

# Schätzungen zum Klimawandel

Dipl.-Ing. Univ. Michael Klotsche

Datum: 27.04.23

Rudolf-Breitscheid-Straße 6  
02727 Ebersbach-Neugersdorf  
mk@ib-klotsche.de

230427\_Schaetzungen-Klimawandel\_031.odt

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	3
2. Einschränkung der Betrachtung.....	3
3. Grundlegende Berechnungen.....	4
3.1 Schwarzkörperstrahlung.....	4
3.2 Die Strahlungsbilanz der Erde.....	8
3.3 Partialdruck von Kohlendioxid.....	10
3.4 Barometrische Höhenformel.....	12
3.5 Normierte Luftschichtdicke.....	14
3.6 Partialdruck von Wasserdampf.....	15
4. Absorptionsgrad von CO <sub>2</sub> nach dem VDI-Wärmeatlas.....	18
5. Absorptionsgrad von Wasserdampf nach dem VDI-Wärmeatlas.....	21
6. Absorptionsspektren in der Atmosphäre der Erde.....	24
7. Infrarot Satellitenbilder.....	26
8. Betrachtung der Verdunstung.....	27
9. Betrachtung der Masse des Kohlenstoffs.....	28
10. Kohlendioxidabsorption der Ozeane.....	31
10.1 Gesetz von Henry.....	31
10.2 Geschätzte Masse des gelösten CO <sub>2</sub> in den Ozeanen.....	34
11. Vergleich mit des Treibhauseffektes mit der Atmosphäre der Venus.....	35
Fazit.....	36

# 1. Einleitung

Die Diskussion über den Klimawandel hat schon lange religiös-ideologische Züge angenommen. Ich habe den Eindruck als ob sehr viele Wissenschaftler heute das Narrativ der Klimakatastrophe herunterbeten müssen, wenn sie ihre Fördergelder weiter bekommen möchten. Überall, wo wissenschaftliche Arbeit die Vorgaben der Geldgeber erfüllen muss besteht die Gefahr, dass wissenschaftliche Arbeit von guter Qualität mit den Vorgaben der Geldgeber vermischt wird. Eine solche wissenschaftliche Arbeit ist unter Umständen nicht mehr unabhängig. Wo genau sich die Vorgaben der Geldgeber auswirken, ist für einen Leser, der sich mit Hilfe dieser wissenschaftlichen Arbeit in ein Thema einarbeiten möchte, nicht erkennbar. In diesem Fall helfen Schätzungen weiter, die vor dem Lesen der wissenschaftlichen Arbeit durchgeführt wurden. Die Ergebnisse von Schätzungen helfen dabei, die Plausibilität einer wissenschaftlichen Arbeit zu prüfen. Ich denke, dass hier selbst eine schlechte Schätzung besser ist, als keine Schätzung.

Ich möchte mich hier schon vorab für die mäßige Qualität der vorliegenden Arbeit entschuldigen, weil es mir aus Zeitgründen nicht möglich ist, alle Sachverhalte sehr ausführlich zu erläutern. Die Alternative wäre, dass ich mit der Publikation so lange warte, bis ich mit allen Aspekten meiner Arbeit zufrieden bin, aber dann würde dieser Text die nächsten Jahre nicht veröffentlicht. Deswegen freue ich mich, wenn aus der vorliegenden Arbeit Diskussionen und Fragen entstehen, die dann beantwortet werden können.

## 2. Einschränkung der Betrachtung

Vorab möchte ich eines klarstellen: Es geht in diesem Artikel nur um eine qualitative Schätzung, nicht um quantitative Angaben von exakten Temperaturen und Energieströmen, die sich aus diesen Betrachtungen ergeben. Dennoch können mit den folgenden Betrachtungen Aussagen darüber getroffen werden, welche physikalischen Effekte sich bezüglich des Klimas stark auswirken, welche Effekte sich schwach auswirken und welche physikalischen Effekte ihre maximale Wirksamkeit bereits erreicht haben. Auch die Größenordnungen von physikalischen Zustandsgrößen lassen sich durch diese Schätzungen bestimmen. Die Werte aus den Schätzungen können dabei helfen, Aussagen von Wissenschaftlern und Politikern einzuschätzen.

Der vorliegende Artikel soll nicht dahingehend interpretiert werden, dass Umweltschutz vernachlässigt werden kann und dass ein maßloser Konsum unproblematisch ist. Dieser Artikel soll nur bei der Bewertung helfen, wo Probleme gelöst werden müssen und wo Probleme künstlich herbeigeredet werden, um einen modernen Ablasshandel zu rechtfertigen.

## 3. Grundlegende Berechnungen

### 3.1 Schwarzkörperstrahlung

Die Strahlung, die ein schwarzer Körper aussendet, wird nach folgender Gleichung berechnet. <sup>1</sup> Dabei werden folgende Formelzeichen verwendet.

$L_{e,\lambda}$  : Spektrale Strahlungsdichte in  $W/(m^3 \text{ sr})$

$L_e$  : Strahlungsdichte in  $W/(m^2 \text{ sr})$

$\lambda$  : Wellenlänge in m

$\alpha$  : Absorptionsgrad

$\epsilon$  : Emissionsgrad

$h$  : Plancksche Konstante in Js

$c$  : Lichtgeschwindigkeit in m/s

$k$  : Boltzmann-Konstante in J/K

$T$  : Temperatur in K

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \quad h = 6,6260693 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$k = 1,3806505 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$$

Für die spektrale Strahlungsdichte eines schwarzen Körpers gilt:

$$L_{e,\lambda}^{schwarz} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

Die meisten Körper sind keine schwarzen Strahler sondern graue Strahler. Das bedeutet, dass sie nicht das gesamte Licht absorbieren aber ebenso nicht das gesamte Licht, was sie abstrahlen könnten auch abstrahlen. Dieser Sachverhalt wird durch den Absorptionsgrad berücksichtigt. Für graue Strahler gilt:

$$L_{e,\lambda} = \alpha(\lambda, T) \cdot L_{e,\lambda}^{schwarz} \quad \epsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$$

Die gesamte abgestrahlte Energie ergibt sich dann aus dem Integral über das gesamte Wellenlängenspektrum:

$$L_e = \int L_{e,\lambda} d\lambda$$

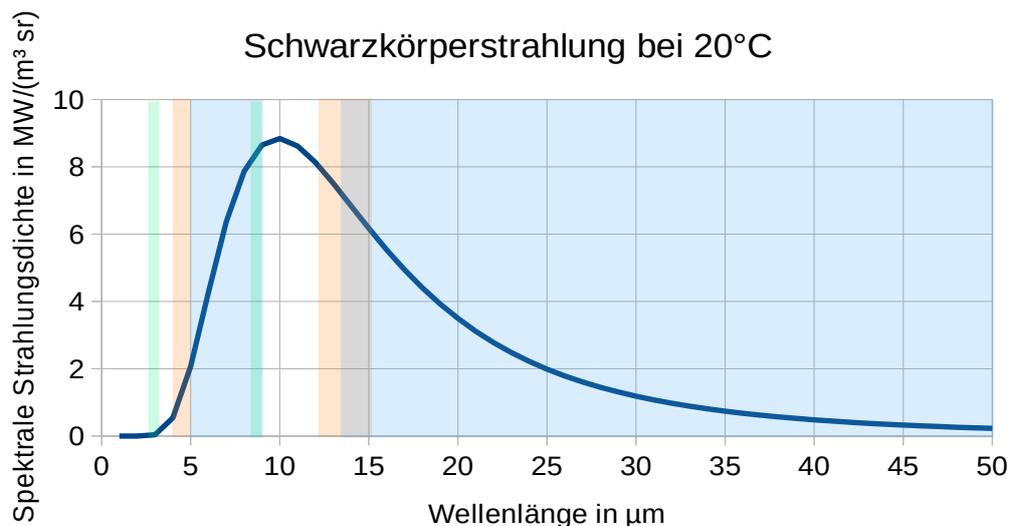
---

<sup>1</sup> Stöcker, H : Taschenbuch der Physik. Verlag Harry Deutsch. Frankfurt am Main, 2010. Seite 375

In den folgenden Diagrammen ist die spektrale Strahlungsdichte eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Strahlung und der Temperatur dargestellt. Die Temperatur von 20 °C ist eine angenehme Oberflächentemperatur, die auf dem Erdboden zu finden ist. Die Temperatur von 80 °C kann bei Sonnenstrahlung in Wüstengegenden, oder auf Dachflächen auftreten. Die Temperatur von -60 °C ist in einer Höhe von 10 km zu finden, in der auch die Wolken in höheren Atmosphärenschichten anzutreffen sind. Die Schwarzkörperstrahlung liegt bei den hier genannten Temperaturen im Bereich der Infrarotstrahlung.

Die Absorptionsbänder <sup>2</sup> von Wasserdampf, Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Methan sind in den Diagrammen farbig markiert. Absorptionsbänder bedeuten, dass die Schwarzkörperstrahlung in diesen Wellenlängenbereichen von den genannten Gasen in der Atmosphäre absorbiert und in alle Richtungen abgestrahlt wird, aber nicht direkt in den Weltraum gelangen kann.

Wasserdampf
CO <sub>2</sub>
Methan

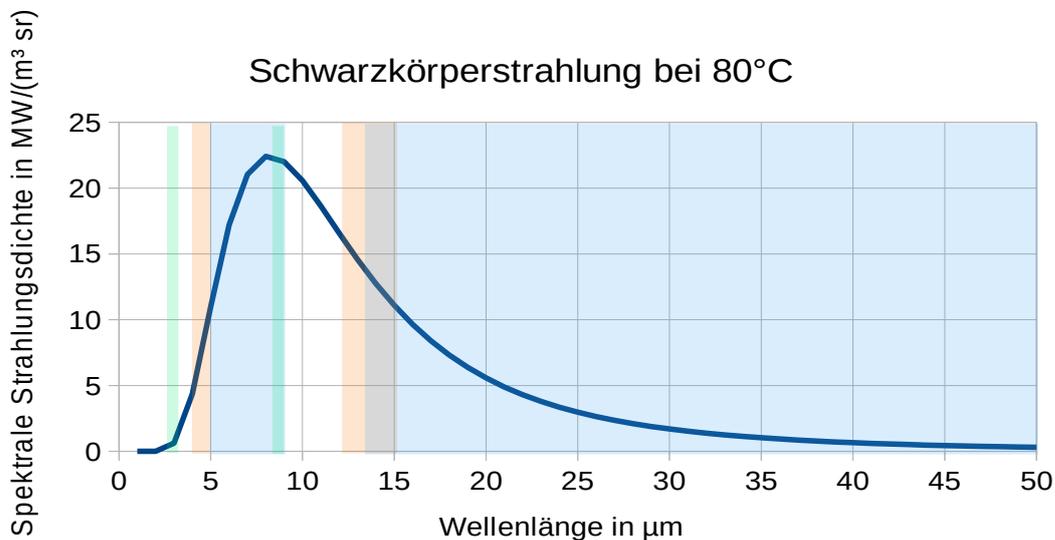


Zeichnung 1: Schwarzkörperstrahlung bei 20 °C

An diesem Diagramm ist erkennbar, dass der Wasserdampf den größten Teil der Infrarotstrahlung absorbiert. Im Bereich des Maximums der Infrarotstrahlung bei 20 °C gibt es ein offenes Fenster, durch das Infrarotstrahlung vom Boden aus bis in den Weltraum dringen kann. Die restliche Strahlung wird durch die hier genannten Gase absorbiert und kann nicht direkt in den Weltraum gelangen. Methan hat hier nahezu keinen Einfluss auf die Absorption der Infrarotstrahlung, da dieses Absorptionsband bereits vom Wasserdampf

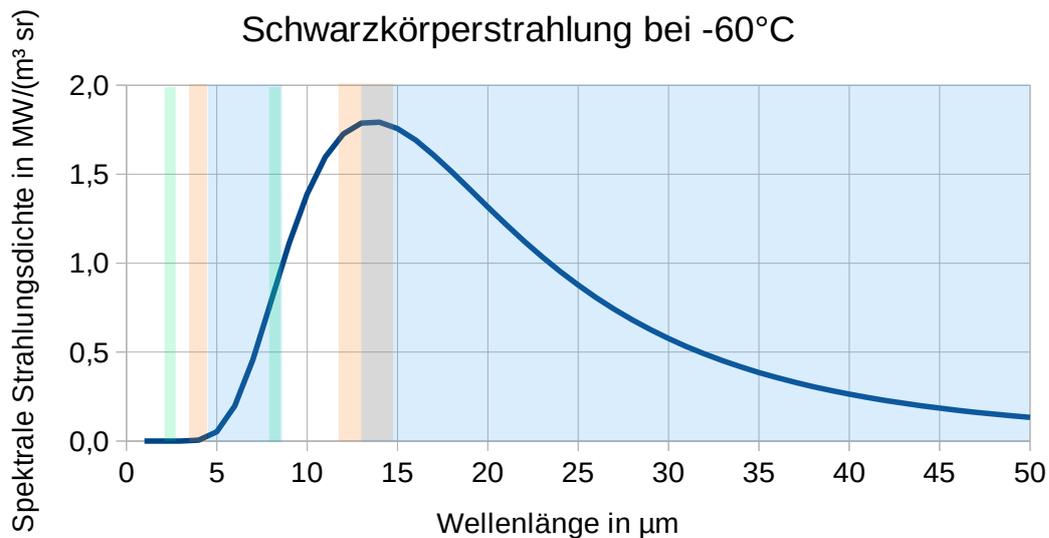
<sup>2</sup> Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag: Sachstand. Kohlendioxid Sättigung des Absorptionsbands. WD 8 - 3000 - 014/20. Seite 9

belegt ist. Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) hat auf die Absorption der Infrarotstrahlung einen Einfluss, weil dessen Absorptionsband nicht vollständig vom Wasserdampf belegt ist. Das  $\text{CO}_2$  muss deshalb genauer betrachtet werden.



Zeichnung 2: Schwarzkörperstrahlung bei 80 °C

Bei Temperaturen von 80 °C hat sich das Strahlungsmaximum der Schwarzkörperstrahlung nach links in das Absorptionsband des Wasserdampfes verschoben. Die Strahlungsintensität der emittierten Strahlung hat sich erhöht. Das bedeutet, dass sich in Gegenden, wo hohe Oberflächentemperatur des Erdbodens herrschen, diese Gegenden stark aufheizen. Die tiefliegende Atmosphäre absorbiert die Strahlung, die vom Boden abgestrahlt wird und heizt sich auf. Dadurch gibt die Atmosphäre selbst mehr Infrarotstrahlung ab und erhöht die Temperatur auf der Erdoberfläche zusätzlich. In diesem Fall ist im Bereich des Strahlungsmaximums der Wasserdampf das bestimmende Treibhausgas.



*Zeichnung 3: Schwarzkörperstrahlung bei -60 °C*

Bei einer Temperatur von -60 °C hat sich das Strahlungsmaximum nach rechts in den Bereich des Absorptionsbandes von CO<sub>2</sub> hin verschoben. Die Intensität der emittierten Strahlung hat sich verringert. Bei dieser Temperatur dürfte kaum noch Wasserdampf in der Atmosphäre vorhanden sein, da dieser dann meist in Form von Eiskristallen vorliegt, soweit Kondensationskeime in der Luft vorhanden sind. Hier hindern dann CO<sub>2</sub> und Methan mit ihren schmalen Absorptionsbändern die Infrarotstrahlung daran, direkt in den Weltraum zu gelangen. Da der Wasserdampf hier in Form von Eiskristallen vorliegt, oder bereits als Regen auf den Erdboden gefallen ist, ist die Atmosphäre in den oberen Schichten durchlässig für den Großteil der Infrarotstrahlung. Hier muss im Bereich der hoch liegenden Atmosphärenschichten das CO<sub>2</sub> genauer betrachtet werden.

## 3.2 Die Strahlungsbilanz der Erde

Die Erde erhält durch absorbierte Sonnenstrahlung Energie von der Sonne und kann diese absorbierte Sonnenstrahlung fast ausschließlich in Form von Wärmestrahlung abgeben. Während die Sonnenstrahlung nur durch eine Hälfte der Erde absorbiert wird, wird die Wärmestrahlung über die gesamte Erdoberfläche in alle Richtungen abgegeben. Dabei wird nur der Teil der Sonnenstrahlung absorbiert, der auf die Querschnittsfläche der Erde fallen würde. Den Strahlungsanteil, den die Erde absorbiert entspricht dem Schatten, den die Erde werfen würde. Die Erde steht mit der Sonne und dem Weltraum in einem thermischen Gleichgewicht. Um dieses thermische Gleichgewicht näher zu betrachten, muss erst einmal der theoretische Hintergrund beleuchtet werden. Hierbei werden folgende Formelzeichen verwendet:

$\sigma$  : Stefan-Boltzmann Konstante in  $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$

$\epsilon$  : Emissionsgrad

$\alpha$  : Albedo (Rückstrahlvermögen) der Erde

$d$  : Durchmesser der Erde in m

$q_s$  : Solarkonstante in  $\text{W}/\text{m}^2$

$A_K$  : Erdoberfläche in  $\text{m}^2$

$A_Q$  : Querschnittsfläche der Erde in  $\text{m}^2$

$T_0$  : Temperatur der Erde in K

$T_\infty$  : Temperatur des Weltraumes in K

Für die Oberfläche einer Kugel gilt:

$$A_K = \pi \cdot d^2$$

Die Querschnittsfläche, die dem Schattenwurf der Erde entspricht, kann über folgende Gleichung berechnet werden:

$$A_Q = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$$

Die Gleichung für die emittierte Strahlung lautet:

$$\dot{Q}_e = \epsilon \cdot \sigma \cdot A_K \cdot (T_0^4 - T_\infty^4)$$

Die Gleichung für die absorbierte Strahlung lautet:

$$\dot{Q}_a = q_s \cdot A_Q \cdot (1 - \alpha)$$

Beide Strahlungsarten stehen im Gleichgewicht.

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_a$$

Werden die Gleichungen ineinander eingesetzt, ergibt sich folgende Beziehung:

$$\epsilon \cdot \sigma \cdot A_K \cdot (T_0^4 - T_\infty^4) = \dot{q}_S \cdot A_Q \cdot (1 - \alpha)$$

$$T_0 = \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha) \cdot \dot{q}_S}{4 \cdot \epsilon \cdot \sigma} + T_\infty^4}$$

$$T_0 = \sqrt[4]{\frac{(1 - 0,4) \cdot 1300 \frac{W}{m^2}}{4 \cdot 0,95 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}} + (3K)^4} = 245,3^\circ C = -27,7^\circ C$$

Daraus ergibt sich, dass die Oberfläche, die für die Abstrahlung der nötigen Energie erforderlich wäre eine mittlere Temperatur von  $-27,7^\circ C$  haben müsste. Dies ist wichtig, wenn man nach der Fläche sucht, die für die Emission der Strahlung in Frage kommt. Mit diesen Gleichungen können unterschiedliche Betrachtungen durchgeführt werden. Aus diesen Betrachtungen wird zum Beispiel deutlich, warum die direkte Strahlung vom Erdboden in den Weltraum allein nicht ausreicht, um die nötige Energie in den Weltraum abzustrahlen und warum Wolken für den Wärmehaushalt der Erde wesentliche Faktoren sind. Sie zeigen aber auch, dass  $CO_2$  in der oberen Atmosphäre dazu beiträgt, Infrarotstrahlung in den Weltraum abzugeben. Hier möchte ich den Leser dazu ermutigen, selbst einmal mit diesen Gleichungen zu spielen.

### 3.3 Partialdruck von Kohlendioxid

Ich möchte mich bei meinen Betrachtungen des Einflusses von CO<sub>2</sub> auf den Strahlungsaustausch zwischen Erde und Weltraum auf Berechnungsverfahren stützen, die bei der Berechnung von Gasstrahlungen in Brennräumen verwendet werden. Diese Berechnungsgrundlagen sind im VDI-Wärmeatlas zu finden.<sup>3</sup> Diese Berechnungen sollen hier vereinfacht genutzt werden, da es nur um eine qualitative Schätzung gehen soll. Um diese Berechnungen durchführen zu können, sind zuerst einmal Berechnungsgrundlagen zu schaffen. Folgende Formelzeichen werden verwendet:

$\rho$  : Dichte in kg/m<sup>3</sup>

$\lambda$  : Wellenlänge in m

$\varepsilon_{\text{CO}_2}$  : Absorptionsgrad für CO<sub>2</sub> in m

$\chi$  : Stoffmengenanteil mol[CO<sub>2</sub>] / mol[Luft]

$\psi$  : Massenanteil eines Gases in kg[CO<sub>2</sub>] / kg[Luft]

$p$  : Druck in Pa

$p_0$  : Druck unter Normalbedingungen auf der Höhe Normal Null (NN) in Pa

$p_i$  : Partialdruck des Stoffes i in Pa

$p(z)$  : Druck in der Höhe z über Normal Null in Pa

$T$  : Temperatur in K

$T_0$  : Temperatur unter Normalbedingungen auf der Höhe Normal Null (NN) in K

$d(z)$  : Dicke der Luftschicht über einer Position auf der Höhe z in m

$g$  : Erdbeschleunigung in m/s<sup>2</sup>

$n$  : Stoffmenge in mol

$c$  : Stoffmengenkonzentration bzw. Molarität in mol/m<sup>3</sup>

$N_A$  : Loschmidt Zahl bzw. Avogadro-Konstante in 1/mol

$M$  : Molmasse in kg/mol

$m$  : Masse der Luft in kg

$F_G$  : Gewichtskraft in N

$d$  : Schichtdicke in m

$s_{gl}$  : Gleichwertige Schichtdicke in m

$R_L$  : Gaskonstante in J/( kg K)

$z$  : Höhe einer Position über Normal Null in m

---

<sup>3</sup> Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas. Springer Verlag. Berlin Heidelberg, 2006. Kapitel Kc

Folgende Stoffwerte gelten:

$$R_L = 287,2 \frac{J}{kg \cdot K} \quad M_{CO_2} = 44,01 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{mol} \quad M_L = 28,96 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{mol}$$

Für die Dichte der Luft auf der Höhe der Erdoberfläche bei Normal Null (NN) gilt:

$$\rho_L = \frac{p}{R_L \cdot T} = \frac{1013 \cdot 10^2 Pa}{287,2 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 288 K} = 1,22 \frac{kg}{m^3}$$

Für die Gehalt des Kohlendioxids CO<sub>2</sub> in der Luft gilt:

$$\chi_{CO_2} = 400 \cdot 10^{-6} \frac{m^3[CO_2]}{m^3[Luft]} = 400 \text{ ppm}$$

Der Partialdruck des CO<sub>2</sub> liegt bei:

$$p_i = \chi_i \cdot p$$

$$p_{CO_2} = \chi_{CO_2} \cdot p = 400 \cdot 10^{-6} \cdot 1013 \cdot 10^2 Pa = 40 Pa = 0,40 \text{ mbar}$$

### 3.4 Barometrische Höhenformel

Mit zunehmender Höhe über dem Erdboden sinkt der Luftdruck der Erdatmosphäre. Diese Luftdrucksenkung kann näherungsweise mit der barometrischen Höhenformel <sup>4</sup> berechnet werden:

$$p(z) = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot z}{p_0}}$$

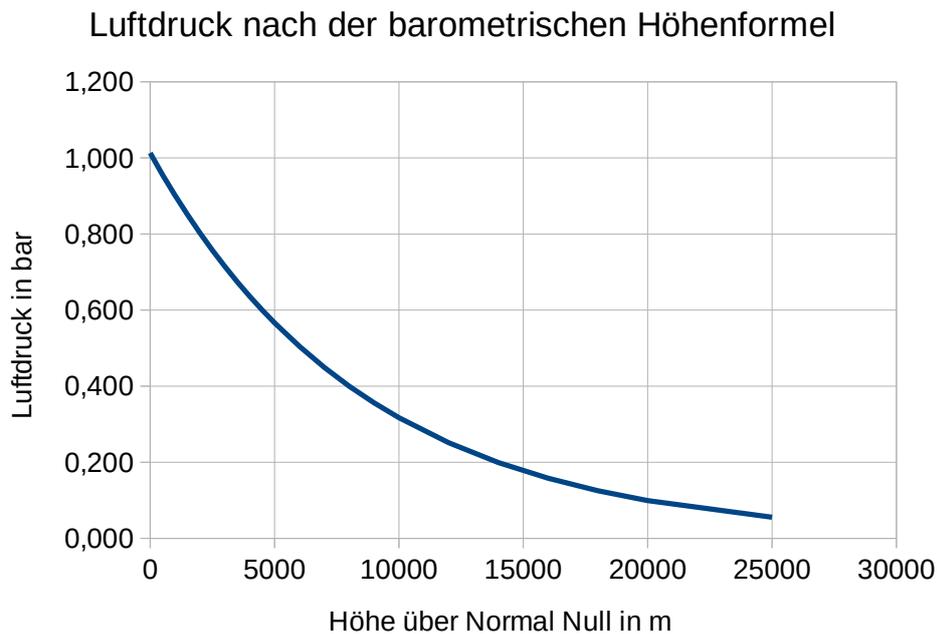


Schaubild 1: Druckabfall nach der barometrischen Höhenformel

Der Temperaturabfall aufgrund adiabater Expansion der Luft, die beim Aufsteigen der Luft stattfindet, ergibt sich auf folgender Gleichung:

$$T(p_1) = T_0 \cdot \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

Bei der Berechnung der Lufttemperatur unter Annahme einer adiabatischen Expansion eines idealen Gases, ist nicht die Kondensation von Wasserdampf in den Wolken und auch nicht der Strahlungsaustausch mit der Luft berücksichtigt.

<sup>4</sup> Stöcker, H : Taschenbuch der Physik. Verlag Harry Deutsch. Frankfurt am Main, 2010. Seite 603

In folgender Tabelle sind die Zustandsgrößen der Luft für verschiedene Höhen über dem Erdboden dargestellt. Das Produkt aus dem Partialdruck des Kohlendioxids und der äquivalenten Dicke der Luftschicht  $p_{CO_2} \cdot s_{gl}$ , wird für spätere Berechnungen wichtig.

**Berechnungsgrundlagen**

Luftdruck bei Normal Null	P0	101300	Pa
Dichte bei Normal Null	rho0	1,2	kg/m <sup>3</sup>
Endbeschleunigung	g	9,81	m/s <sup>2</sup>
Temperatur bei Normal Null	Theta 0	20	°C
Adiabatexponent von Luft	kappa	1,4	-
Gaskonstante von Luft	RL	287,2	J/(kg K)
Partialdruck CO2 bei Normal Null	pCO2	0,4	mbar

Höhe über Normal Null in m	p in Pa	p in bar	Temperatur bei adiabater Expansion in °C	Darüberliegende normierte Luftschichtdicke sgl in m	p CO2 * sgl
0	101300	1,013	20	8578	3,43
500	95582	0,956	15	8094	3,24
1000	90186	0,902	10	7637	3,05
1500	85095	0,851	6	7206	2,88
2000	80292	0,803	1	6799	2,72
2500	75759	0,758	-3	6415	2,57
3000	71483	0,715	-8	6053	2,42
3500	67448	0,674	-12	5711	2,28
4000	63640	0,636	-16	5389	2,16
4500	60048	0,600	-21	5085	2,03
5000	56658	0,567	-25	4798	1,92
6000	50442	0,504	-33	4271	1,71
7000	44908	0,449	-41	3803	1,52
8000	39981	0,400	-48	3386	1,35
9000	35595	0,356	-56	3014	1,21
10000	31690	0,317	-63	2683	1,07
12000	25118	0,251	-76	2127	0,85
14000	19909	0,199	-89	1686	0,67
16000	15780	0,158	-101	1336	0,53
18000	12507	0,125	-112	1059	0,42
20000	9914	0,099	-122	839	0,34
25000	5545	0,055	-145	470	0,19

Schaubild 2: Temperatur, Druck und normierte Luftschichtdicke in der Erdatmosphäre

### 3.5 Normierte Luftschichtdicke

Der Luftdruck und somit auch der Partialdruck des  $\text{CO}_2$  sinkt mit der Höhe über dem Erdboden. Deshalb soll eine normierte Luftschichtdicke über für jede Höhe über dem Erdboden berechnet werden. Die normierte Luftschichtdicke entsteht dadurch, dass rechnerisch die gesamte Luftmasse, die über einer Position liegt, zusammengefasst wird. Die Masse der Luftschicht wird rechnerisch so zusammengefasst, als ob sie einen Luftdruck von 1013 hPa und eine Temperatur von  $20^\circ\text{C}$  hätte. Auf diese Weise kann dann im Falle von  $\text{CO}_2$  näherungsweise mit dem Partialdruck auf der Höhe NN gerechnet werden.

Der Luftdruck wird mit folgender Gleichung berechnet.

$$p(z) = \frac{F_G}{A} = \frac{m \cdot g}{A}$$

$$A = \frac{m \cdot g}{p(z)}$$

Die Zustandsgleichung für ideale Gase lautet:

$$p_0 \cdot V = m \cdot R_L \cdot T_0$$

$$V = d(z) \cdot A$$

$$p_0 \cdot d(z) \cdot A = m \cdot R_L \cdot T_0$$

$$A = \frac{m \cdot R_L \cdot T_0}{p_0 \cdot d(z)}$$

Gleichsetzen der Gleichungen für A:

$$\frac{m \cdot g}{p(z)} = \frac{m \cdot R_L \cdot T_0}{p_0 \cdot d(z)}$$

Für die normierte Luftschichtdicke gilt:

$$d(z) = \frac{p(z) \cdot R_L \cdot T_0}{p_0 \cdot g}$$

### 3.6 Partialdruck von Wasserdampf

Der Wasserdampfpartialdruck von Wasser und Eis in Abhängigkeit von der Temperatur, kann näherungsweise nach der Magnus-Formel berechnet werden, die aus der Integration der Clausius-Clapeyron-Gleichung und der Zustandsgleichung für Ideale Gase folgt.<sup>5</sup> Die Magnus-Formel gilt unter der Annahme, dass das Volumen des Gases klein gegenüber dem Volumen der Flüssigkeit ist.

Folgende Formelzeichen werden verwendet:

$R_W$  : Gaskonstante des Wassers in J/(kg K)

$T_0$  : Bezugstemperatur in K

$T$  : Temperatur des Wassers oder des Eises in K

$\Delta h_W(T_0)$  : Spezifische Verdampfungsenthalpie des Wassers bei  $T_0$  in J/kg

$\Delta h_E(T_0)$  : Spezifische Sublimationssenthalpie des Eises bei  $T_0$  in J/kg

$p_{d,W}(T)$  : Dampfdruck des Wassers bei  $T$  in Pa

$p_{d,W}(T_0)$  : Dampfdruck des Wassers bei  $T_0$  in Pa

$p_{d,E}(T)$  : Dampfdruck des Eises bei  $T$  in Pa

$p_{d,E}(T_0)$  : Dampfdruck des Eises bei  $T_0$  in Pa

Für den Dampfdruck über einer Wasseroberfläche gilt:

$$p_{d,W}(T) \approx p_{d,W}(T_0) \cdot e^{\left( \frac{\Delta h_W(T_0)}{R_W T_0} \cdot \frac{T - T_0}{T} \right)}$$

Für den Dampfdruck über einer Eisoberfläche gilt:

$$p_{d,E}(T) \approx p_{d,E}(T_0) \cdot e^{\left( \frac{\Delta h_E(T_0)}{R_W T_0} \cdot \frac{T - T_0}{T} \right)}$$

---

5 Cerbe, G; Gernot, W: Technische Thermodynamik. Hanser-Verlag. München, 2008. Seite 237

### Angaben

Bezugstemperatur	$T_0$	273,16	K
Bezugsdruck bei $T_0$	$p_0$	611,7	Pa
Gaskonstante Wasser	$R_w$	461,41	J/kgK
Verdampfungsenthalpie Wasser	$\Delta h_{v,W}$	2,5016E+06	J/kg
Verdampfungsenthalpie Eis	$\Delta h_{v,E}$	2,8356E+06	J/kg

T [K]	T [°C]	.p Wasser [Pa]	.p Eis [Pa]
303	30	4358	
301	28	3870	
299	26	3431	
297	24	3037	
295	22	2684	
293	20	2368	
291	18	2085	
289	16	1833	
287	14	1609	
285	12	1409	
283	10	1232	
281	8	1075	
279	6	936	
277	4	814	
275	2	706	
273	0	611	611
268	-5	422	402
263	-10	288	260
258	-15	193	165
253	-20	127	103
248	-25	83	63
243	-30	53	38
238	-35	33	22
233	-40	20	13
228	-45	12	7,2
223	-50	7,2	4,0
218	-55	4,1	2,1
213	-60	2,3	1,1
208	-65	1,2	0,5
203	-70	0,7	0,3

Schaubild 3: Wasserdampfpartialdruck

In folgender Tabelle sind die Zustandsgrößen der Luft in Abhängigkeit von der Höhe über Normal Null (NN) dargestellt. Weiterhin sind die Wasserdampfpartialdrücke von Wasser und Eis angegeben und die Produkte  $p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot s_{\text{gl}}$ . Die Produkte  $p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot s_{\text{gl}}$  sind allerdings extrapoliert angegeben. Es handelt sich dabei um das Produkt des Wasserdampfpartialdrucks in der genannten Höhe über NN und der normierten Luftschichtdicke  $d$ . Diese Berechnungsweise ist nur ein Maximalwert, da der Wasserdampfpartialdruck sehr stark von der Temperatur der Luft abhängt. Mit fallender Temperatur sinkt der Wasserdampfpartialdruck in der Luft und der Anteil an flüssigem Wasser nimmt zu. Diese Betrachtungen würden den Rahmen dieses Textes sprengen, weshalb ich auf diese starke Vereinfachung zurückgreife.

Höhe über Normal Null in m	p in bar	Temperatur bei adiabater Expansion in °C	Darüberliegende normierte Luftschichtdicke sgl in m	pd [H <sub>2</sub> O]	Pd [Eis]	p H <sub>2</sub> O * sgl [Wasser] extrapoliert	p H <sub>2</sub> O * sgl [Eis] extrapoliert
0	1,013	20	8578	2368		203,10	
500	0,956	15	8094	1738		140,63	
1000	0,902	10	7637	1269		96,88	
1500	0,851	6	7206	921		66,39	
2000	0,803	1	6799	666		45,25	
2500	0,758	-3	6415	478	463	30,67	29,68
3000	0,715	-8	6053	342	316	20,68	19,13
3500	0,674	-12	5711	243	215	13,86	12,25
4000	0,636	-16	5389	171	145	9,24	7,80
4500	0,600	-21	5085	120	97	6,12	4,93
5000	0,567	-25	4798	84	65	4,03	3,10
6000	0,504	-33	4271	40	28	1,72	1,20
7000	0,449	-41	3803	19	12	0,71	0,45
8000	0,400	-48	3386	9	5	0,29	0,16
9000	0,356	-56	3014	4	2	0,11	0,06
10000	0,317	-63	2683	2	1	0,04	0,02
12000	0,251	-76	2127	0,28	0,10	0,01	0,0021
14000	0,199	-89	1686	0,04	0,01	0,00	0,0002
16000	0,158	-101	1336	0,01	0,00	0,00	0,0000
18000	0,125	-112	1059	0,00	0,00	0,00	0,0000
20000	0,099	-122	839	0,00	0,00	0,00	0,0000
25000	0,055	-145	470	0,00	0,00	0,00	0,0000

Schaubild 4: Wasserdampfpartialdrücke in der Erdatmosphäre

## 4. Absorptionsgrad von CO<sub>2</sub> nach dem VDI-Wärmeatlas

In der folgenden Tabelle <sup>6</sup> ist der Absorptionsgrad von Kohlendioxid gegenüber dem Spektrum von einem Schwarzkörperstrahler bei 300 K gegenüber CO<sub>2</sub>-Schichten unterschiedlicher optischer Dichte dargestellt. Die optische Dichte ist dabei als Produkt des CO<sub>2</sub>-Partialdrucks und der gleichwertigen Schichtdicke angegeben.

**Hinweis:** Die gleichwertige Luftschichtdicke  $s_{gl}$  wird nur hier zum Zwecke der Schätzung willkürlich mit der normierten Luftschichtdicke  $d$  gleichgesetzt. Hinter der gleichwertigen Luftschichtdicke  $s_{gl}$  stehen umfangreichere Berechnungen, die im VDI Wärmeatlas genauer erläutert sind, aber zum Zwecke der einfachen qualitativen Betrachtung weggelassen werden.

$\epsilon_{CO_2}$  : Absorptionsgrad bzw. Emissionsgrad von CO<sub>2</sub>

pCO <sub>2</sub> * s <sub>gl</sub>	$\epsilon_{CO_2}$
1,5	0,2
1	0,19
0,5	0,175
0,45	0,17
0,3	0,158
0,25	0,15
0,2	0,142
0,15	0,135
0,1	0,122
0,06	0,11
0,045	0,1
0,025	0,09
0,02	0,076
0,013	0,066

*Schaubild 5:  
Absorptionsgrad von  
CO<sub>2</sub>*

<sup>6</sup> Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas. Springer Verlag. Berlin Heidelberg, 2006.  
Seite Kc5. Bild 5

Die Werte der Tabelle aus Schaubild 5 sind in den folgenden Diagrammen dargestellt.

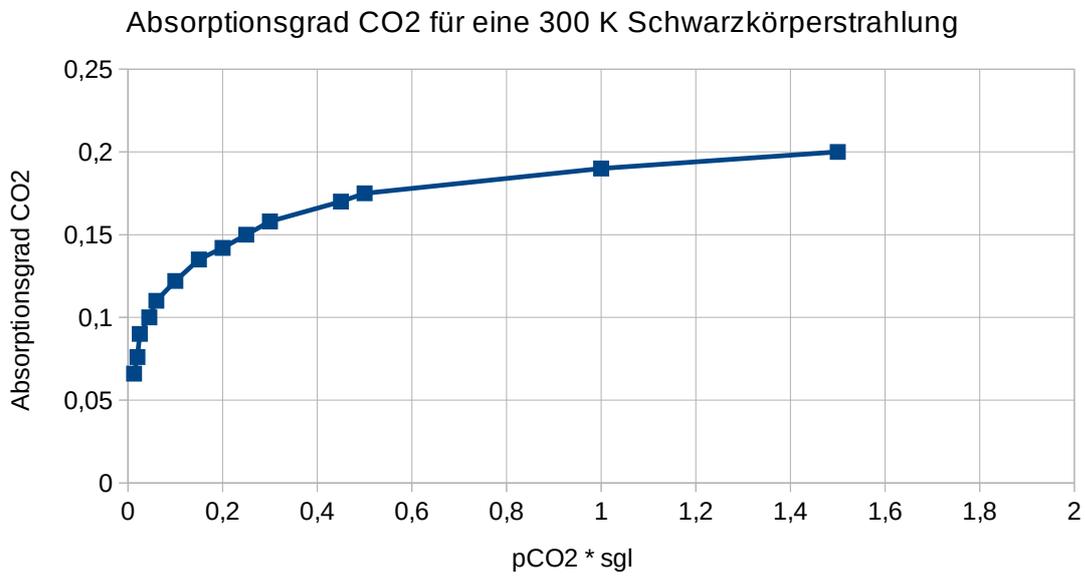


Schaubild 6: Absorptionsgrad von CO<sub>2</sub>

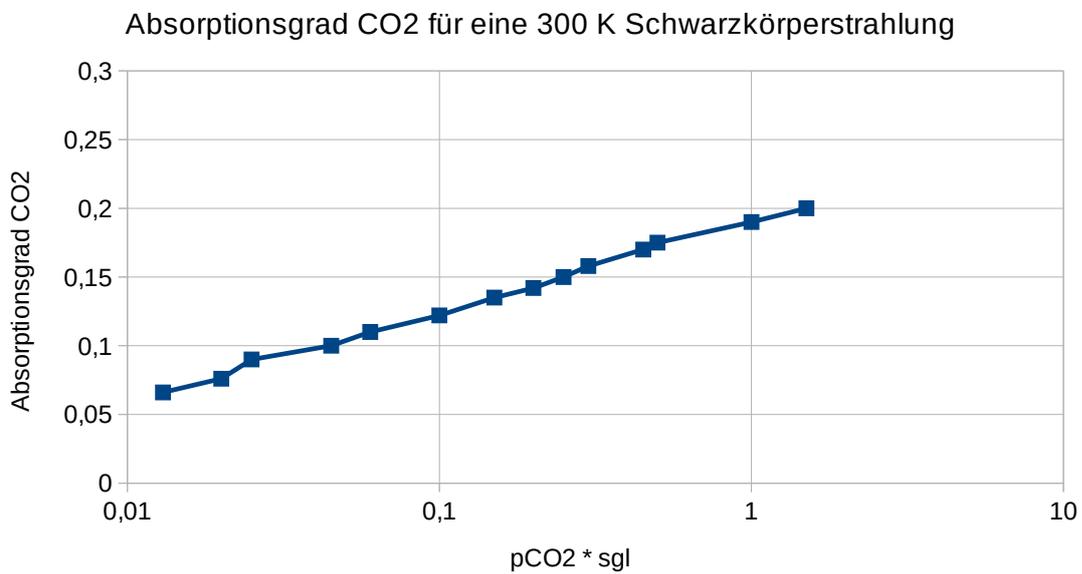


Schaubild 7: Absorptionsgrad von CO<sub>2</sub> mit logarithmischer Skala

Das Produkt aus dem Partialdruck des CO<sub>2</sub> und der gleichwertigen Luftschichtdicke  $p_{\text{CO}_2} \cdot s_{\text{gl}}$  liegt auf Höhe der Erdoberfläche bei 3,43 und in 10 km Höhe bei 1,07. Aus dem Schaubild 6 folgt, dass selbst in einer Höhe von 10 km das Absorptionsband von CO<sub>2</sub> für die Infrarotstrahlung, die das CO<sub>2</sub> blockieren kann, weitgehend blockiert ist. Das lässt vermuten, dass das CO<sub>2</sub> bereits das maximale von dem tut, was es tun kann. Bei der späteren Betrachtung der Absorptionsfrequenzen der verschiedenen Gase der Erdatmosphäre wird dieser Sachverhalt sich bestätigen.

## 5. Absorptionsgrad von Wasserdampf nach dem VDI-Wärmeatlas

Aus dem VDI-Wärmeatlas <sup>7</sup> ergibt sich für eine Schwarzkörperstrahlung bei einer Temperatur von 300 K folgende Tabelle für den Absorptionsgrad von Wasserdampf. Hierbei wurden die Korrekturfaktoren, die im VDI-Wärmeatlas angegeben sind vernachlässigt, weil sie bei dieser ungenauen Schätzung lediglich zu einer Scheinpräzision führen würden. Es sei darauf hingewiesen, dass die Korrekturfaktoren bei einem Gesamtdruck der Luft von unter 0,6 bar zu erheblich kleineren Werten für den Absorptionsgrad von Wasserdampf führen.

$p_{H_2O} \cdot s_{gl}$	$\epsilon_{H_2O}$
6	0,73
3	0,6
1,5	0,51
1	0,46
0,5	0,4
0,2	0,29
0,1	0,22
0,05	0,16
0,01	0,065
0,002	0,022

*Schaubild 8:  
Absorptionsgrad von  
Wasserdampf*

---

<sup>7</sup> Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas. Springer Verlag. Berlin Heidelberg, 2006.  
Seite Kc4. Bild 4

Aus dem Schaubild 8 ergeben sich dann folgende Diagramme:

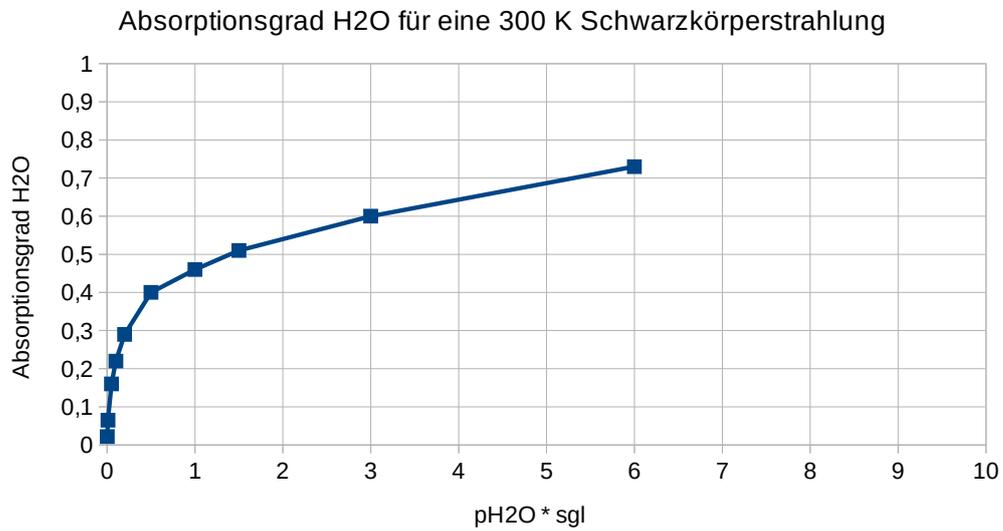


Schaubild 9: Absorptionsgrad von Wasserdampf

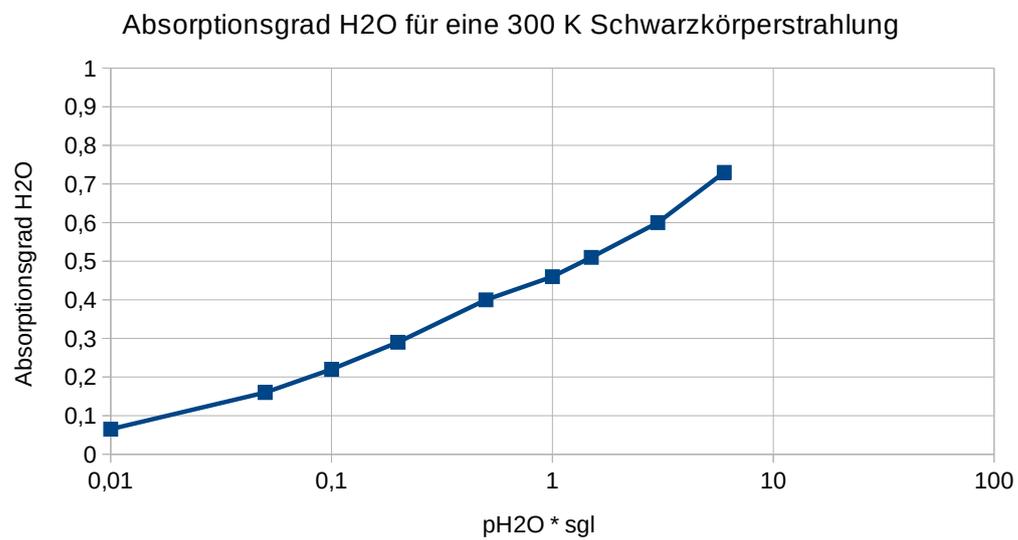


Schaubild 10: Absorptionsgrad von Wasserdampf logarithmisch skaliert

Aus den Schaubildern 4, 9 und 10 wird deutlich, dass das Produkt aus dem Partialdruck von Wasserdampf und der normierten Luftschichtdicke  $p_{\text{H}_2\text{O}} * s_{\text{gl}}$  auf dem Erdboden unter 203 liegt. Diese Zahl ist qualitativ zu betrachten und nicht quantitativ, da der Wasserdampfgehalt bei fallenden Temperaturen mit steigender Höhe über dem Erdboden stark abnimmt. Dennoch bedeutet diese Zahl, dass die Infrarotstrahlung im Bereich von 300 K, die von der Erdoberfläche abgestrahlt wird, zum großen Teil vom Wasserdampf blockiert wird, so dass sie nur zu einem kleinen Teil in den Weltraum gelangen kann.

In einer Höhe von 10 km über NN, herrschen Temperaturen um die  $-60^\circ\text{C}$ . Das Produkt aus dem Partialdruck von Wasserdampf und der normierten Luftschichtdicke  $p_{\text{H}_2\text{O}} * s_{\text{gl}}$  liegt in dieser Höhe unter 4. Dort ist der Wasserdampfpartialdruck so gering, dass der Wasserdampf die Wärmestrahlung nur noch zu einem geringen Teil absorbieren kann. Dadurch kann Infrarotstrahlung, die zum Beispiel von Wolken in großen Höhen abgegeben wird, zu einem großen Teil in den Weltraum abgegeben werden.

Wenn man davon ausgeht, dass die trockene Luft aus den oberen Atmosphärenschichten im Ausgleich zu den aufsteigenden Wolkenmassen absinkt, ist zu erwarten, dass auch in Höhen unterhalb von 10 km trockene Luft zu finden ist. Das bedeutet, dass auch Infrarotstrahlung von Wolken in unteren Atmosphärenschichten in den Weltraum abgegeben werden kann, in denen eine Temperatur über  $-20^\circ\text{C}$  herrscht. Das dürfte dann für Wolken unterhalb von 4500 m zutreffen.

Eines wird dadurch deutlich: Es besteht durch die Anwesenheit von Wasser auf der Erde ein Regelkreis, der auf der Erde für ein gemäßigtes Klima sorgt. Dieser Regelkreis wird im Wesentlichen vom Wasser bestimmt. Strahlung, die auf die Erdoberfläche trifft und diese erwärmt, muss zu einem großen Teil über Verdunstung von Wasser in höhere Luftschichten transportiert werden, so dass sie dann über Wolken in den Weltraum abgegeben werden kann.

## 6. Absorptionsspektren in der Atmosphäre der Erde

Im folgenden Diagramm <sup>8</sup> sind die Absorptionsspektren von Bestandteilen der Erdatmosphäre dargestellt:

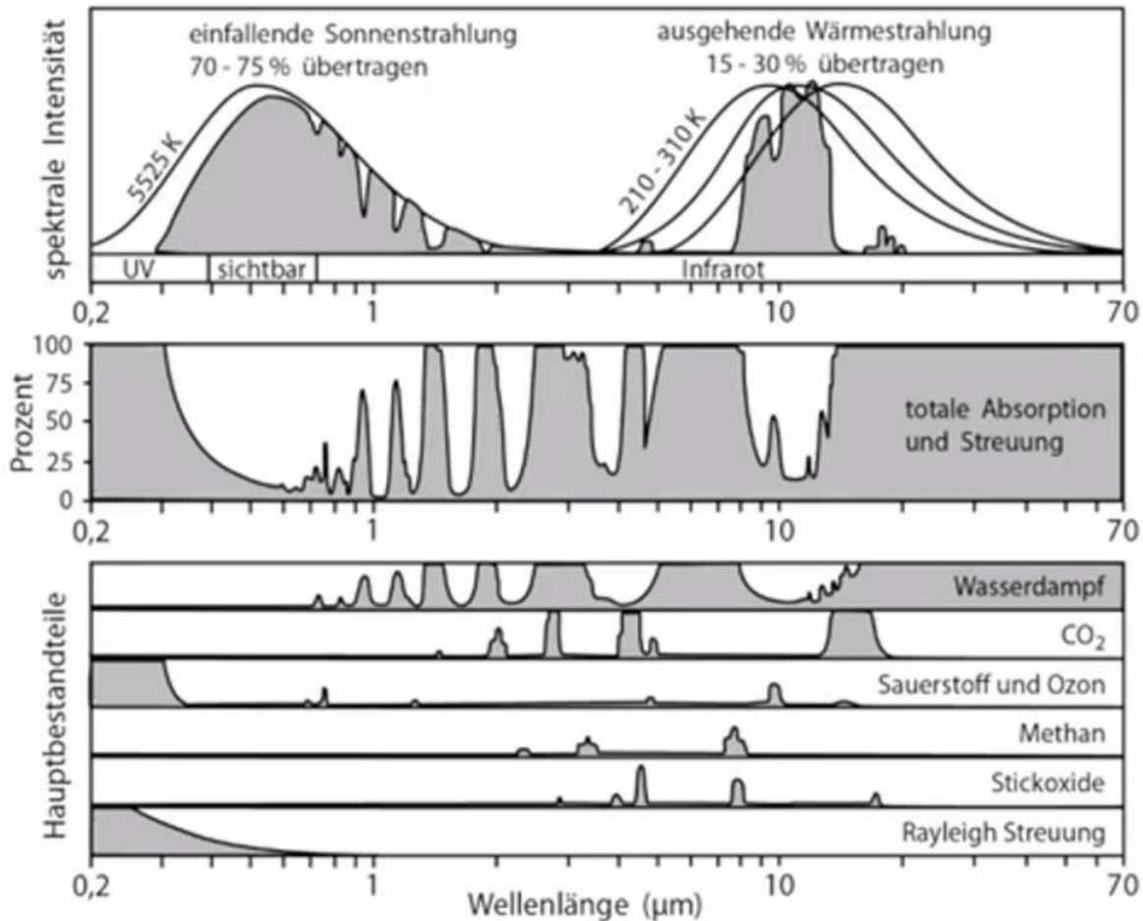


Schaubild 11: Absorptionsspektren von Gasen der Erdatmosphäre

Im obersten Diagramm ist die Summe aller Absorptionsspektren dargestellt. Im Bereich des sichtbaren Lichts ist die Erdatmosphäre weitgehend durchlässig. Beim Intensitätsmaximum des Wellenlängenbereichs der Infrarotstrahlung, dass von einem schwarzen Körper mit einer Temperatur von 300 K bzw. 27°C abgegeben wird, gibt es ein schmales Fenster, durch das Licht vom Erdboden aus direkt in den Weltraum gelangen kann. Keines der genannten Gase ist in der Lage, in diesem Frequenzbereich die Infrarotstrahlung zu absorbieren. Alle anderen Frequenzbereiche werden hauptsächlich durch Wasserdampf blockiert.

<sup>8</sup> Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag: Sachstand. Kohlendioxid Sättigung des Absorptionsbands. WD 8 - 3000 - 014/20. Seite 9

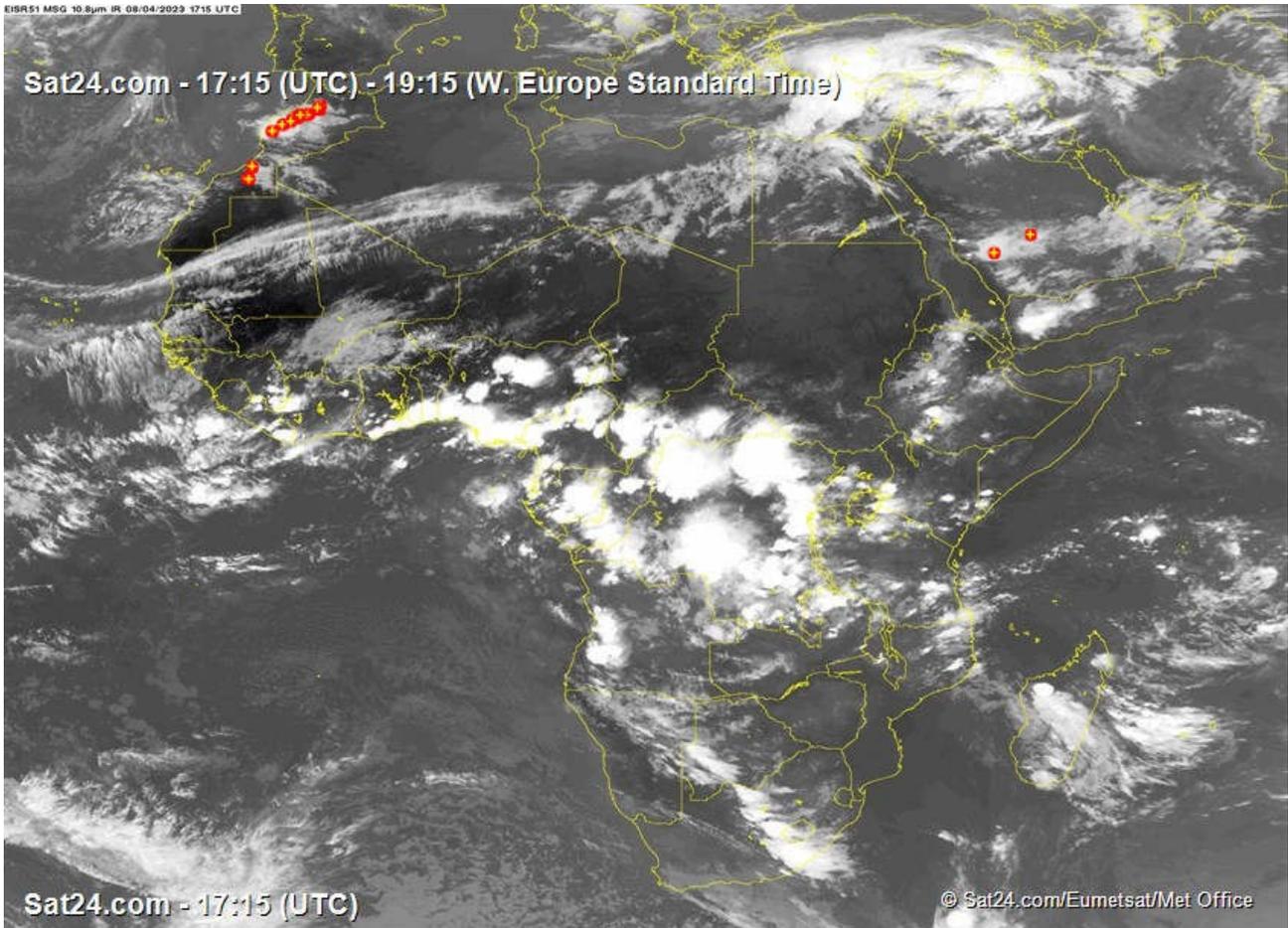
Aufgrund der tiefen Temperaturen in hohen Atmosphärenschichten, ist Wasserdampf nur in geringer Menge bei einem Wasserdampfpartialdruck von ca. 1 Pa vorhanden<sup>9</sup>. Die Infrarotstrahlung, die von den hoch liegenden Wolken abgegeben wird, kann die obersten Schichten der Atmosphäre zu einem großen Teil ungehindert passieren und in den Weltraum gelangen. Auf diese Weise ist über die Wolkenbildung ein Temperaturregelkreis in der Erdatmosphäre vorhanden.

Wolkenschichten in niedrigen Höhen kommen bei hoher Luftfeuchte in Bodennähe vor und reflektieren die Sonnenstrahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich. Die Infrarotstrahlung der Wolken der niederen Luftschichten wird aber durch den Wasserdampf der Luft blockiert.

---

9 Berechnung nach der barometrischen Höhenformel und der Magnus formel.

## 7. Infrarot Satellitenbilder



Das Infrarot-Bild <sup>10</sup> wurde um 19:15 Uhr UTC (Coordinated Universal Time) aufgenommen. Die UTC entspricht im Wesentlichen der Zeit am 0-ten Längengrad. Auf diesem Bild ist zu erkennen, dass der westliche Teil der Sahara schwarz ist. In diesem Teil der Sahara scheint noch die Sonne, während der östliche Teil der Sahara bereits im Dunkeln liegt. Die Strahlung die vom Erdboden abgegeben wird, wird durch den Wasserdampf in der Luft absorbiert und gelangt kaum in den Weltraum.

In dem Teil der Sahara, in dem die Sonne bereits untergegangen ist, kondensiert der Wasserdampf in der Atmosphäre und es entstehen kleine Wassertröpfchen. Dieser Teil erscheint grau. Wassertröpfchen in der oberen Atmosphäre geben Strahlung in den Weltraum ab.

Im Bereich des zentralafrikanischen Regenwaldes erscheinen die Wolken hell weiß. Hierbei handelt es sich um Wolken, die bis in die oberen Atmosphärenschichten hinauf reichen. Diese Wolken geben eine intensive Infrarotstrahlung ab in den Weltraum ab.

<sup>10</sup> <https://de.sat24.com/de/freeimages>

Wolken in den tiefen Atmosphärenschichten geben ihre Strahlung an den Wasserdampf der oberen Atmosphärenschichten ab, erscheinen auf dem Infrarotbild lediglich schwach grau.

Alles in Allem, schließe ich daraus, dass Wasser der wichtigste Faktor für die Regelung eines lebensfreundlichen Klimas auf der Erde ist.

## 8. Betrachtung der Verdunstung

Um die Bedeutung der Verdunstung von Wasser für das Klima zu verdeutlichen, soll die Verdampfungsenthalpien verschiedener Vegetationsformen betrachtet werden.

Angenommen, in Sachsen fallen durchschnittlich 600 mm/a Niederschlag auf den Erdboden.

Des weiteren wird angenommen, dass die Globalstrahlung in Sachsen durchschnittlich  $1100 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ a})$  beträgt.

Angenommen, die Menge des verdunsteten Wassers schwankt zwischen  
 $380 \text{ l}/(\text{m}^2 \text{ a})$  bei Grasflächen,  
 $480 \text{ l}/(\text{m}^2 \text{ a})$  bei Buchen und Eichenwäldern und  
 $580 \text{ l}/(\text{m}^2 \text{ a})$  bei Kiefernwäldern.

Die Verdunstung von Wasser benötigt Energie. Die Verdampfungsenthalpie von Wasser beträgt  $2459 \text{ kJ}/\text{kg}$  beziehungsweise  $0,683 \text{ kWh}/\text{kg}$  bei einer Temperatur von  $17,5^\circ\text{C}$ . Das bedeutet eine Verdampfungsenthalpie auf die Fläche bezogen von  
 $259 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$  bei Grasflächen,  
 $327 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$  bei Buchen und Eichenwäldern und  
 $395 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$  bei Kiefernwäldern.

Bezogen auf die auftreffende Globalstrahlung bedeutet dies, dass zur Verdunstung folgende Anteile der eintreffenden Globalstrahlung notwendig sind:

$23,6\%$  bei Grasflächen,  
 $29,7\%$  bei Buchen und Eichenwäldern und  
 $35,9\%$  bei Kiefernwäldern.

Über die Niederschlagsmenge, die als Regen oder Nebel nieder geht und den Erdboden nicht erreicht, kann hier keine Aussage getroffen werden.

Eines kann durch diese Betrachtung gesagt werden: Die Verdunstung von Wasser beeinflusst das Klima an einem Ort erheblich. Eine intelligente Wasserwirtschaft oder auch Fehler bei der Wasserwirtschaft wirken sich auf das Klima aus.

## 9. Betrachtung der Masse des Kohlenstoffs

Die Betrachtung der Masse des Kohlenstoffes, das in der Atmosphäre vorhanden ist, soll dabei helfen, die Größenverhältnisse zwischen dem Brennstoffverbrauch im Verhältnis zum Kohlenstoff in der Atmosphäre einzuordnen. Über den Luftdruck auf der Erdoberfläche, kann die Masse der gesamten Erdatmosphäre berechnet werden, weil der Luftdruck seine Ursache in der Gewichtskraft der Masse der Luft hat. Anhand des Volumenanteils des Kohlendioxids in der Atmosphäre, kann dann der Stoffmengenanteil des Kohlenstoffes in der Atmosphäre berechnet werden. In dieser Betrachtung soll angenommen werden, dass das Kohlendioxid in der Atmosphäre der Erde gleichmäßig verteilt ist. Folgende Formelzeichen werden verwendet:

- d : Erddurchmesser in m
- $d_C$  : Dicke der Kohlenstoffschicht auf der gesamten Erdoberfläche in m
- $A_K$  : Erdoberfläche in  $m^2$
- $m_L$  : Masse der Luft in kg
- $m_C$  : Masse des Kohlenstoffes in kg
- $F_G$  : Gewichtskraft in N
- g : Erdbeschleunigung in  $m / s^2$
- $p_L$  : Luftdruck in Pa
- $p_{CO_2}$  : Partialdruck des  $CO_2$  in Pa
- $M_{CO_2}$  : Molmasse des  $CO_2$  in kg/mol
- $M_C$  : Molmasse des Kohlenstoffes in kg/mol
- $\chi_{CO_2}$  : Stoffmengenanteil des  $CO_2$  in der Luft
- $\rho_C$  : Dichte des Kohlenstoffes in  $kg/m^3$
- $\rho_{A,C}$  : Massenbeladung des Kohlenstoffes auf der Erdoberfläche in  $kg/m^2$
- $V_C$  : Volumen des Kohlenstoffes in  $m^3$

Die Masse der Erdatmosphäre berechnet sich aus:

$$A_K = \pi \cdot d^2$$

$$p_L = \frac{F_G}{A_K} = \frac{m_L \cdot g}{A_K} \quad \text{daraus folgt:} \quad m_L = \frac{p_L \cdot A_K}{g}$$

Die Dicke einer Kohlenstoffschicht, die dem Kohlenstoffgehalt der Erdatmosphäre entspricht, wird wie folgt berechnet:

$$n_L = \frac{m_L}{M_L}$$

$$n_{CO_2} = \chi_{CO_2} \cdot n_L \quad n_C = n_{CO_2} \quad m_C = n_C \cdot M_C$$

$$V_C = \frac{m_C}{\rho_C} \quad d_C = \frac{V_C}{A_K}$$

$$d_C = \frac{M_C \cdot \chi_{CO_2} \cdot p_L}{M_L \cdot \rho_C \cdot g}$$

$$d_C = \frac{12,0 \frac{g}{mol} \cdot 400 \cdot 10^{-6} \cdot 101300 Pa}{28,9 \frac{g}{mol} \cdot 2260 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,76 mm$$

Das ergibt dann eine Massenbelegung 1,63 kg reiner Kohlenstoff pro m<sup>2</sup> der Erdoberfläche

$$m_C = \frac{M_C \cdot \chi_{CO_2} \cdot p_L \cdot \pi \cdot d^2}{M_L \cdot g}$$

$$m_C = \frac{12,0 \frac{g}{mol} \cdot 400 \cdot 10^{-6} \cdot 101300 Pa \cdot \pi \cdot (12,756 \cdot 10^6 m)^2}{28,9 \frac{g}{mol} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} = 876 \cdot 10^{12} kg = 876 \cdot 10^9 t$$

Für die Gesamtmasse an CO<sub>2</sub> in der Erdatmosphäre gilt

$$m_{CO_2} = \frac{M_{CO_2} \cdot \chi_{CO_2} \cdot p_L \cdot \pi \cdot d^2}{M_L \cdot g}$$

$$m_{CO_2} = \frac{44,0 \frac{g}{mol} \cdot 380 \cdot 10^{-6} \cdot 101300 Pa \cdot \pi \cdot (12,756 \cdot 10^6 m)^2}{28,9 \frac{g}{mol} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} = 3214 \cdot 10^{12} kg = 3214 \cdot 10^9 t$$

Für die Massenbelegung der Erdoberfläche mit reinem Kohlenstoff gilt:

$$\rho_{A,C} = \frac{m_C}{A_K} = \frac{M_C \cdot \chi_{CO_2} \cdot p_L}{M_L \cdot g}$$

$$\rho_{A,C} = \frac{12,0 \frac{g}{mol} \cdot 380 \cdot 10^{-6} \cdot 101300 Pa}{28,9 \frac{g}{mol} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} = 1,72 \frac{kg}{m^2}$$

Damit die Ergebnisse dieser Berechnungen bewertet werden können, soll im Folgenden die Masse des Kohlenstoffs betrachtet werden, die als sicher gewinnbar in Zukunft zu Verfügung stehen.

Die Daten für die sicher gewinnbaren Kohlevorräte <sup>11</sup> weltweit lauten wie folgt:

Brennstoff	Brennstoffmasse	Kohlenstoffanteil <sup>12</sup>	Kohlenstoffmasse
Steinkohle	735 · 10 <sup>9</sup> t	70%	514 · 10 <sup>9</sup> t
Weichbraunkohle	320 · 10 <sup>9</sup> t	50%	160 · 10 <sup>9</sup> t
Erdöl	234 · 10 <sup>9</sup> t	85%	199 · 10 <sup>9</sup> t
Erdgas	198.960 · 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> 143 · 10 <sup>9</sup> t	75%	107 · 10 <sup>9</sup> t
<b>Summe</b>			<b>980 · 10<sup>9</sup> t</b>

Der aktuelle jährliche Verbrauch von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen weltweit sieht wie folgt aus:

Brennstoff	Brennstoffmasse	Kohlenstoffanteil <sup>13</sup>	Kohlenstoffmasse
Steinkohle	5 · 10 <sup>9</sup> t/a	70%	3,5 · 10 <sup>9</sup> t/a
Weichbraunkohle <sup>14</sup>	4,1 · 10 <sup>9</sup> t/a	50%	2,0 · 10 <sup>9</sup> t/a
Erdöl	4,5 · 10 <sup>9</sup> t/a	85%	3,8 · 10 <sup>9</sup> t/a
Erdgas	4.960 · 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> /a 3,7 · 10 <sup>9</sup> t/a	75%	2,8 · 10 <sup>9</sup> t/a
<b>Summe</b>			<b>12,1 · 10<sup>9</sup> t/a</b>

Das bedeutet, dass bei dem heutigen Verbrauch kohlenstoffhaltiger Brennstoffe diese Ressourcen noch für die nächsten 81 Jahre reichen. Wenn alle hier genannten kohlenstoffhaltigen Brennstoffe verbrannt würden, würde sich der Kohlenstoffgehalt in der Atmosphäre mehr als verdoppeln, sofern die Ozeane nicht einen Teil dieses Kohlenstoffes absorbieren würden.

Hier soll aber darauf hingewiesen werden, dass sich die Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre auf das Absorptionsverhalten von Infrarotstrahlung logarithmisch auswirkt und nicht linear. Das geht aus dem Schaubild 6 hervor. Das lässt vermuten, dass sich die Verdopplung des CO<sub>2</sub> Gehaltes der Atmosphäre nur minimal auf das gesamte Klima der Erde auswirkt. Die Vernichtung des Ökosystems aufgrund der Verdopplung des CO<sub>2</sub> Gehaltes der Atmosphäre unwahrscheinlich zu sein.

<sup>11</sup> Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Energiedaten Gesamtausgabe. Stand Oktober 2019. Seite 70 ff

<sup>12</sup> Recknagel, H et al.: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik. Oldenburg Verlag. 70 Auflage, 2000. Seite 206 ff

<sup>13</sup> Recknagel, H et al.: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik. Oldenburg Verlag. 70 Auflage, 2000. Seite 206 ff

<sup>14</sup> Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: BGR Energiedaten 2022 - Daten zu Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung.

[https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/energiedaten\\_2022.html?nn=1542330](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/energiedaten_2022.html?nn=1542330)

# 10. Kohlendioxidabsorption der Ozeane

## 10.1 Gesetz von Henry

Damit der Kohlendioxidgehalt der Ozeane geschätzt werden kann, ist erst einmal der theoretische Hintergrund der Absorption von CO<sub>2</sub> in Wasser zu klären. Die Absorption von CO<sub>2</sub> in Wasser kann näherungsweise mit dem Gesetz von Henry berechnet werden. Hierbei werden folgende Formelzeichen verwendet.

- H : Henry-Konstante in mol / (m<sup>3</sup> Pa)  
c<sub>CO2</sub> : Molare Konzentration von CO<sub>2</sub> im Wasser in mol / m<sup>3</sup>  
p<sub>CO2</sub> : Partialdruck des CO<sub>2</sub> in der Luft über dem Wasser in Pa  
ρ<sub>CO2,L</sub> : Dichte des im Wasser gelösten CO<sub>2</sub> in kg/m<sup>3</sup>  
Δ<sub>sol</sub>H : Lösungsenthalpie in J  
R : Molare Gaskonstante in J/( mol K)  
T : Temperatur in K  
T<sub>θ</sub> : Bezugstemperatur in K  
H<sub>θ</sub> : Henry-Konstante bei Bezugstemperatur in mol / (m<sup>3</sup> Pa)

Der Partialdruck des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre liegt, wie bereits gezeigt wurde, bei:

$$p_{CO_2} = \chi_{CO_2} \cdot p = 400 \cdot 10^{-6} \cdot 1013 \cdot 10^2 Pa = 40 Pa$$

Das Gesetz von Henry<sup>15</sup> bezüglich dem Dampfdruck von gelösten Gasen über Wasser lautet:

$$p_{CO_2} = \frac{c_{CO_2}}{H_{CO_2}^{cp}}$$

$$H_{CO_2}^{cp} = 3,4 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{m^3 Pa} \quad \text{bei } T = 298,15 \text{ K und } \rho = 997 \text{ kg/m}^3$$

---

<sup>15</sup> Sander, R: Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. Atmospheric Chemistry Department. Max Planck Institute for Chemistry. Mainz, 2015

Die Temperaturabhängigkeit der Henry-Konstante folgt aus der van't Hoff Gleichung, die auf die Henry-Konstante angewendet wird:

$$\frac{d \ln H_{CO_2}^{cp}}{d\left(\frac{1}{T}\right)} = \frac{-\Delta_{sol} H}{R}$$

$$H(T) = H_{\Theta} \left( \frac{-\Delta_{sol} H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\Theta}} \right) \right)$$

Für Kohlendioxid gilt für die Temperaturabhängigkeit der Henry-Konstante bei einer Temperatur von  $T = 298,15 \text{ K}$  und einer Dichte von Wasser von  $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$  folgender Wert:

$$\frac{d \ln H_{CO_2}^{cp}}{d\left(\frac{1}{T}\right)} = 2300..2400$$

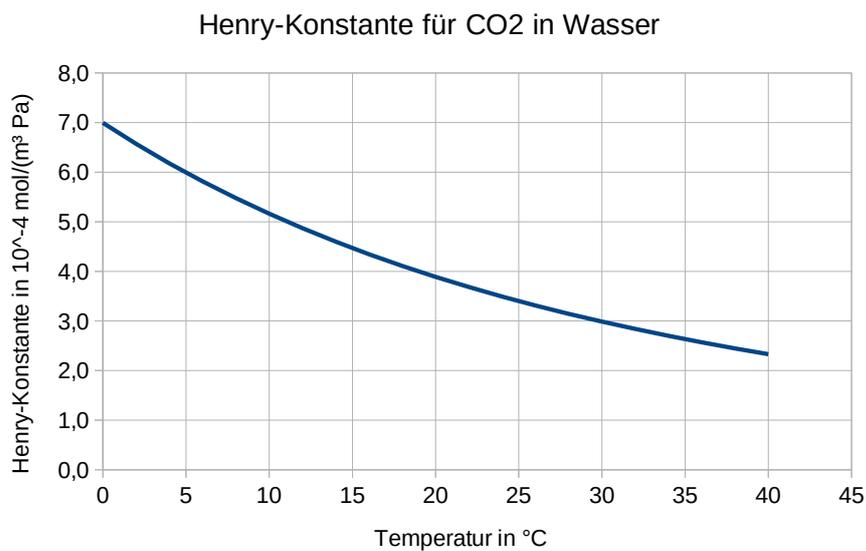


Schaubild 12: Henry-Konstante für CO<sub>2</sub> in Abhängigkeit der Temperatur in  $10^{-4} \text{ mol}/(\text{m}^3 \text{ Pa})$

Bei einer Temperatur von  $T = 298,15 \text{ K}$  bzw.  $25 \text{ °C}$  gilt für die Stoffmengenkonzentration des  $\text{CO}_2$  in Wasser:

$$c_{\text{CO}_2} = p_{\text{CO}_2} \cdot H_{\text{CO}_2}^{\text{cp}} = 40 \text{ Pa} \cdot 6,0 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{ Pa}} = 24,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Für die Dichte des  $\text{CO}_2$  in Wasser bei einer Temperatur von  $5 \text{ °C}$  gilt dann:

$$\rho_{\text{CO}_2, \text{L}} = \frac{c_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}} = \frac{24,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}}{44,01 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 0,55 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

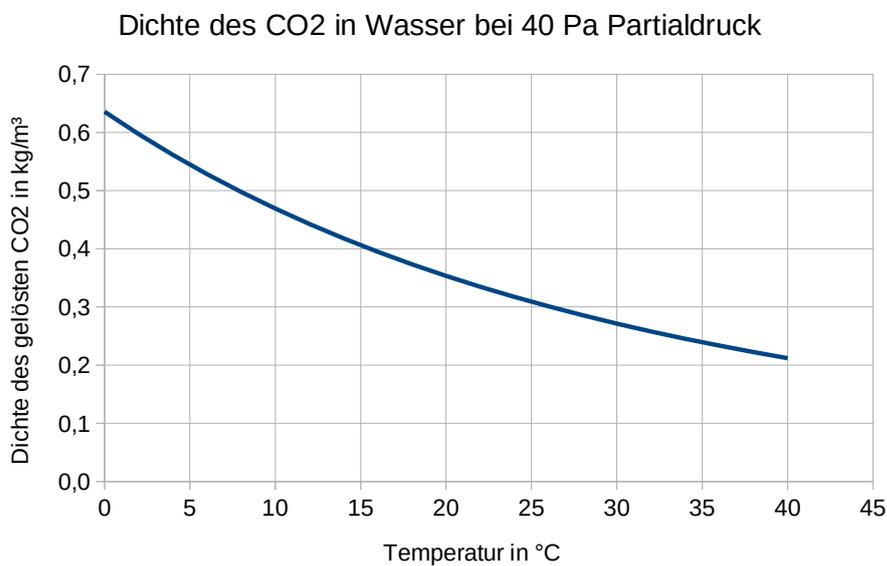


Schaubild 13: Dichte des  $\text{CO}_2$  in Wasser bei 40 Pa Partialdruck in der Luft

## 10.2 Geschätzte Masse des gelösten CO<sub>2</sub> in den Ozeanen

Für die Berechnung der Masse des gelösten CO<sub>2</sub> in den Ozeanen soll davon ausgegangen werden, dass 2/3 der Erdoberfläche mit Ozeanen bedeckt sind. Die mittlere Tiefe der Ozeane soll mit 3680 m angenommen werden. Für das Wasservolumen gilt dann:

$$V_{\text{Wasser}} = \frac{2}{3} \cdot A_K \cdot h_{\text{Wasser}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot (12,756 \cdot 10^6 \text{ m})^2 \cdot 3680 \text{ m} = 1,25 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$$

Die Masse des gelösten CO<sub>2</sub> beträgt dann:

$$m_{\text{CO}_2} = \rho_{\text{CO}_2, L} \cdot V_{\text{Wasser}}$$

$$m_{\text{CO}_2} = 0,55 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,25 \cdot 10^{18} \text{ m}^3 = 687 \cdot 10^{12} \text{ kg} = 687 \cdot 10^9 \text{ t}$$

Hierbei ist nicht berücksichtigt, dass das gelöste CO<sub>2</sub> mit Elementen wie Calcium aus Gesteinen und Sedimenten Verbindungen eingehen und Gleichgewichte bilden kann. Das kann dazu führen, dass wesentlich mehr CO<sub>2</sub> in den Ozeanen aufgenommen werden kann.

# 11. Vergleich mit des Treibhauseffektes mit der Atmosphäre der Venus

In der Klimadebatte wird häufig der Planet Venus als Schreckensbeispiel angeführt, wohin der Klimawandel führen könnte. Der Vergleich des Treibhauseffektes mit der Atmosphäre der Venus hinkt allerdings, da der Atmosphärendruck auf der Oberfläche der Venus um ein Vielfaches höher ist, als auf der Erde. Das liegt daran, dass die Masse der Venusatmosphäre größer ist, als die Masse der Atmosphäre der Erde. Will man die Venusatmosphäre und die Erdatmosphäre vergleichen, muss die potentielle Temperatur der Atmosphären betrachtet werden. Das bedeutet, dass betrachtet werden muss, welche Temperatur ein Gasvolumenstück der Venusatmosphäre hat, wenn es so weit nach oben steigt, bis es den Druck erreicht hat, der auf der Erdoberfläche herrscht. Das wäre dann der Druck von 1 bar.

Auf der Oberfläche der Venus herrscht eine Temperatur von 737 K bzw. 464 °C und ein Atmosphärendruck von 92 bar. Die Atmosphäre besteht zu 96,5 % aus CO<sub>2</sub>. Der Adiabatenexponent von CO<sub>2</sub> liegt bei 1,29

Für eine adiabatische Expansion gilt: <sup>16</sup>

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$T_2 = 737 \text{ K} \cdot \left( \frac{1 \text{ bar}}{91 \text{ bar}} \right)^{\frac{1,29-1}{1,29}} = 267 \text{ K} = -5,6 \text{ °C}$$

Bei adiabatischer Expansion ergibt sich für ein die Venusatmosphäre in einer Höhe, wo ein Druck von 1 bar herrscht eine Temperatur von -5,6 °C. Obwohl die Strahlungsdichte Sonnenstrahlung aufgrund der Nähe zur Sonne auf der Venus wesentlich höher ist, ist die potentielle Temperatur auf der Venus niedriger als auf der Erde. Das kann damit zusammenhängen, dass das Albedo der Venus höher ist, als das der Erde.

---

<sup>16</sup> Kretzschmar, H.-J.: Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik. Anser Verlag. München, 2009. Seite 115

# Fazit

Anhand der durchgeführten Schätzungen kann ich folgende Aussagen treffen:

1. CO<sub>2</sub> und Methan sind keine Klimakiller, die den Weltuntergang herbeiführen. Die Absorptionsbänder von CO<sub>2</sub> sind auch in hohen Atmosphärenschichten weitgehend gesättigt. Die Absorptionsbänder von Methan sind sehr schmal und Methan oxidiert bei Anwesenheit von UV-Strahlung und Sauerstoff. Deshalb ist Methan kein Faktor, der eine große Gefahr für das Klima darstellt.
2. CO<sub>2</sub> und Methan sind trotz allem nicht zu vernachlässigen und beeinflussen das Klima. Dem entgegen steht aber der stabilisierende Regelkreis des Wärmetransportes durch Wasser und Wasserdampf, der das Klima auf der Erde dominiert. Wasser reguliert den Wärmehaushalt der Erde. Je wärmer es auf der Erdoberfläche wird, desto mehr Wasser verdunstet, soweit es vorhanden ist. Das bedeutet eine stärkere Wolkenbildung und die Erhöhung der abgegebenen Strahlung in den Weltraum durch die Wolken, worauf die Temperatur auf der Erdoberfläche wieder sinkt.
3. Wenn wir ein angenehmes Klima in unseren Lebensräumen haben möchten, sollten wir eine vernünftige Wasserwirtschaft mit gesundem Menschenverstand betreiben.
4. Über die Klimadebatte wird ein neuer Ablasshandel installiert, bei dem das Klima zum Gott erhoben wird. Die Klimasimulation ist sein Prophet.
5. Während beim früheren Ablasshandel der katholischen Kirche durch die Übersetzung der Bibel in die deutsche Sprache, jedem normalen Menschen klar wurde, dass der Ablasshandel nicht haltbar war, ist der CO<sub>2</sub> Ablasshandel auch mit tiefgreifendem Fachwissen nicht mehr widerlegbar. Die Mächtigen dieser Erde können sich auf nicht nachvollziehbare Computersimulationen berufen und damit jede Diskussion beenden.
6. Die Navier-Stokes-Gleichung, eine wesentliche Gleichung in den Simulation von Fluiden, ist meiner praktischen Erfahrung nach sehr instabil. Selbst kleine Änderungen der Randbedingungen oder der Zeitschritte bei der Simulation, führen schnell zu völlig anderen Ergebnissen. Das macht die Navier-Stokes-Gleichung deswegen nicht falsch, aber es zeigt, dass Computersimulationen mit Vorsicht zu verwenden sind.
7. Die meisten Menschen sind keine Wissenschaftler, tragen aber genau so die Konsequenzen wie alle Menschen auf dieser Welt. Deswegen sollten alle Menschen gleichberechtigt mitentscheiden, wie sie leben möchten. Das können sie aber nur, wenn sie die Konsequenzen ihrer Entscheidungen abschätzen können.
8. Schätzungen sind auch für Menschen nachvollziehbar, die keine Wissenschaftler sind. Sie helfen, Entscheidungen mit einem gesunden Menschenverstand zu treffen. Auf diese Weise ist es möglich, die gottgleiche Autorität von Computersimulationen zu hinterfragen.
9. Ein Problem liegt an der Frage, was wir unter Naturwissenschaft verstehen. Sehen wir Naturwissenschaft als gottgleiche Wahrheit, oder sehen wir sie lediglich als die Summe aller möglichen Experimente.

Ein weitere Sachverhalt sei hier genannt: Das Methan, das heute noch im Boden ist, wird irgendwann in einer Naturkatastrophe an die Erdoberfläche kommen. Das Erdöl, was heute noch im Boden ist, wird auf natürliche Weise aus dem Boden aufsteigen und die Meere verseuchen. Auch die Kohleflöze, die heute noch im Boden sind, werden irgendwann an die Erdoberfläche Treten und sich dann selbst entzünden. Die Kalksteingebirge, die über die Plattenbewegungen der Erde irgendwann in das Erdinnere gezogen werde, werden irgendwann als gigantische CO<sub>2</sub>-Eruptionen aus der Erde treten. Warum sage ich das? Vielleicht sollten wir Menschen akzeptieren, dass wir nicht die Welt erschaffen haben und nur wenig kontrollieren können. Vielleicht hilft uns das, mit mehr Demut und Wertschätzung aufeinander zuzugehen, anstatt uns gegenseitig herumzukommandieren und die Welt zur Handelsware zu machen.