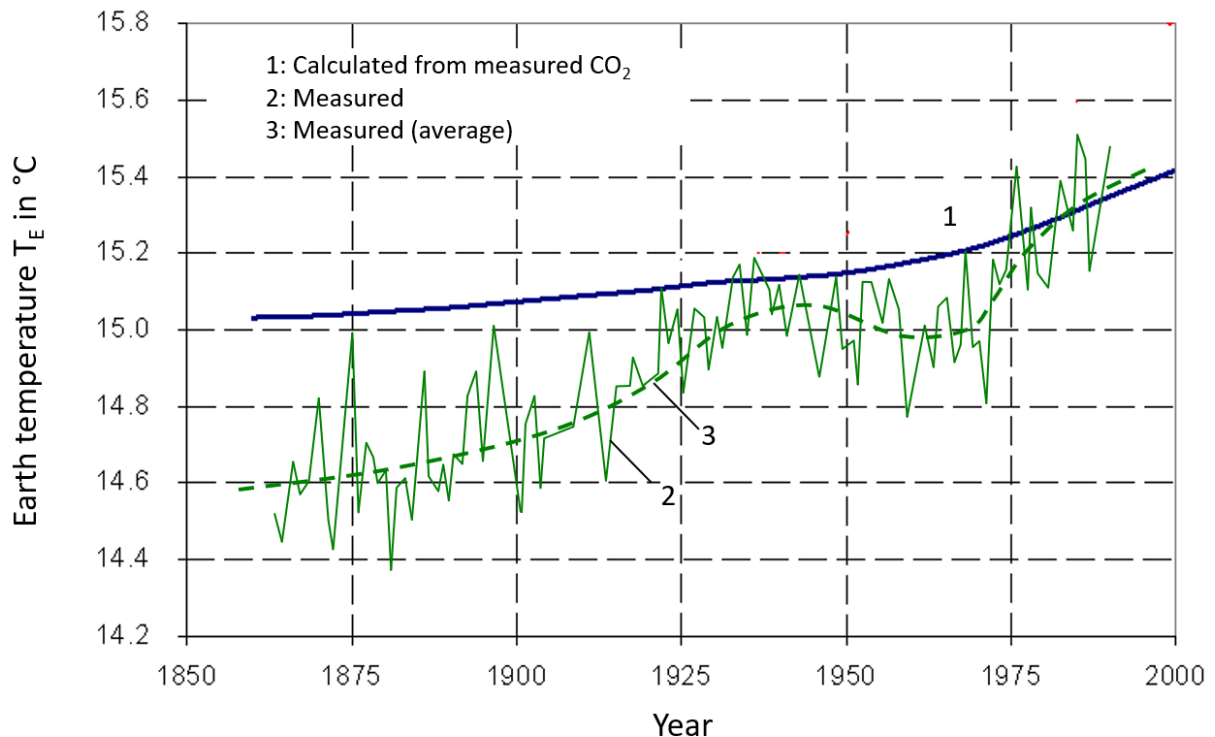


Bild 1.5: Verlauf der Temperatur der Erde seit 1860

Im **Bild 1.5** ist der Verlauf der mittleren Temperatur der Erde gezeigt. Diese ist seit dem Jahr 1860 bis zum Jahr 2000 etwa um 0,8 Kelvin (Grad) angestiegen. Allerdings folgt der Anstieg nicht dem Anstieg der CO_2 – Konzentration. Bis zum Jahre 1950 ist ein relativ starker Anstieg der Temperatur zu verzeichnen, obwohl der Anstieg der CO_2 – Konzentration relativ gering war. Ab dem Jahre 1950 bis zum Jahre 1970 nimmt die Temperatur sogar ab. Daher wurde 1970 vor einer neuen Eiszeit gewarnt. Dass der Verlauf der Temperatur nicht dem Verlauf der CO_2 – Konzentration folgt, ist ein Problem aller Welt – Klimamodelle.

Im Bild ist auch ein Temperaturverlauf eingezeichnet, der sich auf Grund eines nachfolgend erläuterten mathematischem Modells nur auf Basis des Anstiegs der CO_2 – Konzentration ergibt. Dieser Verlauf folgt dem Verlauf des Anstiegs des Kohlendioxids. Allerdings fällt der Temperaturanstieg geringer aus. Bei allen Klimamodellen kann der gemessene Temperaturanstieg nur dadurch erklärt werden, dass es auf Grund des CO_2 – Anstieges noch Nebeneffekte gibt, die den Temperaturanstieg verstärken. Solche Nebeneffekte sind eine erhöhte Wasserdampf–Konzentration der Atmosphäre sowie eine veränderte Wolkenbildung. Hierauf wird an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen. Die Erdtemperatur unterliegt zudem jährlichen Schwankungen von $\pm 0,2$ Kelvin (Grad). Diese Schwankungen können nicht eindeutig erklärt werden.

Seit dem Jahr 1860 bis zum Jahr 2000 ist demnach die Temperatur der Erde um 0,8 Kelvin (Grad) angestiegen. (Temperaturdifferenzen werden in der Einheit Kelvin angegeben, absolute Temperaturen werden dagegen in der Einheit Grad Celsius angegeben). Im selben Zeitraum ist die Kohlendioxid Konzentration in der Atmosphäre nach Bild 1.4 von 285 ppm auf 370ppm angestiegen. Unterstellt man, dass dieser Temperaturanstieg nur durch das Kohlendioxid hervorgerufen wurde und es keine weiteren natürlichen Einflüsse gibt, so bewirkt eine Erhöhung der Kohlendioxid Konzentration von $370 - 285 = 85$ ppm eine Temperaturerhöhung

von 0,8 Kelvin. Eine Temperaturerhöhung von 0,1 Kelvin wird folglich durch eine Erhöhung der CO₂ – Konzentration von ca. 10 ppm hervorgerufen.

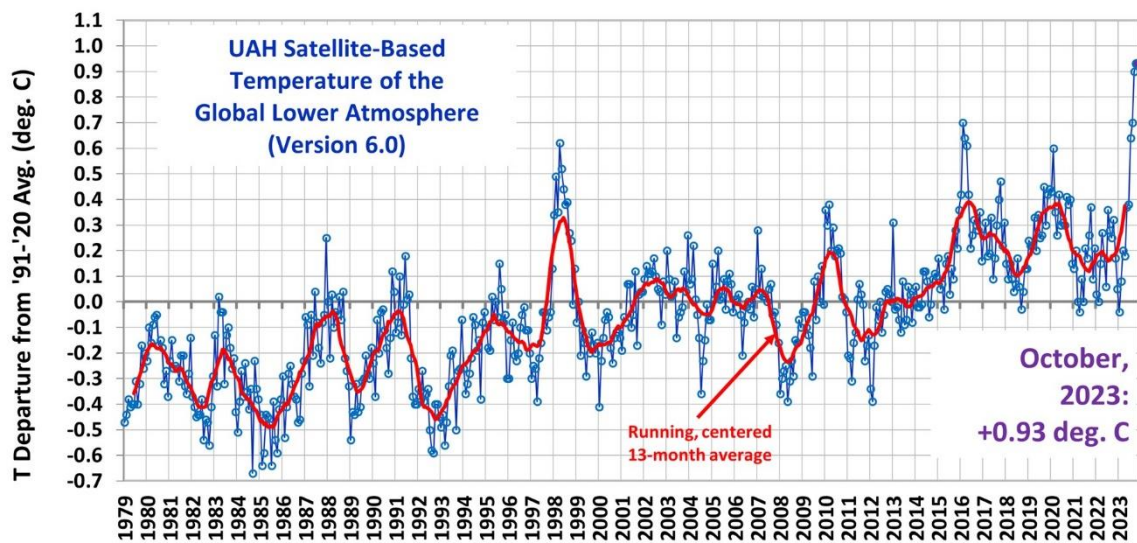


Bild 1.6: Temperaturverlauf der Atmosphäre seit 1979

Im **Bild 1.6** sind die Temperaturveränderungen seit 1979 im Vergleich zum langjährigen Mittel gezeigt. Der Temperaturverlauf ist wiederum großen Schwankungen unterlegen von $\pm 2,5$ K. Innerhalb dieser Schwankungen kann man davon ausgehen, dass die Temperatur etwa 15 Jahre lang bis 1994 ca. 0,25 Kelvin unterhalb des langjährigen Mittelwertes lag. Von 1995 bis 2015 schwankt die Temperatur um diesen Mittelwert. Danach ist die Temperatur wieder angestiegen und liegt etwa 0,3 K über dem Mittelwert. Das Jahr 2023 erscheint das bisher wärmste Jahr zu sein. Man kann also davon ausgehen, dass die Temperatur der Atmosphäre von 1979 an um 0,55 K angestiegen ist. Im gleichen Zeitraum ist nach Bild 1.1 die CO₂ – Konzentration von 340ppm auf 420ppm um 80ppm angestiegen. Für eine Temperaturerhöhung um 0,1 K war in diesem Zeitraum also ein Anstieg der CO₂ – Konzentration von 14,4 ppm maßgebend. In dem Zeitraum davor war für den Temperaturanstieg von 0,1 K nur 10 ppm notwendig.

Seit dem Beginn des industriellen Zeitalters ist die Temperatur bis zum Jahr 2000 nach Bild 1.5 um 0,8 angestiegen und danach entsprechend Bild 1.6 um etwa 0,3 K, also insgesamt um 1,1 K. Zur Einhaltung des 2 Grad Zieles kann die Temperatur folglich noch um 0,9 K ansteigen. Geht man davon aus, dass ein Anstieg der CO₂ – Konzentration von 10 bis 14,5 ppm einen Temperaturanstieg von 0,1 K bewirkt, wie zuvor beschrieben wurde, so kann noch ein Anstieg des CO₂ in der Atmosphäre von 90 bis 130 ppm zugelassen werden. Nimmt man an, dass entsprechend Bild 1.1 die CO₂ – Konzentration in der Atmosphäre weiterhin jährlich um 2,3 ppm steigt, so würde das 2 Grad Ziel in 39 bis 56 Jahren erreicht. Es bleibt noch genügend Zeit für Klimaschutzmaßnahmen. Ein plötzlicher Klimatod ist also nicht zu befürchten.

1.4.2 Technische CO₂ Abscheidung aus der Atmosphäre

Es wird öfters mal gefordert Verfahren zu entwickeln und großtechnisch anzuwenden, um Kohlendioxid aus der Atmosphäre heraus zu filtern. Dieses ist jedoch unsinnig. Solche Verfahren können nicht mit der riesigen Menge von 18 Gt/Jahr konkurrieren, die die Vegetation und die Weltmeere der Atmosphäre entziehen. Technische Verfahren können hierzu mit maximal homöopathischen Mengen beitragen. Viel sinnvoller wäre, den Aufwand hierzu zur CO₂ Vermeidung zu nutzen.

1.4.3 Falsches Urteil Bundesverfassungsgericht

Das Bundesverfassungsgericht hat im Beschluss vom 24.03.2021 das damalige Klimaschutzgesetz für verfassungswidrig erklärt auf Klage von Umweltschutzverbänden. Im Urteil steht wörtlich die Begründung:

Im Gegensatz zu anderen Treibhausgasen verlässt CO₂ die Erdatmosphäre in einem für die Menschheit relevanten Zeitraum nicht mehr auf natürliche Weise. Jede weitere in die Erdatmosphäre gelangende CO₂ – Menge erhöht also bleibend die CO₂ – Konzentration und führt entsprechend zu einem weiteren Temperaturanstieg.

Wie zuvor erläutert wurde, ist dieses jedoch falsch, da die Vegetation und die Weltmeere große Mengen an CO₂ absorbieren.

Das Urteil des Bundesverfassungsgerichtes beruht also auf einem physikalischen Fehler!

1.4.4 Alternatives Reduktionsziel von 50%

Das politische Ziel ist es, die CO₂ – Emissionen langfristig auf Null zu senken. In diesem Fall werden die Vegetation und die Weltmeere dieselbe Menge an CO₂ absorbieren wie bisher. Deren Absorption hängt nämlich nur von Partialdruck in der Atmosphäre ab und nicht von den anthropogenen Emissionen. Die Folge wird sein, dass der CO₂ Partialdruck in der Atmosphäre um jährlich 2,3 ppm absinkt. Dieses hat wiederum zur Konsequenz, dass es kälter wird und dass vor allem die Vegetation abnimmt. Beides wirkt sich negativ auf die Ernährung einer stark zunehmenden Weltbevölkerung aus.

Ein alternatives politisches Ziel könnte es daher sein, die CO₂ – Emission nur um 50% zu senken. Dann würde alles anthropogene CO₂ von der Vegetation und den Weltmeeren absorbiert. Es würde sich ein neues Gleichgewicht in der Atmosphäre von gegenwärtig 420 ppm einstellen. Der jetzige Status mit dem Klima würde erhalten bleiben. Mit dem jetzigen Status könnte man durchaus leben. Wenn also anstatt der 100% CO₂ – Reduktion nur eine 50% Reduktion erreicht würde, wäre dieses ein lohnenswertes Ziel und die Welt würde keinen Klimatod sterben