Die Ursache der globalen Temperaturerhöhung: * Die veränderte Erdoberfläche- nicht der Anstieg der Treibhausgaskonzentration

geschrieben von Admin | 4. Januar 2024

J. Langeheine

1.Einleitung

In den letzten 150 Jahren stieg die globale Mitteltemperatur nach Angaben des Hadley Centers um ca. 1,3°C (Abb. 1.0)

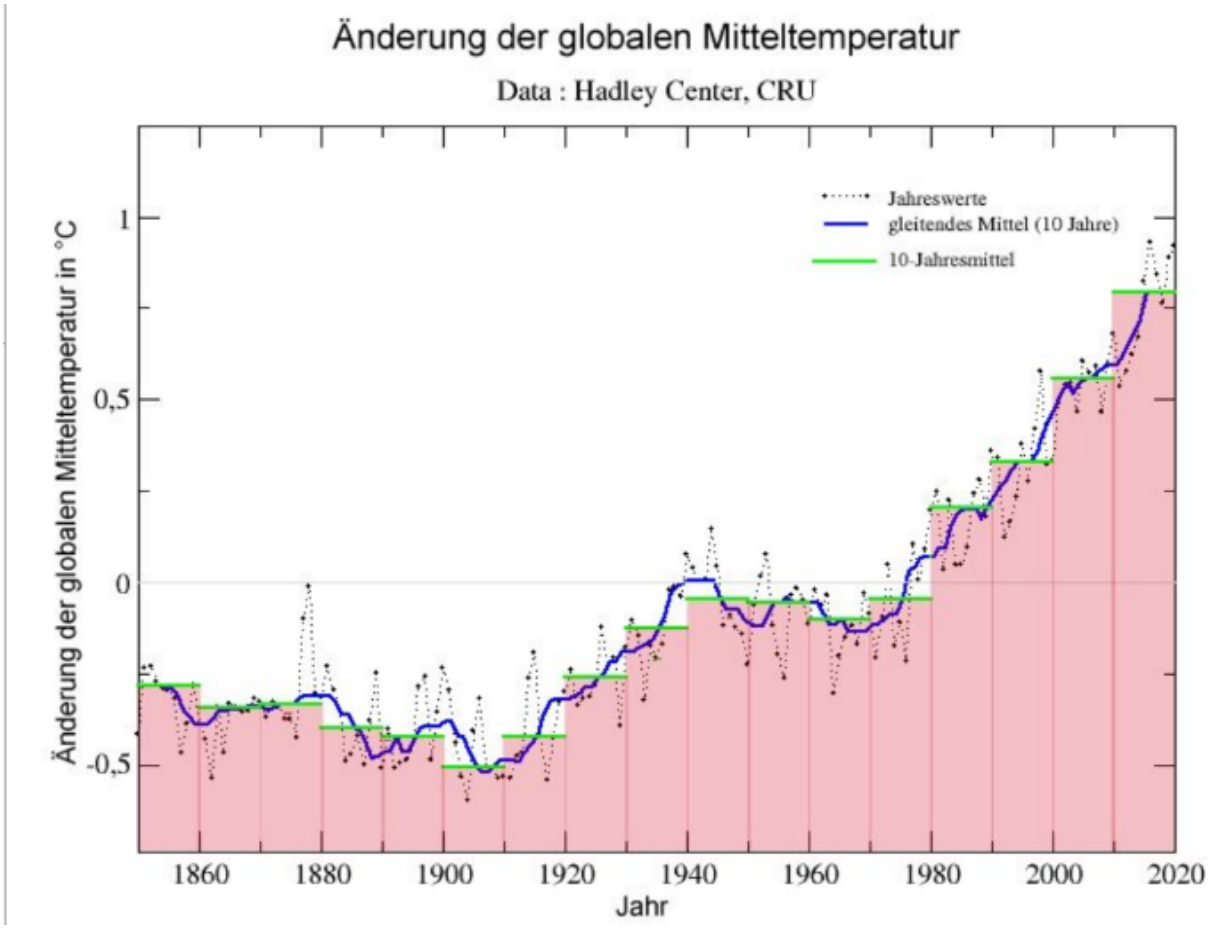

Abb. 1.0: Anstieg der globalen Mitteltemperatur seit 1850

Dabei werden bei der Darstellung der zeitlichen Änderung der globalen Mitteltemperatur aus Genauigkeitsgründen nur die Abweichungen angegeben. Die Festlegung auf Absolutwerte wird vermieden, da die Zahl, Qualität und Lage der Messstellen keine genauere Ermittlung erlauben. Trotzdem hat die NOAA die mittlere globale Durchschnittstemperatur im

Referenzzeitraum 1951-1980 mit einer Genauigkeit von +/- 0,5°C zu 14°C entsprechend 287K, angegeben. Damit liegt die heutige mittlere globale Temperatur bei 288K.

Parallel zur globalen Mitteltemperatur stieg die Kohlendioxidkonzentration von 310 ppm im Jahr 1955 auf 415 ppm im Jahr 2020. Abb.1.1)

---

*veröffentlicht in: Fusion, 44. Jahrgang /Heft 2 /2023

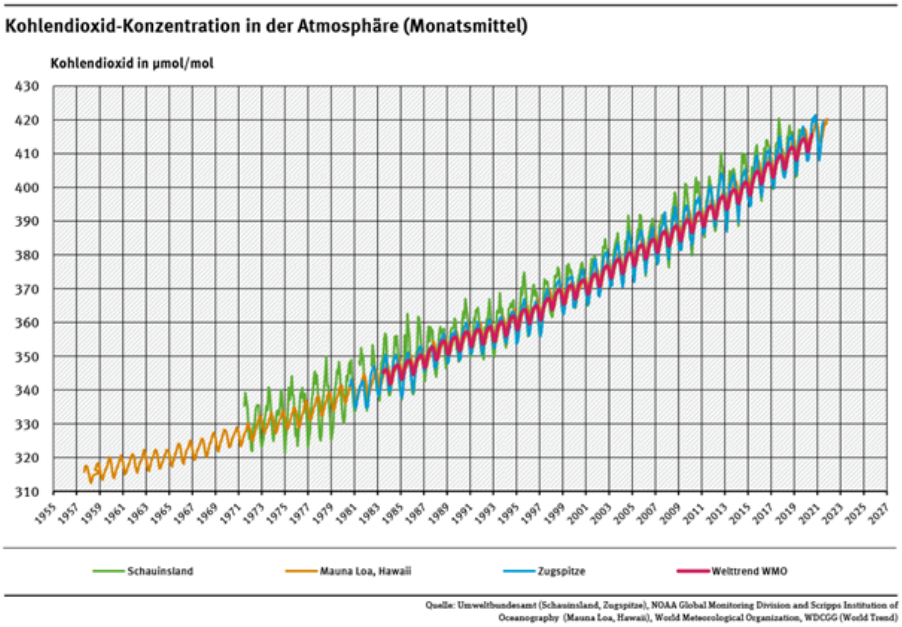

Abb.1.1: Zeitliche Veränderung des Kohlendioxidgehaltes der Atmosphäre seit 1955

Es liegt nahe, den Temperaturanstieg mit dem Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre zu korrelieren. Für diese Korrelation bestehen zwei Möglichkeiten der Interpretation von Ursache und Wirkung:

- Der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre ist die Ursache für die Temperaturerhöhung, oder:
- Eine durch andere Einflussgrößen verursachte Temperaturerhöhung hat den Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre zur Folge. Dieser ist dann nur eine Reaktion und als Regelgröße für Maßnahmen zur Einflussnahme auf das Klima völlig ungeeignet.

Während die erste mögliche Interpretation in den letzten Jahren zunehmend Eingang in die Politik gefunden hat und riesige finanzielle und forschungsbezogene Anstrengungen zur Verhinderung einer angeblichen Klimakatastrophe zur Folge hatte, blieb die zweite Möglichkeit der Interpretation bisher weitgehend unberücksichtigt.

Trotz aller Aufwendungen und trotz eines unfreiwilligen, beispiellosen

Modellversuchs zur Reduktion der durch menschliche Aktivitäten erzeugten Menge an Kohlendioxid während der weltweiten „lock-down“ Phasen im Rahmen der Corona- Infektionswellen, stieg und steigt der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre unbeirrt weiter, wie Abb.1.1 zeigt.

Zweifel an der Annahme, dass eine steigende Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre die Ursache für die steigende globale Temperatur ist, sind angezeigt. Die oben erwähnte Alternative einer Erhöhung der Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre als Folge der Erderwärmung erscheint wahrscheinlicher. Damit rückt eine gestiegene Energieaufnahme des Systems Erde als Erklärung für die Erderwärmung in den Vordergrund.

Abgesehen von einer geringen durch radioaktive und chemische Prozesse im Erdinneren erzeugten Menge bezieht die Erde ihre Energie von der Sonne. Diese liefert jährlich mit geringen Schwankungen eine vorwiegend im kurzwelligen Bereich erfolgte mittlere Strahlungsleistung von 1365 Watt/m² (Solarkonstante) auf eine der Sonne zugewandten, auf eine Kreisscheibe projizierten Erdoberfläche.

Die Erklärung klimatischer Änderungen im System Erde (Atmosphäre und Erdoberfläche) erfolgte bisher überwiegend über die Bilanz von Einstrahlung der Sonne und Abstrahlung der Erde. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Betrag von ca. 30% der auftreffenden Strahlungsleistung der Sonne ohne klimatische Wirkung reflektiert wird. Bei dieser Reflektion beträgt die Reduktion der Einstrahlung der Sonne ca. 409 Watt/m². Dieser, als Albedo bekannte Betrag, wird bei Betrachtungen von Klimaveränderungen allgemein als zeitlich konstant angenommen, was bei veränderten Verhältnissen in der Atmosphäre und am Erdboden nicht korrekt ist. Allein zwischen 1998 und 2017 sank der Wert für die Albedo um 0,5 Watt/m², wie P.R.Goode et al. (1) über Messungen des Erdscheins festgestellt haben.

Ausgehend von dieser fraglichen Annahme bleiben für das System Erde ca. 960 Watt/m², die auf eine 4-mal so große Fläche der Erdkugel verteilt werden, da die Kugel eine um den Faktor 4 größere Fläche als der Kreis mit dem gleichen Radius hat. Damit ergibt sich ein Wert von ca. 240 Watt/m² für die Einstrahlung, verteilt auf die Fläche der Erdkugel.

Stabile Verhältnisse im System Sonne Erde werden nur erreicht, wenn die Einstrahlung der Sonne der Abstrahlung der Erde entspricht. Die Stefan-Boltzmann- Gleichung ergibt für die Strahlungsleistung von 240 Watt/m² eine Temperatur des Strahlers von ca. 255 K an, die um ca. 33 K unter der über das Jahr gemittelten Temperatur der Erdoberfläche von 288K, entsprechend 15°C, liegt.

Zur Erklärung dieser Diskrepanz wird mit der Gegenstrahlung durch sog. „Treibhausgase“ in der Atmosphäre argumentiert, zu denen Kohlendioxid gehört, das als maßgeblicher Treiber angesehen wird. Diese Gegenstrahlung soll dann eine ausgeglichene Strahlungsbilanz auf der Erdoberfläche bewirken.

Dazu erklärte die Deutsche Physikalische Gesellschaft gemeinsam mit der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft 1987 in einem Aufruf:

„Der Gehalt an Kohlendioxid und Wasserdampf hat eine entscheidende Rückwirkung auf das Klima: Ohne diese Gase würde aufgrund der Strahlungsbilanz zwischen Einstrahlung von der Sonne und Abstrahlung von der Erde die mittlere Temperatur auf der Erde etwa -18°C betragen. Diese Gase absorbieren einen Teil der von der Erdoberfläche abgestrahlten Wärme und strahlen diese wieder teilweise zurück- Treibhauseffekt-, so dass die mittlere Temperatur gegenwärtig +15°C beträgt“

Hier wird die Temperaturdifferenz allein mit Strahlungs- und Absorptionsvorgängen erklärt, ohne zu berücksichtigen, dass in der Atmosphäre nicht nur die Strahlungsbilanz entscheidend für die Gleichgewichtstemperatur ist. *Die Summe aus thermischer Energie, Gravitationsenergie (potentieller Energie) und Strahlungsenergie ist eine Erhaltungsgröße im System Erdoberfläche und Atmosphäre!*

Als Folge dieser Betrachtungsweise rückt die Energieaufnahme des Systems Erde in den Vordergrund. Ändert sich die jährliche effektive solare Einstrahlung, der wirksame Energieeintrag, so ändern sich die klimatischen Verhältnisse auf der Erde so lange, bis sie einen neuen Gleichgewichtszustand erreicht haben.

2. Die Erde und ihre Atmosphäre

Die Erde ist der einzige Planet im Sonnensystem, an dessen Oberfläche Wasser in flüssiger Form bestehen kann und der ausreichend Masse hat, eine Atmosphäre festzuhalten, die thermodynamischen Gesetzen folgt und in der sich Wolken aus Wasserdampf bzw. Eiskristallen bilden können.

Vom Weltall betrachtet ist die Erdkugel ständig zu ungefähr 2/3 von Wolken umhüllt.

2.1 Die Erdoberfläche

Von 511 Millionen km² der Erdoberfläche sind ca. 365 Millionen km² von Ozeanen bedeckt. Der Rest sind Landmassen. Aktuell sind von der restlichen Fläche (ca.146 Millionen km²) ca.104 Millionen km² bewohnbares Land, 15 Millionen km² sind von Eis bedeckt, 27 Millionen km² bestehen aus Sand und Salzwüsten, Hochgebirge, Stränden und Dünen. Das bewohnbare Land wird zu 50% (ca. 51 Millionen km²) landwirtschaftlich genutzt, 39 Millionen km² sind Wälder, 12 Millionen km² von Sträuchern und Büschen bewachsen, 1,5 Millionen km² werden für menschliche Ansiedlungen genutzt, und weitere 1,5Millionen km² bedecken Süßwasser-Flüsse und -Seen. 40 Millionen km² des landwirtschaftlich genutzten Landes sind Wiesen, der Rest von 11 Millionen km² dient dem Getreideanbau. (2)

Zählt man alle Tropenwälder zusammen, also die tropischen Regen- und

Trockenwälder und die laubabwerfenden Monsunwälder, summiert sich der Tropenwald auf ca. 17,7 Millionen km². Allein ca. 10 Millionen km² bedeckt heute der tropische Regenwald. (3)

Abb. 2.1 zeigt die Nutzungsänderung der Landfläche der Erde zwischen 1750 und 1990 nach Ramakutty und Foley 1999 (4).

Vor Beginn der Industrialisierung, die für die Jahre nach 1750 angenommen wird, schätzt man das landwirtschaftlich genutzte oder beweidete Land auf ca. 9 Millionen km² der Erde. Der globale Waldbestand wird für 1750 zu 52 Millionen km², die Wüsten-, Salzflächen, Strände und Hochgebirge können als gleichbleibend bei 27 Millionen km² angenommen werden, sodass von ca. 42 Millionen Steppen und Strauchland ausgegangen werden kann. Auch die Eisflächen werden gleichbleibend auf ca. 15Millionen m² geschätzt.

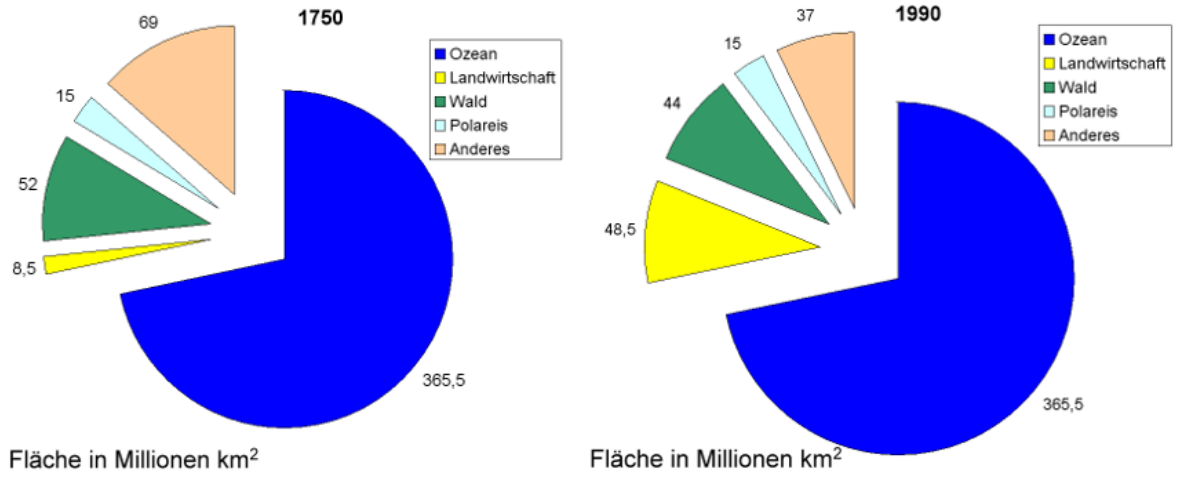

Abb.2.1 Nutzungsänderung der Landfläche der Erde zwischen 1750 und 1990 (4)

Bis 1990 dehnte sich die Fläche des Acker- und Weidelandes auf 48,5 Millionen km² aus. Die Ausdehnung erfolgte überwiegend zu Lasten des Steppen- und Strauchlandes sowie des tropischen Regenwaldes. Der Waldbestand ging um ca. 8 Millionen auf 44 Millionen km² zurück. Heute wird der Waldbestand mit ca. 40 Millionen km² angegeben. Von 1990 bis 2021 ist eine Fläche von ca. 2 Millionen km² Tropenwald gerodet worden, ca. 50 % der Abnahme des weltweiten Waldbestandes.

Land- und Wasserflächen sind auf der Erdkugel ungleichmäßig verteilt. Die Fläche der Nordhalbkugel setzt sich aus 39% Landfläche und 61 % Wasserfläche, die der Südhalbkugel aus 19% Landfläche und 81% Wasserfläche zusammen. Auch die Besiedelung der Erde mit ihren zivilisatorischen Veränderungen der Erdoberfläche ist zwischen Nordhalbkugel und Südhalbkugel sehr unterschiedlich.- Auf der Nordhalbkugel leben ca. 90 % der Erdbevölkerung von derzeit etw. 8 Milliarden Menschen.

Durch Besiedelung und der damit verbundenen Versiegelung der Erdoberfläche, (unter der man die luft- und wasserdichte Abdeckung des Bodens versteht), kommt eine zusätzliche Veränderung der Erdoberfläche hauptsächlich in der Nordhalbkugel hinzu. Die Versiegelung der Erdoberfläche hat heute weltweit bereits eine Fläche von ca. 250 Millionen ha oder 2,5 Millionen km² erreicht. Bis zum Jahr 2050 wird auf Grund des Bevölkerungswachstums mit einer Steigerung auf 4,2 Millionen km² gerechnet. (5)

Die aktuellen 2,5 Millionen km² versiegelte Fläche setzt sich u.a. aus ca. 1 Million km² Straßen und Wegen, ca. 1 Million km² Dachflächen und befestigten Außenflächen sowie Industrieanlagen zusammen.

Diese Zahlen zeigen, dass sich die Oberflächenbeschaffenheit der Erde seit 1750 deutlich verändert hat, besonders in der jüngsten Vergangenheit.

Wälder und Ackerflächen sowie versiegelte Flächen haben ein unterschiedliches Reflexionsvermögen für die Sonneneinstrahlung. Versiegelte Flächen sind zusätzlich vom natürlichen Wasserkreislauf (Verdunstung) ausgeschlossen.

2.2 Die Erdatmospäre

Die Erdatmosphäre besteht aus einem kompressiblen Gas, der Luft, welches sich im Wesentlichen aus 78 % Stickstoff, 21% Sauerstoff, 0,9% Argon und ca. 0,04% Kohlendioxid und Wasser in molekularer oder kondensierter Form zusammensetzt. Die Dichte ρ_0 der Luft hat an der Erdoberfläche einen Wert von 1,29 g/m³ und erzeugt mit ihrer über die Erde verteilten Masse von $5{,}14 \cdot 10^{18}$ kg einen Druck P_0 von 1013 hPa (1hPa = 100Pa, 1Pa=1 kg/m· sec^2) auf die Erdoberfläche. Zunehmende Höhe H, führt zu einer exponentiellen Abnahme des Luftdrucks, entsprechend der barometrischen Höhenformel:

$P_H = P_0 \bullet e^{-\rho o \bullet g \bullet H/Po}$ 2.1

Mit den angeführten Werten für die Dichte der Luft und den Druck, beides auf Meereshöhe gemessen, und g =9,81m/sec^2 der Erdbeschleunigung ergibt sich für den Druckabfall auf die Hälfte des Ausgangswertes die Halbwertshöhe H_M = 5550 m.

Damit liegen 50% der Luftmasse der Atmosphäre zwischen dem Meeresspiegel und der Höhe H_M. H_M kann auch als Höhenlage einer auf eine Ebene geschrumpften Masse der Atmosphäre interpretiert werden.

An der Troposphärengrenze, die im Mittel bei einer Höhe von 11000m liegt, ist der Luftdruck bereits auf ca.25% des Ursprungswertes abgefallen.

Die barometrische Höhenformel beschreibt das Verhalten eines Gases unter dem Einfluss der Erdanziehung, wenn die Temperatur als konstant

angenommen wird.

Die Temperatur in der Troposphäre verändert sich jedoch mit wachsender Entfernung von der Erdoberfläche. Sie fällt von einer über das Jahr gemittelten Temperatur von ca. 288K, entsprechend 15°C auf ca. 220K, entsprechend – 53 °C am Beginn der Tropopause, die an der Troposphärengrenze beginnt. Danach bleibt die Temperatur in der Tropopause über mehrere Kilometer Höhenanstieg weitgehend konstant.

2.2.1 Thermodynamik der Erdatmosphäre

Aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik lässt sich die adiabatische Druck- und Temperaturabhängigkeit eines Gases ableiten (6).

$T_0 / T_T = (P_0 / P_T)^{(1-1/\kappa)}$ 2.2

Dabei stellt κ den Adiabatenexponenten $\kappa = c_p/c_V$ dar, dem Quotienten aus der spezifischen Wärme des Gases bei konstantem Druck c_p und konstantem Volumen c_V.

Bei adiabatischen Prozessen ist die Summe aus thermischer und potentieller Energie eine Erhaltungsgröße und führt mit Hilfe der barometrischen Höhenformel zu der Gleichung

$T_0 / T_T = e^{\rho_0 \cdot g \cdot H_T \cdot (\kappa-1)/(P_0 \cdot \kappa)}$ 2.3

Verschoben in die Höhenlage einer auf eine Ebene geschrumpfte Masse der Atmosphäre lässt sich diese Gleichung in der Form

$T_H = T_M \cdot e^{\rho_0 \cdot g \cdot (H_M - H) \cdot (\kappa-1)/(P_0 \cdot \kappa)}$ 2.4

schreiben. Dabei ist T_M die Temperatur der auf eine Ebene geschrumpften Masse der Atmosphäre

Mit dem Adiabatenexponenten κ = 1,4 wird ein ideales Gas (wie trockene Luft) beschrieben. Bei feuchter Luft kommt es beim Aufsteigen und Abkühlen zur Kondensation. Durch die freiwerdende Kondensationswärme wird der Exponent niedriger. Das Verhalten der Atmosphäre wird am besten durch einen Adiabatenexponenten von 1,23 angenähert.

Für die Halbwertshöhe des Luftdrucks H_M = 5550 m, ergibt sich aus Gleichung 1.4 mit den im vorhergehenden Kapitel 1.1 genannten Werten für die Dichte der Luft (ρ_0 = 1,29 kg / m³), dem Luftdruck auf Meereshöhe (P_0 = 1013 hPa) sowie der Erdbeschleunigung (g=9,81 m / sec^2) für T_0 / T_M = 1,14. Wird für T_0 = 288K eingesetzt, die mittlere Temperatur der Erdoberfläche, so ergibt sich eine Temperatur von T_M = 252,6K für die Luftschicht in der Höhe H_M =5550m. In der auf eine Ebene geschrumpfte Masse der Atmosphäre herrscht damit eine Temperatur von ca. 253K.

Ein Gedankenexperiment verdeutlicht diesen Prozess:

Bei einer Erdkugel, deren Atmosphäre durch andere als die Gravitationskräfte festgehalten wird, hat die Luftschicht eine von der Höhe unabhängige Dichte. Sie ist überall gleich und soll überall die gleiche Temperatur von T_M = 253K, die Temperatur der Halbwertshöhe H_M haben.

Wird die Gravitation „dazu geschaltet“, so erfolgt durch die Schwerkraft eine Dichte- und Druckzunahme in Richtung Erdmittelpunkt und eine Dichte- und Druckabnahme in Richtung der oberen Grenze der Atmosphäre.

Dieser Vorgang entspricht einer adiabatischen Expansion nach oben und einer adiabatischen Kompression nach unten. Es kommt in Richtung der Erdoberfläche zur Erwärmung von 253K auf 288K und in entgegengesetzter Richtung zur Abkühlung von 253K auf 222K bei einer Höhe von 11100m.

Durch die adiabatische Kompression unter dem Einfluss der Schwerkraft erhöht sich die Temperatur der Luft an der Erdoberfläche von 253K auf 288K. Die Temperatur an der Troposphärengrenze reduziert sich auf 222K.

Es ist also keine Gegenstrahlung erforderlich, um die Temperaturdifferenz zwischen der Strahlungsgleichgewichtstemperatur und gemessenen gemittelten Temperatur der Erdoberfläche zu erklären.

3. Die Energiequelle der Erde – die Sonne

Abgesehen von einer geringen, durch radioaktive und chemische Prozesse im Erdinneren erzeugten Menge, bezieht die Erde ihre Energie von der Sonne.

Mit großer Näherung folgt die Strahlungsleistung der Sonne dem Planck‘schen Strahlungsgesetz.

$R(\lambda,T) = (2\pi c^2 h)/\lambda^5 \cdot 1/(e^{(hc/\lambda kT)} - 1)$ 3.1

R (λ, T) beschreibt die spektrale Strahlungsleistung in (Watt/m^2·µm). Dabei ist h das Planck‘sche Wirkungsquantum, ($h = 6{,}62606896 \cdot 10^{-34}$ J·sec), c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, ($c = 2{,}9979246 \cdot 10^8$m/sec), k die Boltzmann Konstante, ($k = 1{,}3806504 \cdot 10^{-23}$ J/K) und λ die Wellenlänge der Strahlung, angegeben in µm. T ist die Temperatur des Strahlers in K (°K) (0°C = 273K).

Die Integration der spektralen Strahlungsdichte über alle Wellenlängen der ausgesandten Strahlung liefert die Strahlungsflussdichte und das Gesetz von Stefan und Boltzmann:

$S(T) = \sigma \cdot T^4$ 3.2

Die Strahlungsflussdichte S(T) steigt mit der vierten Potenz der Temperatur eines Strahlers. σ ist die Stefan- Boltzmann-Konstante:

$\sigma = 2\pi^5 k^4/15\, h^3 c^2 = 5{,}670 \cdot 10^{-8}$ Watt/$m^2 \cdot K^4$ 3.3

Mit T= 5778K, der Oberflächentemperatur der Sonne, ergibt sich daraus die Strahlungsflussdichte der Sonne an der Sonnenoberfläche zu 63.000 kWatt/m^2.

Die Strahlungsflussdichte verringert sich quadratisch mit der Entfernung von der Quelle. Damit ergibt sich mit dem Wert für den Radius der Sonne ($6{,}95 \cdot 10^5$ km) und der Entfernung der Erde von der Sonne (gemittelt $1{,}496 \cdot 10^8$ km) die Strahlungsflussdichte am Ort der Erde im Weltall, die Solarkonstante, zu:

$S_E = (R_S / R_{ES})^2 \cdot P_S = 1365 W/m^2$ 3.4

Abb.3.0 zeigt die Wellenlängenabhängigkeit der spektralen Strahlungsdichte für die auf eine Kreisscheibe projizierte Erde.

Abb. 3.0 Spektrale Strahlungsdichte der Erdscheibe

Im ultravioletten Bereich der Sonnenstrahlung (0,1-0,4 µm) beträgt die Strahlungsflussdichte ca. 108 Watt/m^2, bei der die UVA-Strahlung (0,3-0,4µm) mit 84 Watt/m^2 überwiegt. Im Bereich des sichtbaren Lichtes (0,4-0,76 µm) erreichen ca. 610 Watt/m^2 den oberen Rand der Erdatmosphäre, im infraroten Bereich, ab 0,76 µm werden 648 Watt/m^2 eingestrahlt. Die wesentliche Einstrahlung erfolgt auch hier im Wellenlängenbereich zwischen 0,3 und 2,5 µm.

3.1 Die Durchlässigkeit der Erdatmosphäre

Beim Durchgang unterliegt die von der Sonne ausgehende Strahlung dem Einfluss der Atmosphäre. Die in der Atmosphäre befindlichen Moleküle streuen, absorbieren oder reflektieren die Strahlung. Bei der Absorption wird Strahlungsenergie auf das absorbierende Molekül übertragen. Bei der Streuung erfolgt eine Richtungsänderung der Strahlung, verbunden mit einem teilweisen Energieübertrag auf das streuende Teilchen.

In der folgenden Abb. 3.1.0 ist die Durchlässigkeit als Funktion der eingestrahlten Wellenlänge im Wellenlängenbereich 0,5 bis 2,5µm für eine klare Atmosphäre bei senkrechtem Lichteinfall dargestellt. Erkennbar sind Wellenlängenbereiche mit hoher Transmission, sog. atmosphärische Fenster. Die maßgeblichen Fenster für die wesentliche solare Einstrahlung im Wellenlängenbereich 0,3-2,5µm liegen zwischen 0,3-1,3µm, 1,6-1,9µm und 2- 2,5 µm.

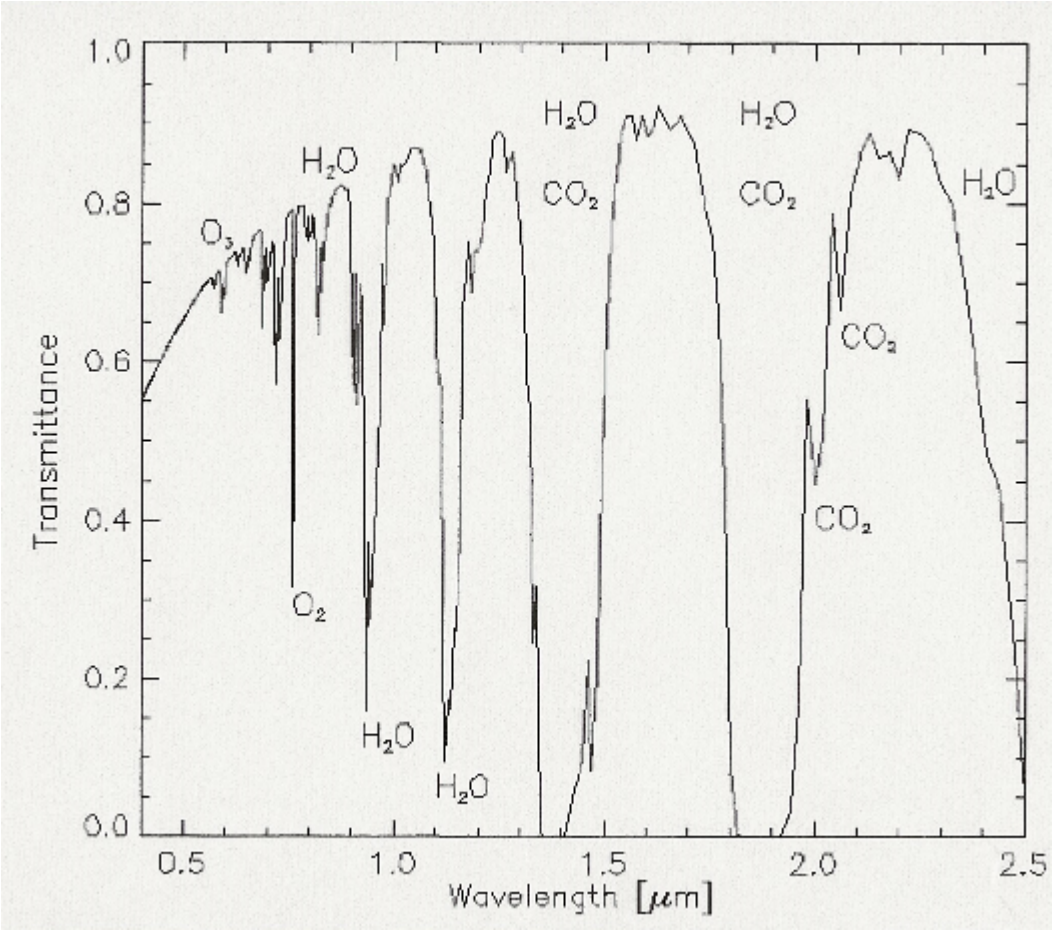

Abb. 3.1.0 Wellenlängenabhängigkeit der Transmission einer klaren, sauberen Atmosphäre für den senkrechten Strahlungseinfall im Wellenlängenbereich 0,5 bis 2,5 µm und Kennzeichnung der absorbierenden bzw. streuenden Moleküle (7)

Durch die Absorption gehen im visuellen Bereich des Strahlungsspektrums (Wellenlängenbereich zwischen 0,4-0,76 µm) ca.120 Watt/m²der einfallenden Strahlung verloren. Der Verlust im Wellenlangenbereich von 0,76 bis 2,5µm beträgt ca. 160Watt/m², sodass sich der Gesamtverlust durch Absorption und Streuung an Gasmolekülen auf ca. 22% summiert.

3.2. Die Reflektion der Erdoberfläche

Wie Abb.3.2 zeigt, besteht ein beträchtlicher Unterschied in der Reflektivität verschiedener Erdoberflächen in Abhängigkeit von der Wellenlänge der auftreffenden Strahlung(8).

Abb.3.2. Reflektivität verschiedener Oberflächen (8)

Im sichtbaren Bereich der solaren Einstrahlung liegt die Reflektivität der Erdoberfläche unter 20%, nur die Sandwüste erreicht Werte bis zu 30%. Deutlich unterscheidet sich die Reflektivität einer grünen Vegetation, die vor allem im nahen Infrarotbereich bei ca. 70% liegt, von derjenigen einer trockenen Vegetation oder eines Straßenpflasters mit einer Reflektivität von ca. 25%. Dabei wurde als Straßenpflaster

keine Asphaltschicht angenommen, für die die Reflektivität mit derjenigen des Wassers vergleichbar ist, die im Wellenlängenbereich 0,4 bis 2,5 µm weitgehend konstant bei 12% liegt.

Die hohe Reflektivität des Schnees, die etwa der der Wolke aus reinem Wasserdampf entspricht, spielt nur eine geringe Rolle, da vornehmlich die Polregionen mit ihrem flachen Strahleneinfall mit Schnee und Eis bedeckt sind.

Für die Reflektivität einer Bewölkung, die zu 50% aus Eiskristallen und 50% aus kleinen Wassertropfen besteht, kann im Mittel ein Wert von 50% angenommen werden.

Für das Jahr 1986 gibt die ISCCP einen Wert von 27% für die gemittelte Reflektivität der Landflächen der Erde sowie eine gemittelte Reflektivität von 12% für die Ozeane an. Für die Gesamtreflektivität der Erdoberfläche ergibt sich daraus für 1986 ein Wert von 16% (9).

Ausgehend von diesen Werten und dem um ca. 8 Millionen km² höheren Waldanteil im Jahr 1750 kann für das Jahr 1750 mit einer Reflektivität der Landflächen von ca. 30% gerechnet werden. Die Gesamtreflektivität der Erdoberfläche könnte im Jahr 1750 bei 17,5% gelegen haben.

Durch Umgestaltung der Erdoberfläche von 1750 bis 1990 sank ihre Reflektivität gegenüber 1750 um 1,5 %. Seit 1990 sind weitere 4 Millionen km² Wald gerodet worden, davon allein 2 Millionen km² tropischen Regenwaldes, wodurch sich die Reflektion der Landfläche auf ca. 26 % reduziert hat. Falls diese Entwicklung ungebremst weitergeht und die Versiegelung der Erdoberfläche, die für 2050 hochgerechneten 4 Millionen km² erreicht, kann für das Jahr 2050 mit einer Gesamtreflektivität der Erdoberfläche von 15% gerechnet werden.

4. Wolkenbildung

Wolken entstehen durch Abkühlung feuchter Luft, wenn diese unter die Temperatur des Taupunktes sinkt und wenn eine ausreichende Menge an Kondensationskeimen vorhanden ist. Ohne Kondensationskeime kann die relative Feuchte, die am Taupunkt 100% beträgt, bis zu 800% steigen, ohne dass Kondensation einsetzt. Kosmische Strahlung und Aerosole verschiedenster Art wirken als Kondensationskeime, wie Abb. 5.1 verdeutlicht, in der die Wolkenfahnen zu erkennen sind, die sich durch die schwefelhaltigen Abgase der Transportschiffe gebildet haben.

Die kosmische Strahlung ist überwiegend bei der Bildung hoher Wolken beteiligt.

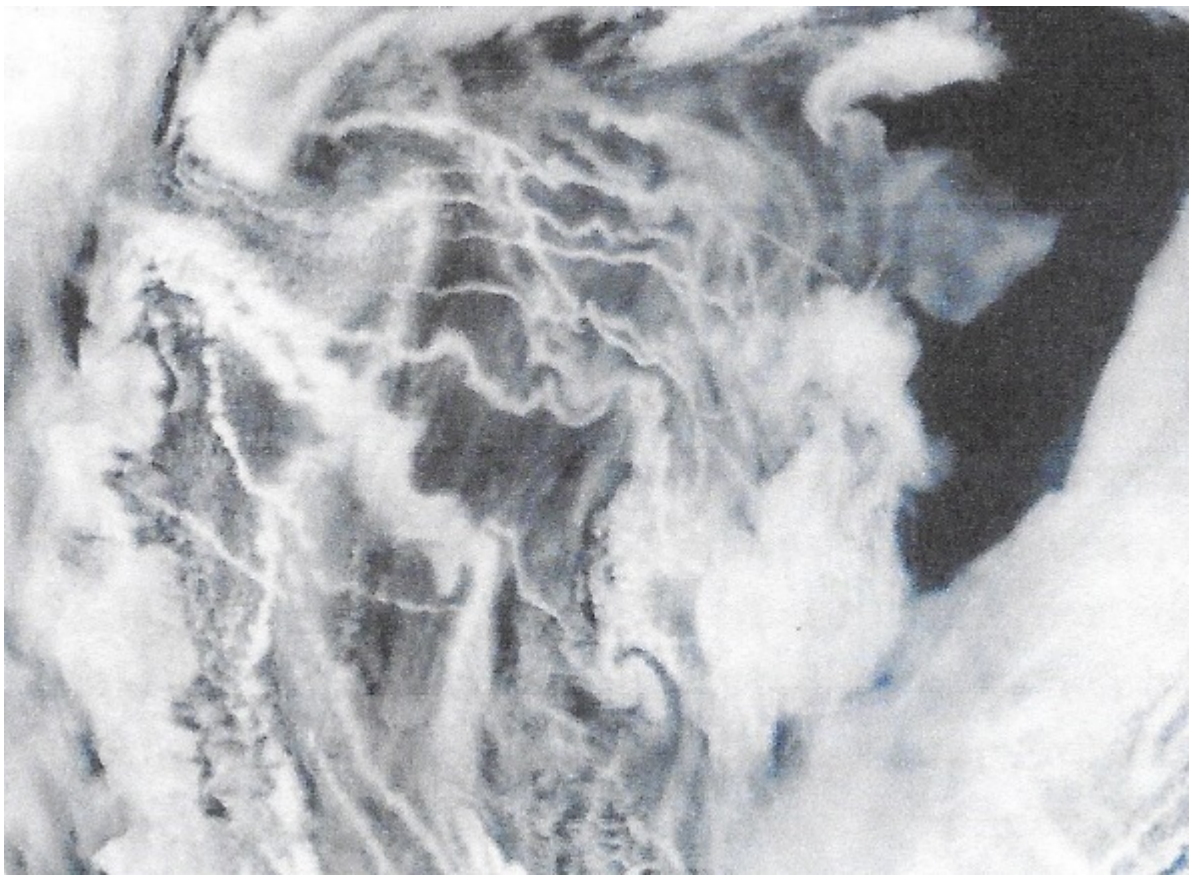

Abb. 4.0 Wolkenbildung aus Abgasfahnen von Schiffen (NASA)

Die genaue Abschätzung der weltweiten Wolkenbedeckung ist schwierig, da sie nicht nur jahreszeitlich, sondern auch über größere Zeiträume nicht konstant ist.

In der Literatur angegebene Bedeckungsgrade schwanken zwischen 60 und 70%. Jonas (9) geht von einer weltweiten Wolkenbedeckung aus, die von ca. 68% im Jahr 1983 auf 64 % im Jahr 2016 sank.

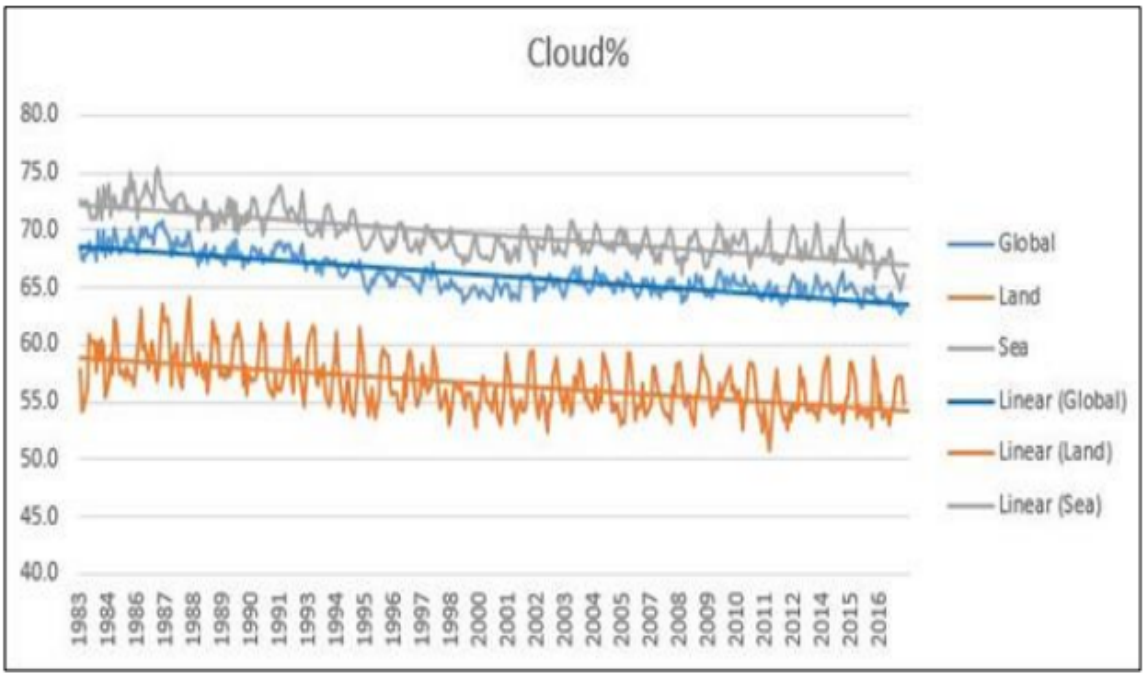

Abb.4.1 Wolkenbedeckung zwischen 1983 und 2016

Wolken erscheinen in den verschiedensten Formen. Die internationale Wolkenklassifikation teilt sie in 9 Wolkengattungen und in Abhängigkeit von der Höhenlage in der Troposphäre in drei Kategorien ein, hohe, mittlere und tiefe Wolken, wie die folgende Abb.5.3 zeigt. (MB = 1hPa)

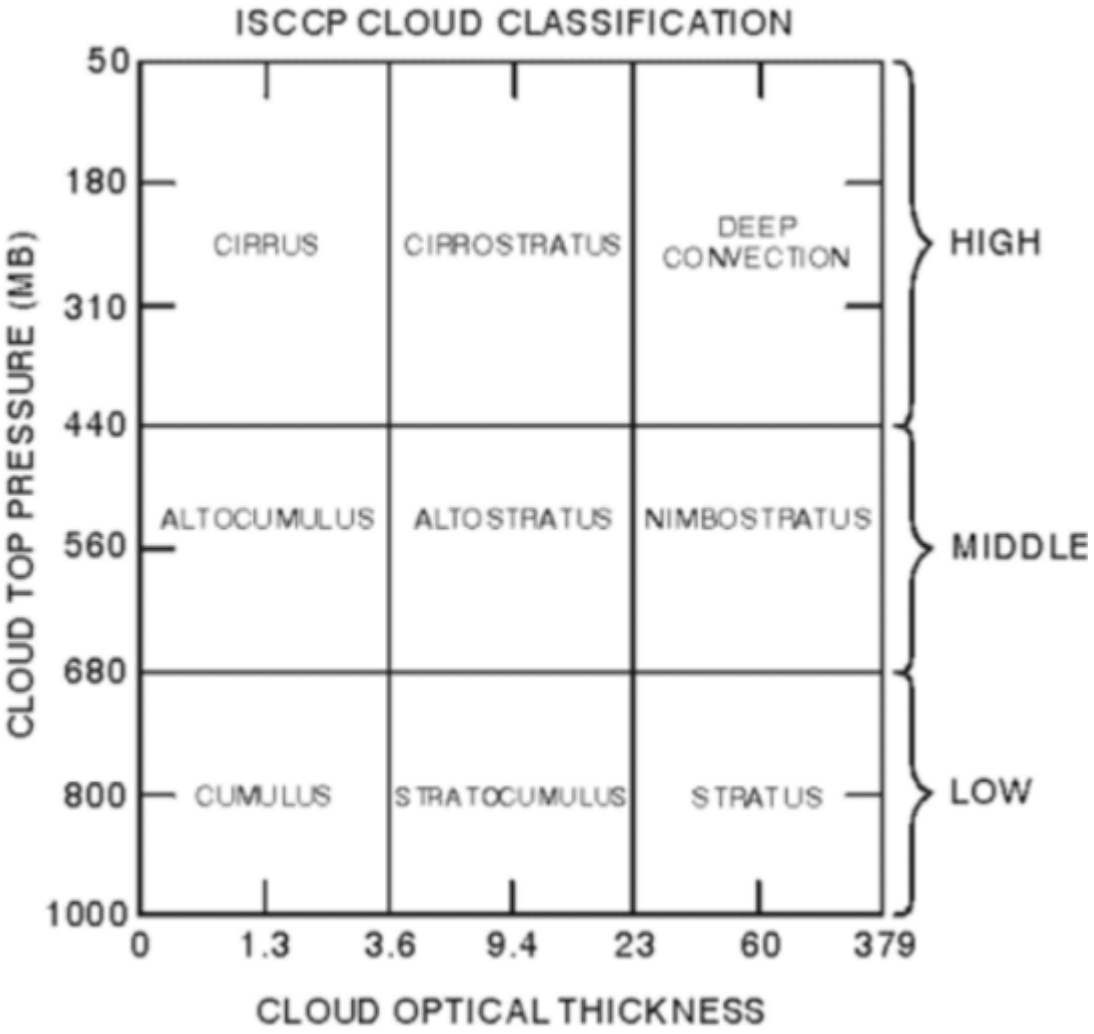

Abb. 4.2. Einteilung der Wolkentypen nach ISCCP (10)

Hohe Wolken befinden sich oberhalb von 7 km Höhe und sind meist dünne, weißliche Gebilde aus Eiskristallen. Mittelhohe Wolken liegen zwischen 2 und 7 km Höhe. Sie bilden oft eine einförmige graue Schicht und bestehen aus Eiskristallen und kleinen Wassertropfen. Tiefe Wolken erstrecken sich zwischen der Erdoberfläche und etwa 2 km Höhe. Sie bestehen ausschließlich aus Wassertropfen. Auf Grund der geringen Reflektivität der Eiskristalle wird die kurzwellige Einstrahlung der Sonne im Wesentlichen an den Wassertropfen der mittleren und tiefen Wolken reflektiert.

Eine prozentuale Zusammenstellung der Wolkentypen und ihrer jeweiligen Zusammensetzung aus Eiskristallen und Wassertropfen ist der Tab. 4.1 zu entnehmen (10)

Tab. 4.1. Prozentualer Anteil und Zusammensetzung der Bewölkung (1986-1993)

Für die gesamte Bewölkung kann davon ausgegangen werden, dass sie sich

zu 50% aus Eiskristallen und 50% aus Wassertropfen zusammensetzt.

Eine Vorstellung vom Einfluss der Wolken auf die Einstrahlung an der Erdoberfläche liefert der Strahlungsfluss an Gewittertagen. Bei voller Sonneneinstrahlung kommen über 1000 Watt/m² an der Erdoberfläche an, ziehen dicke Gewitterwolken auf, sinkt der Strahlungsfluss leicht auf 50 Watt/m² und weniger. Bei Dämmerung und wolkenlosem Himmel und einem Sonnenstand knapp unter dem Horizont liegt die Einstrahlung unter 0,1 Watt/m².

Während sich die Wolkenbedeckung zwischen 1983 und 2016 verringert hat, nahm die Durchlässigkeit der Wolken, gemessen über die Opazität von 53% auf 57% ab, wie Abb.4.3. zeigt (9).

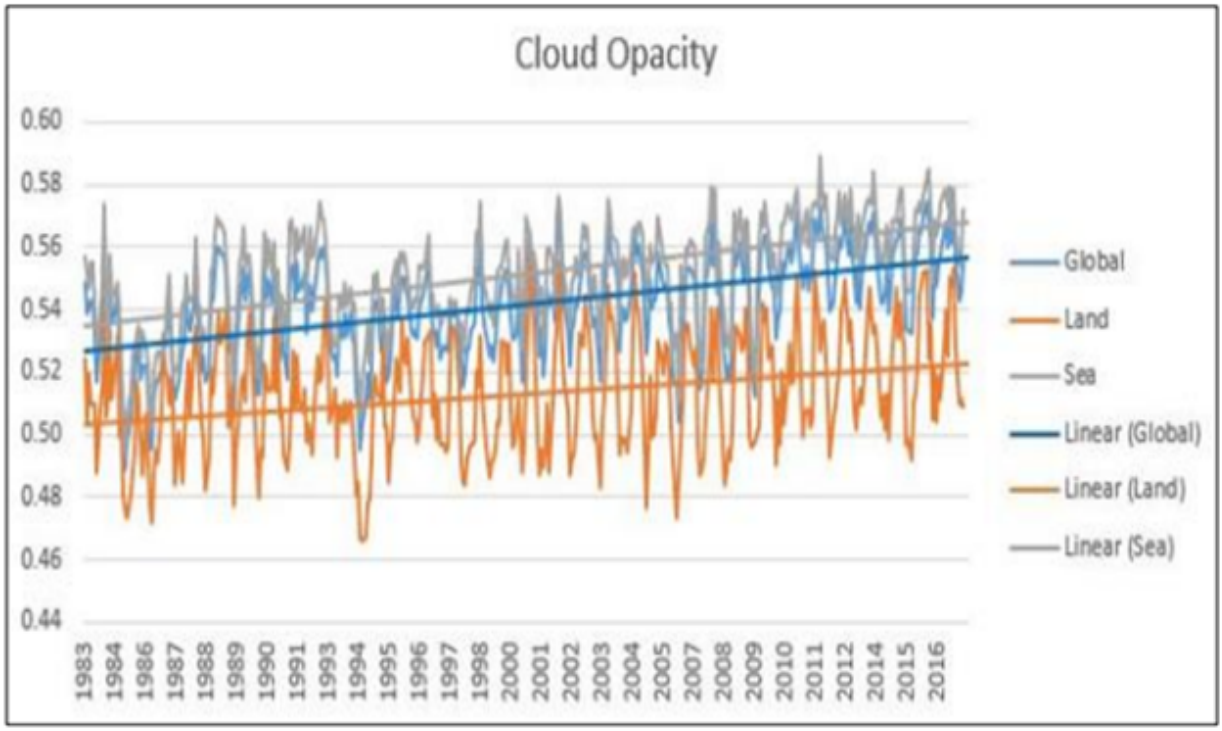

Abb. 4.3. Veränderung der Opazität der Wolkenbedeckung zwischen 1983 und 2016

Weltweit wurde 1983 durch die Wolkenbedeckung 53% der einfallenden Strahlung reflektiert und absorbiert. Dieser Wert stieg bis 2016 auf 57%.

Einfallende Strahlung wird an der Wolkenoberfläche teilweise durch direkte bzw. mehrfache Reflektion an den Wassertropfen der Wolke zurückgeworfen, ein geringer Anteil wird absorbiert. Der Rest geht als diffuse Strahlung durch die Wolke hindurch.

4.1 Der wolkenbildende Einfluss der Aerosole

Die wesentlichen Aerosole sind Meersalz, Mineralstaub, biologische Teilchen, Ruß und Sulfat. Mineralstaub wird durch den Wind aufgewirbelt,

sodass besonders in Wüstengebieten hohe Konzentrationen gemessen werden, Meersalz gelangt durch verdunstendes Sprühwasser in die Atmosphäre. Da die überwiegende Landfläche der Erde mit Lebewesen und Pflanzen bedeckt ist, gelangen Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Sporen) und abgeriebene zelluläre Teilchen in die Luft. Die Quellstärke der globalen Landfläche liegt in gleicher Größenordnung wie die der Wüsten und der Ozeane. Während die Aerosole aus Meersalz, Mineralstaub und biologischen Teilchen kaum durch menschliche Aktivitäten beeinflusst werden, sieht es bei Ruß und Sulfataerosolen anders aus.

Ruß ist ein Verbrennungsprodukt und stammt aus menschlichen und natürlichen Quellen. Sulfataerosole entstehen in der Atmosphäre durch die Reaktion von bei der Verbrennung freiwerdendem Schwefeldioxid (SO_2) mit anderen Stoffen. Ruß und Schwefeldioxid werden aus natürlichen Quellen, wie z.B. Waldbränden und Vulkanausbrüchen, im Wesentlichen jedoch bei industriellen Prozessen oder Verbrennung zur Wärmeerzeugung frei. Diese Quellen sind also zum einen Teil natürlichen und zum anderen Teil menschlichen Ursprungs.

Zusätzlich zu den Aerosolen, die sich auch in vorindustriellen Zeiten, wenngleich zu geringeren Konzentrationen, in der Atmosphäre befanden, beeinflussen heute feine Rußteilchen und Sulfataerosole die Wolkenbildung. Sie wirken als Kondensationskeime und führen über die Anlagerung von Wasser zur Bildung von Wolkentröpfchen. Die hydrophile Eigenschaft der Sulfataerosole führt bereits bei üblicher Luftfeuchte von 60-70% zur Kondensation, während hydrophobe Partikel wie Ruß erst bei einer Luftfeuchte über 100% als Kondensationskeime wirken.

Aus Abb. 4,4 ist ein steiler Anstieg der Schwefeldioxidemission von 1950 bis 1975 zu erkennen, der zeitlich übereinstimmt mit dem in Abb.1.1 dargestellten Temperaturplateau und auf eine verstärkte Wolkenbildung hinweist. Die von Jonas beschriebene Veränderung der Wolkenbedeckung kann auf die seit 1980 wirkende Reduktion des weltweiten Schwefeldioxidausstoßes auf Grund des entsprechenden „clean air acts“ von 1956 zurückgeführt werden, s. Abb. 5.6.

Abb.4.4 Emission von Schwefeldioxid seit 1850

5. Die effektive solare Einstrahlung und Oberflächentemperatur der Erde

Die Abschätzung der Rückstrahlung von der Erde und ihrer Atmosphäre ohne klimatische Wirkung im System Erde/ Atmosphäre geschieht, indem folgender Strahlungsfluss berücksichtigt wird:

Der von der Sonne kommende Strahlungsfluss wird durch Absorption in der Atmosphäre bis zum Auftreffen auf die Wolkenschicht geschwächt und danach teilweise direkt oder nach einer Mehrfachreflektion als diffuse Strahlung in den Weltraum reflektiert (S_1).

Der nicht in Richtung Weltraum reflektierte Teil geht über Mehrfachreflektion und Absorption durch die Wolke hindurch und trifft nach weiterer Schwächung durch Absorption in der Luftschicht, verstärkt durch den nicht durch die Wolken geschwächten Anteil des Strahlungsflusses, auf die Erdoberfläche, von der er dann entsprechend der Reflektivität der Erdoberfläche teilweise reflektiert wird.

Der reflektierte, von der Erdoberfläche kommende Strahlungsfluss trifft nach Schwächung durch Absorption in der Atmosphäre auf die Unterseite der Wolken und wird dort wieder teilweise reflektiert. Der nicht reflektierte Strahlungsfluss durchdringt diese, geschwächt durch die Absorption in der Wolke, und erreicht wieder verstärkt durch den nicht von den Wolken geschwächten reflektierten Strahlungsfluss, mit den Absorptionsverlusten der Atmosphäre den Weltraum als Beitrag (S_2) zur Gesamtreflektion der Erde.

Der geringe, von der Unterseite der Wolken zurückgestrahlte Anteil des Strahlungsflusses wird nach Schwächung durch die Atmosphäre wieder von der Erdoberfläche reflektiert und liefert den Beitrag S_3 zur Gesamtreflektion S_R.

Da die Erde keine wesentlichen anderen Energiequellen besitzt, bestimmt die Gesamtreflektion des Systems Erde bzw., der vom System aufgenommene Strahlungsfluss der Sonne, seine Strahlungsgleichgewichtstemperatur.

Mit $S_A = S_E - S_R$, wobei S_R die reflektierte Strahlung von der Kreisscheibe Erde und S_E die Einstrahlung angibt, errechnet sich aus dem Stefan-Bolzmann- Gesetz die Temperatur T_M, die Temperatur der auf eine Ebene geschrumpften Masse der Atmosphäre zu:

$$T_M = (S_A / (4 \cdot \sigma))^{1/4} \quad 5.1$$

Das Einsetzen von Gleichung 5.1 in Gleichung 2.2 ergibt:

$$T_0 = (S_A / (4 \cdot \sigma))^{1/4} \cdot e^{(\rho o \cdot g \cdot (H_M - H_0) \cdot (\kappa - 1) / (Po \cdot \kappa)} \quad 5.2$$

Gleichung 5.2 stellt eine Kopplung von thermischer und potentieller Energie sowie Strahlungsenergie für die Berechnung der Oberflächentemperatur der Erde dar.

In Tabelle 5.1 sind die berechneten Werte für die Temperatur der Erdoberfläche in Abhängigkeit von den in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Eigenschaften des Systems Erde aufgeführt.

Ausgehend von einer Wolkenzusammensetzung, wie sie in Tabelle 4.1 dargestellt ist, können die Ergebnisse der Berechnung wie folgt zusammengefasst werden:

Ausgehend von einer Wolkenbedeckung von 68%, wie sie für das Jahr 1986 gemessen wurde, sowie einer Wolkenzusammensetzung, wie sie in Tabelle 3.4 dargestellt ist, einer Opaziät der Bewölkung von 53%, die sich aus

50% Reflektivität an der Wolkenoberfläche und 3% Absorption in den Wolken zusammensetzt, sowie einer Reflektivität der Erdoberfläche von 16% ergibt sich eine Rückstrahlung des Erdsystems von 437,1 Watt/m² und eine Temperatur der Erdoberfläche von 288,3K. Durch Veränderung der Reflektivität der Erdoberfläche auf 17,5% ergibt sich eine Rückstrahlung des Erdsystems von 446,4Watt/m² und eine Temperatur der Erdoberfläche von 287,6 K.

Bei einer Verringerung der Wolkenbedeckung auf 64%, einer Opazität der Bewölkung von 57%sowie einer Reflektivität der Erdoberfläche von 16% ergibt sich eine Rückstrahlung des Erdsystems von 423,6 Watt/m² und eine Temperatur der Erdoberfläche von 289,4K. Durch Veränderung der Reflektivität der Erdoberfläche auf 17,5% steigt die Rückstrahlung des Erdsystems auf 430,5Watt/m² und führt zu einer Temperatur der Erdoberfläche von 288,8K.. Bei einer weiteren Reduktion der Reflektivität (Erdoberfläche auf 15%, Aerosole plus 1%) würde die Temperatur der Erdoberfläche auf 290,3K steigen.

Strahlungsgleichgewichtstemperatur bei unterschiedlichen Reflektions- und Absorptionsbedingungen														
Absorption in Wolken:			3/ 7%											
Bewölkung	Reflektion der Erde	Reflektion an Wolken	Bis zur Reflektion an Wolken	Absorption der Atm. Nach der Reflektion an Wolken	ohne Wolken	S_1	S_2	S_3	Reflektierte Strahlung (Kreisfläche) S_R	Absorbierte Strahlung (Kreisfläche) S_A	Absorbierte Strahlung (Kugelfläche) S	Strahlungs-Gleichgew. Temperatur T_M	Temperatur der Erdoberfläch T_0	Temperatur der Tropopause T_G
%	%	%	%						Watt/m²	Watt/m²	Watt/m²	K	K	K
68	16	50/3	11	11	22	367,6	66,8	2,7	437,1	927,9	231,975	252,91	288,32	221,55
68	17,5	50/3	11	11	22	367,6	75,3	3,5	446,4	918,6	229,65	252,27	287,59	220,99
68	15	50/3	11	11	22	367,6	62,7	2,4	432,7	932,3	233,075	253,21	288,66	221,81
64	16	51/6	11	11	22	352,9	67,9	2,8	423,6	941,4	235,35	253,82	289,36	222,35
64	17,5	51/6	11	11	22	352,9	74,2	3,4	430,5	934,5	233,625	253,36	288,83	221,94
64	15	51/6	11	11	22	352,9	63,6	2,5	419	946	236,5	254,13	289,71	222,62

Tab. 5.1: Strahlungsgleichgewichtstemperaturen und daraus berechnete adiabatische Temperaturen der Erdoberfläche für unterschiedliche Reflektivitäts- und Absorptionsbedingungen im System Erdoberfläche/ Atmosphäre

6. Zusammenfassung;

Die Sonne ist die wesentliche Energiequelle der Erde. Sie bestrahlt die Erde mit einer Leistung von durchschnittlich 1365 Watt/m², die jedoch nicht vollständig energiewirksam das System Erdoberfläche – Atmosphäre erreicht. Bewölkung, Wolkenstruktur und Reflektivität der Erdoberfläche beeinflussen die Strahlungsleistung, die ohne Einwirkung auf die Temperatur des Systems Erde wieder in den Weltraum abgestrahlt wird.

Entscheidend für die Temperaturverhältnisse auf der Erdoberfläche ist die Energie, die das System Erde einschließlich seiner Atmosphäre aufnimmt.

Die Atmosphäre steht unter dem Einfluss der von der Erde ausgeübten Massenanziehung, der thermodynamischen Gesetze eines realen Gasgemisches

sowie des Strahlungseinflusses der Sonne. In dem System Erdoberfläche-Atmosphäre stellt die Summe aus thermischer, potentieller und Strahlungsenergie eine Erhaltungsgröße dar.

Die unabhängige Betrachtung einzelner Energieformen bei der Abschätzung klimatischer Änderungen ist nicht zulässig.

Bei einer Erdkugel, deren Atmosphäre durch andere als die Gravitationskräfte festgehalten wird, hätte die Luftschicht eine von der Höhe unabhängige Dichte. Sie wäre überall gleich und hätte überall die gleiche Temperatur T_M = 253K, die Strahlungsgleichgewichtstemperatur, die gleich der Temperatur in der Halbwertshöhe H_M=5500m ist.

Wird die Gravitation „dazugeschaltet“, so erfolgt durch die Schwerkraft eine Dichte- und Druckzunahme in Richtung Erdmittelpunkt und eine Dichte- und Druckabnahme in Richtung der oberen Grenze der Atmosphäre. Dieser Vorgang entspricht einer adiabatischen Expansion nach oben und einer adiabatischen Kompression in Richtung des Erdmittelpunktes. Es kommt in Richtung der Erdoberfläche zur Erwärmung von 253K auf 288K und in entgegengesetzter Richtung zur Abkühlung von 253K auf 222K bei einer Höhe von 11100m.

Durch die adiabatische Kompression unter dem Einfluss der Schwerkraft erhöht sich die Temperatur der Luft an der Erdoberfläche von 253K auf 288K. Die Temperatur an der Troposphärengrenze bei ca. 11000m reduziert sich auf 222K.

Es ist also keine Gegenstrahlung erforderlich, um die Temperaturdifferenz zwischen der Strahlungsgleichgewichtstemperatur und der gemessenen gemittelten Temperatur der Erdoberfläche zu erklären.

Die Strahlungsgleichgewichtstemperatur, die sich aus der Differenz der solaren Einstrahlung und der von Wolken und Erdoberfläche reflektierten Strahlung berechnen lässt, ist die entscheidende Größe für die Berechnung der Temperatur auf der Erdoberfläche.

Auf der Basis gemessener Werte für die Wolkenbedeckung und ihrer Zusammensetzung und ihrer Reflektivität, des Absorptionsverhaltens der Atmosphäre und der Reflektivität der Erdoberfläche ergeben sich Temperaturen für die Erdoberfläche, die im Bereich der gemessenen, gemittelten globalen Temperatur liegen.

Ausgehend von einer Wolkenbedeckung von 68% und einer Reflektion der Erdoberfläche von 16% sowie einer Opazität der Bewölkung von 53%, wie sie dem Systems Erdoberfläche-Atmosphäre im Jahr 1980 zugeordnet werden können, ergibt sich eine Temperatur der Erdoberfläche von ca. 288,3. Für das Jahr 2000 mit der geringeren Wolkenbedeckung von 64% und der Opazität von 57% liegt die berechnete Temperatur bei 289,4K also bei einer um 1,1K höheren gemittelten Globaltemperatur. Im Vergleich zur Darstellung Abb. 1.1, stellt dieses Resultat eine gute Übereinstimmung dar, wenn berücksichtigt wird, dass die Einstellung des

Temperaturgleichgewichts im Jahr 2000 noch nicht abgeschlossen war, 2020 bereits eine Globaltemperatur erreicht war, die um 1K über derjenigen von 1980 lag und immer noch steigt.

Die durch zivilisatorische Aktivitäten bedingte Umgestaltung der Erdoberfläche in der kurzzeitigen Vergangenheit führte zu einer deutlichen Verringerung der Reflektivität der Erdoberfläche von 17,5 % im Jahr 1750 auf heute ca.16%. Bei gleichbleibender Wolkenbedeckung von 68% ergibt sich für die Temperatur der Erdoberfläche im Jahr 1750 ein Wert von 287,6K, der ca. 0,7K niedriger ist, als die gemittelte globale Temperatur im Jahr 1980.

Die Ausführungen zeigen, dass das Erdklima nur konstant gehalten werden kann, wenn der Energieeintrag in das System Erdoberfläche/ Atmosphäre über große Zeiträume konstant ist. Änderungen in der Energieaufnahme führen zu einem geänderten Gleichgewichtszustand und damit zu einer „Klimaänderung“.

Durch Veränderungen des Reflektions- und Absorptionsverhaltens des Systems beeinflusst der Mensch das Klima auf der Erde. Jegliche Aktivität, die die Reflektion der Erdoberfläche bzw. die Wolkenbedeckung verringert, führt zu einer Erhöhung der Gleichgewichtstemperatur. Dazu gehört die Rodung von Wäldern, die Umwandlung grüner Flächen in Flächen geringerer Reflektivität, wie Asphalt, Beton und Dachflächen, sowie die Umwandlung von Wiesen in schwarze Photovoltaik-Felder.

Nicht das Kohlendioxid ist die treibende Kraft einer Klimaänderung sondern die anhaltende Verringerung der Reflektivität der Erdoberfläche durch den Menschen ist die Ursache für eine höheren Gleichgewichtstemperatur des Systems Erde/ Atmosphäre.

Kohlendioxid ist eine völlig ungeeignete Regelgröße für eine Klimabeeinflussung.

Auch wenn die antropogene Kohlendioxiderzeugung völlig beendet wird, wird die globale Temperaturerhöhung weitergehen, solange die Menschheit nicht aufhört, ihren Planeten als Strahlungsabsorber umzugestalten.

Die massiven Eingriffe in die Reflektivität der Erdoberfläche, wie sie vor allem durch den verstärkten Ausbau der Solarenergie im Rahmen der „Erneuerbaren Energien“ zu erwarten sind, werden die globale Temperaturerhöhung eher beschleunigen als verringern. Auch wenn medizinische Gründe entscheidend sind, sollte jeder „clean air act“ auf seine negative Rückkopplung auf die Wolkenbildung und damit auf die Globaltemperatur überprüft werden.

Auch im Hinblick auf die ständig steigende Weltbevölkerung sind die Bemühungen der westlichen Welt, die Entkarbonisierung der Weltwirtschaft durchzusetzen, eher als eine Doktrin zur Sicherung politischer Einflussnahmen zu sehen, als ein Wegbereiter für das Zusammenleben von zukünftig 11 Milliarden Menschen auf der Erde (11).

7. Literatur

1.P.R. Goode et all, 2021, Earth’s Albedo 1998-2017 as Measured From earthshine, 48, Geophysical Research Letters, 48, e2021GL094888, https://doi.org/10.1029/2021GL094888

2. https://www. Worldindata.org>…>global-land-use-agriculture

3. oro verde, https://www. Regenwald-schuetzen.org>…>lage-und-verbreitung

4. N. Ramakutty, J.A. Foley 1999, Estimating Historical Changes in Global Landcover, Global Biological Cycles 13(4) 997-1027

5. https://www. Scinexx.de>….>..-erde-strassen-zerstückeln-die-welt

https://www.kompost.de>…>…versiegelung_und_erfosion_HUR_05_2015

6. J. Langeheine, 2012, Energiepolitik in Deutschland-das Geschäft mit der Angst, Athene Media- Verlag ISBN 978-3-86992-054-2

7. https://www.astro.uni-jena.de › … › Praktikum › pra2002 › node122 Die Extinktion – astro.uni-jena.de

8. Zusammenstellung der Reflektivitäten aus verschiedenen Quellen:

1. ASTER-Datenbank (1992); 2. Eigenschaften der Wolken im VIS/NIR, Institut für Raumfahrtsysteme, www.irs.uni-stuttgart.de

9. M.O.Jonas: Clouds independentlyappear to have as much or greater effect than man-made CO_2 on radiative forcing,World Journal of Adcvanced Research ans Reviews, 2022,14(02),564-572

10.W. B. Rossow, R.A. Schiffer,, Advances in Understanding Clouds from ISCCP, Bulletin of American Meteorological Society, Vol 80, No 11, 1999

11. J. Langheine 2022: Bevölkerungswachstum, große Transformation und globale Verschuldung, Fusion, 43, 2022,Nr.2 , 51-60