Atmosphären- und Klimawissenschaften > Vol.14 No.4, Oktober 2024

CO_2 Rückstrahlungs-Empfindlichkeitsstudien unter Labor- und Feldbedingungen

Übersetzung ins Deutsche mit Unterstützung von deepl.com

https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=136478

Ernst Hammel, Martin Steiner, Christoph Marvan, Matthias Marvan, Klaus Retzlaff, Werner Bergholz, Axel Jacquine
International Climate Research, A Citizen Research Group, Vienna, Austria.
DOI: 10.4236/acs.2024.144025 **PDF** **HTML** **XML** **84** Downloads **508** Views

Abstract

Wir haben die IR-Rückstrahlung mit einem relativ kostengünstigen Versuchsaufbau und einer Testkammer mit steigenden CO_2 -Konzentrationen gemessen, beginnend mit einer reinen N_2 -Atmosphäre vor einem temperaturkontrollierten schwarzen Referenzhintergrund. Die Ergebnisse bestätigen die Schätzungen in dieser Arbeit und frühere Erkenntnisse über die CO_2 -induzierte Sättigung der Infrarotstrahlung unter realistischen atmosphärischen Bedingungen. Wir haben diesen Aufbau auch verwendet, um die thermische Verstärkung durch stärkere und seltenere Treibhausgase vor einem klaren Nachthimmel zu untersuchen. Unsere Ergebnisse und ihre Interpretation sind ein weiteres Indiz für eine kritischere Herangehensweise bei der Klimamodellierung und gegen eine monokausale Interpretation von Klimaindizes, die nur durch anthropogene Treibhausgasemissionen verursacht werden. Physikalische Grundlagen in Verbindung mit Messungen und Daten aus der Literatur lassen den Schluss zu, dass die CO_2 induzierte Infrarot-Rückstrahlung einem asymptotischen, logarithmischen Verhalten folgen muss, was auch in der Klimawandel-Gemeinschaft weitgehend akzeptiert wird. Die wichtige Frage der Klimasensitivität bei Verdoppelung der derzeitigen CO_2 Konzentrationen wird auf unter 1˚C geschätzt. Dieser Wert ist wichtig, wenn die Vereinten Nationen den Klimawandel als existenzielle Bedrohung betrachten und viele Regierungen eine rigorose Reduzierung der Netto-Treibhausgasemissionen anstreben, allen voran die ehrgeizige Europäische Union, die sich an den IPCC-Bewertungen orientiert und für 2030 eine Reduzierung um mehr als 55 % und für 2050 um bis zu 100 % anstrebt [1]. Aber vielleicht sollten sie auch auf die Experten hören [2] [3], die festgestellt haben, dass all diese Vorhersagen erhebliche Mängel in den grundlegenden Modellen, Daten und Auswirkungsszenarien aufweisen.

Schlüsselwörter

Klimawandel, Treibhausgase, CO_2 Rückstreuung, IR-Strahlung

Teilen und zitieren:

Hammel, E. , Steiner, M. , Marvan, C. , Marvan, M. , Retzlaff, K. , Bergholz, W. und Jacquine, A. (2024) CO_2 Back-Radiation Sensitivity Studies under Laboratory and Field Conditions. *Atmospheric and Climate Sciences*, **14**, 407-428. doi: 10.4236/acs.2024.144025.

1. Einleitung

Unsere Atmosphäre besteht hauptsächlich aus strahlungsinaktiven zweiatomigen Molekülen N_2 78,08% und O_2 20,95% des Volumens. Die restlichen 0,97% bestehen hauptsächlich aus Ar mit 0,93%, CO_2 mit 0,04% des Volumens und Spuren von Wasserstoff, Helium und anderen Edelgasen, Methan, Distickstoffoxid und Ozon. Ein variabler, aber strahlungsmäßig dominierender Teil ist Wasserdampf, der auf Meereshöhe durchschnittlich

etwa 1 Volumenprozent ausmacht. Treibhausmoleküle (GH) absorbieren die terrestrische IR-Strahlung, die von der Oberfläche als Folge der Erwärmung durch die einfallende Sonnenstrahlung abgegeben wird. Durch ihre Absorptionseigenschaften können sie die Wärme in der Atmosphäre zurückhalten und dafür sorgen, dass die globale Durchschnittstemperatur der Atmosphäre biologisches Leben ermöglicht. Dies ist allgemein als Treibhauseffekt bekannt. Die IR-aktiven Komponenten sind also Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Distickstoffmonoxid und Ozon, und zwar in abnehmender Reihenfolge ihrer Wirksamkeit aufgrund ihrer Konzentrationen.

Das Infrarot-IR-Transmissionsspektrum von CO_2 über eine Weglänge von 100 Metern ist in **Abbildung 1** gegen die Wellenzahl $1/\lambda = \nu/c$ (λ = Wellenlänge, ν = Frequenz, c = Lichtgeschwindigkeit) aufgetragen. Die Transmission T oder der Transmissionsgrad ist das Ausmaß, in dem die einfallende Strahlung bei jeder Wellenzahl von der Probe durchgelassen wird. Für lichtundurchlässige Medien ist T = 0 und für vollständig transparente Medien T = 1.

In reflexionsfreien Medien ist der Absorptionsgrad A = 1 - T (Transmissionsgrad) nach dem Kirchhoff'schen Gesetz, das auch die Propagierung der Gleichheit von langwelligem Emissionsgrad ε und Absorptionsgrad a_{lw} erlaubt.

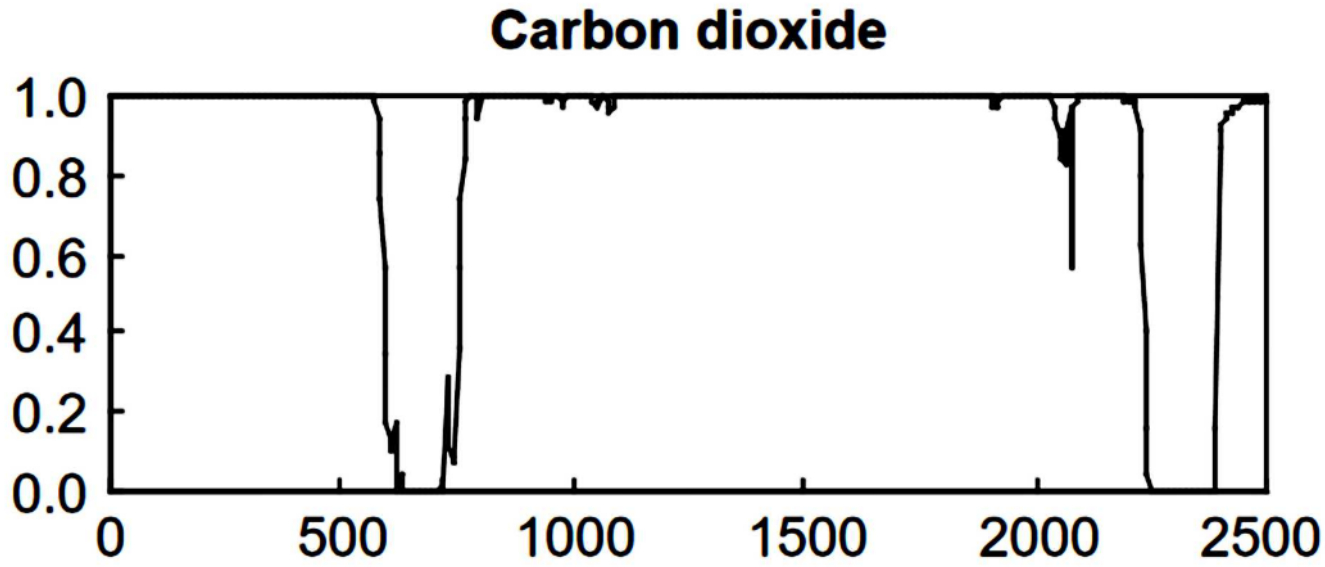


Abbildung 1. CO_2 IR-Durchlässigkeit über 100 Meter als Funktion der Wellenzahl aus HITRAN [4].

Das CO-Spektrum$_2$ wird von der Biegeschwingung bei 667 $^{cm-1}$, was einer Wellenlänge von 14,992 µm entspricht, und der asymmetrischen Streckungsmode bei 2349 $^{cm-1}$, was 4,257 µm entspricht, dominiert. Die zusätzlichen und sehr schwachen Banden entstehen durch weitere Anregungen und stellen sehr kleine Absorptionen dar, von denen sehr oft behauptet wird, dass sie deutlich ungenaue Berechnungen des GH-Effekts sind.

Die Oberfläche hat eine mittlere globale Temperatur von 288˚K, und ihre Emission wird bei dieser Temperatur durch einen schwarzen Körper angenähert, der aus einem kontinuierlichen Strahlungsspektrum besteht, im Gegensatz zu dem der GH-Gase, das für jede Molekülart spezifisch ist und aus diskreten Rotations-Schwingungs-Banden besteht. Die kontinuierliche Planck-Strahlung bzw. die Strahlung des schwarzen Körpers auf der Oberfläche wird durch die graue Kurve in **Abbildung 2** im Vergleich zu den Grenzen der orangefarbenen und roten Absorptionsbanden von CO_2 des GH-Hauptgases CO_2 dargestellt.

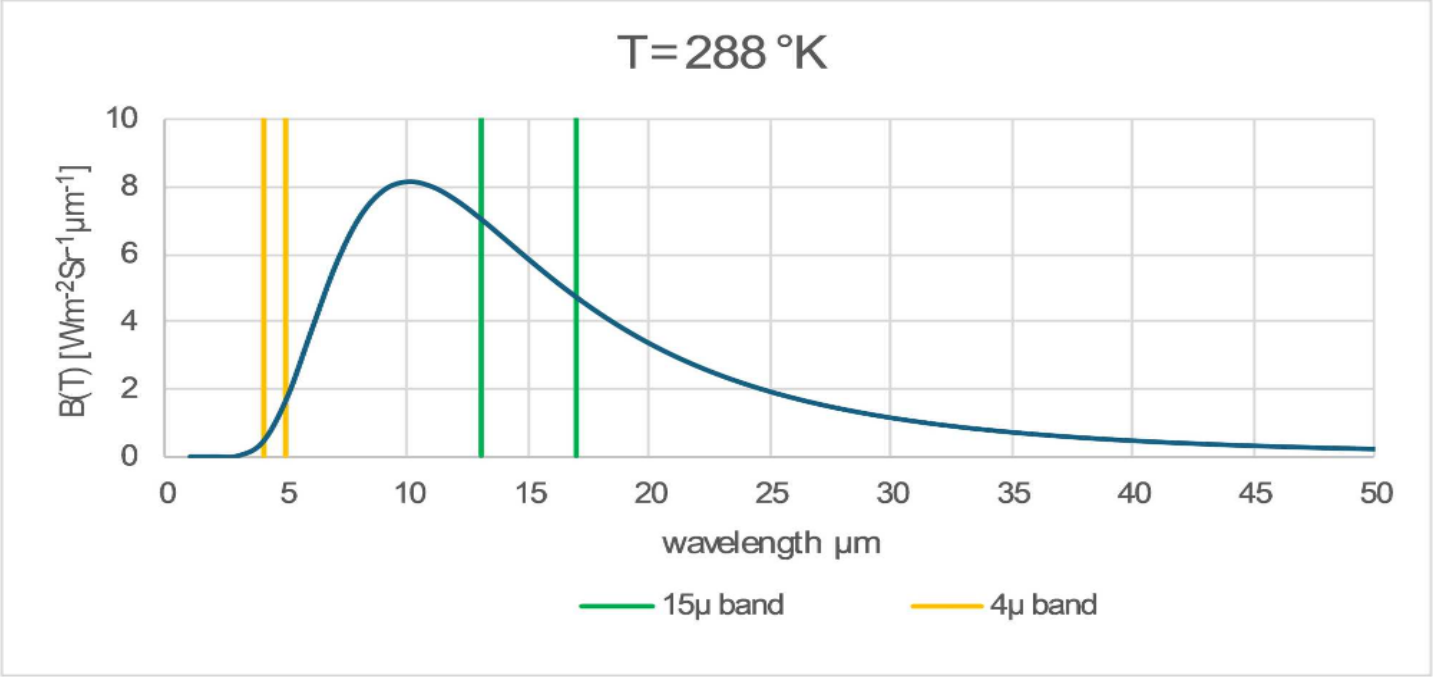


Abbildung 2. Schwarzer Körperstrahler bei T = 288˚K und die wichtigsten CO_2 Absorptionsbanden.

Der Beitrag der 15-µm- und der 4-µm-CO-Bande$_2$ zur gesamten IR-Absorption des schwarzen Körpers kann durch Integration von **Abbildung 1** mit einem groben Maximum von 25 % geschätzt werden, wobei der Hauptbeitrag von der 15-µm-Bande stammt.

Die Sonneneinstrahlung, die von unserer Atmosphäre aufgefangen wird, ist $\pi\ a^2\ S_0$, wobei α der Erdradius ist. Ein Teil α, die sogenannte planetarische Albedo, wird in den Weltraum reflektiert. Der restliche Teil wird absorbiert. Im langjährigen Mittel über die gesamte Erdoberfläche muss die absorbierte Sonnenstrahlung mit der von der Atmosphäre abgegebenen Strahlung im Gleichgewicht sein. In einem sehr vereinfachten 2D-Modell erhalten wir nach Stefan-Boltzmann

$$(1 - \alpha)\ S\ /4 =_0 \sigma\ T^4\ E$$

$$(1-\alpha)\frac{S_0}{4} = \sigma T_E^4$$

(1)

wobei T_E die theoretische Emissionstemperatur ohne atmosphärischen Treibhauseffekt ist. Unter der Annahme, dass im Durchschnitt α = 0,3 ist, ergibt sich T_E = 255˚K, eine Temperatur, die viel niedriger ist als die beobachtete globale durchschnittliche Oberflächentemperatur von T_S = 288˚K. Das bedeutet, dass der natürliche Treibhauseffekt zu einem zusätzlichen ΔT_{GH} = 33˚K führt, was folgenden Werten entspricht

$$\sigma\ T^4_S - \sigma\ T^4_E = 150\ \mathrm{W}\ /\ m\ 2$$

$$\sigma T_S^4 - \sigma T_E^4 = 150 \mathrm{W/m^2}$$

(2)

Eine detaillierte Auswertung der Planck-Funktion für T_S = 15˚C oder 288˚K ergibt die jeweiligen Absorptionsbanden.

13,26 - 17,07 µm (15-µ-Band), in Energiedichten von $9{,}22 \times 10^{-7}$ J/m^3 oder 17,6 % der Gesamtemission oder $6{,}95 \times 10^{13}$ Photonen pro m^3.

4,19 - 4,38 µm (4 µ-Band), mit einer Energiedichte von $5{,}72 \times 10^{-9}$ J/m^3, was 0,11 % der Gesamtemission oder $1{,}22 \times 10^{11}$ Photonen pro m^3 entspricht.

Aus den obigen Überlegungen geht hervor, dass nur das 15-µ-Band von Bedeutung ist und die IR-Absorption auf $0{,}176 \times 391$ W/m^2 = 69 W/m^2 und die Rückstrahlung auf 69/2 = 34,5 W/m^2 begrenzt ist. Vereinfachte Überlegungen zur Energiebilanz in einer einzelnen atmosphärischen Schicht sind in der folgenden Zeichnung skizziert. Siehe **Abbildung 3**.

Mit $\varepsilon = 1$ erhalten wir

$$\sigma T =^4_S U = 2\,\sigma T = 2^4_A\,\sigma T^4_E$$

$$\sigma T_S^4 = U = 2\sigma T_A^4 = 2\sigma T_E^4$$

(3)

und

$$_S^4 = T^- \sqrt{}\, 4 \cdot T_E$$

$$T_S = \sqrt[4]{2} \cdot T_E$$

(4)

Mit T_E = 255˚K erhalten wir also T_S = 303˚K. Dieser Wert ist deutlich höher als die beobachteten 288˚K. Die Diskrepanz zwischen Theorie und Beobachtung erklärt sich aus der Tatsache, dass die Atmosphäre für langwellige Strahlung nicht völlig undurchlässig ist. Durch das Vorhandensein der Atmosphäre steigt die Temperatur an der Erdoberfläche erheblich an. Es ist bekannt, dass dieser Effekt als Treibhauseffekt bezeichnet wird. Wir gehen nun davon aus, dass die Atmosphäre halbgrau ist, d. *h*. sie absorbiert einen konstanten Anteil ε der langwelligen Strahlung, ist aber immer noch transparent für die Sonnenstrahlung und emittiert nach oben und unten mit einer Rate, die durch

$$= B\varepsilon\,\sigma T =^4_A \varepsilon / (2 - \epsilon)\,\sigma T^4_E$$

$$B = \varepsilon\sigma T_A^4 = \frac{\varepsilon}{2-\epsilon}\sigma T_E^4$$

(5)

wobei σT^4_A

ist der Strahlungsenergiegehalt der Atmosphäre. Dies führt zu

$$_S^4 = T\sqrt{}\, 2 / (2 - \epsilon) \cdot T_E$$

$$T_S = \sqrt[4]{\frac{2}{2-\epsilon}} \cdot T_E$$

(6)

Mit ε = 0,78 erhalten wir dann T_S = 288˚K. Daraus können wir schließen, dass in diesem vereinfachten Modell nur 22 % oder 42,8 W/m^2 der IR-Strahlung direkt in den Weltraum gelangen und eine Nettostrombilanz von 152 W/m^2 - wie aus (2) zu erwarten - als Teil der rückgestreuten Strahlung permanent recycelt wird.

Für geeignetere mehrschichtige Atmosphären können wir das Bild von der American Chemical Society übernehmen (**Abbildung 4**).

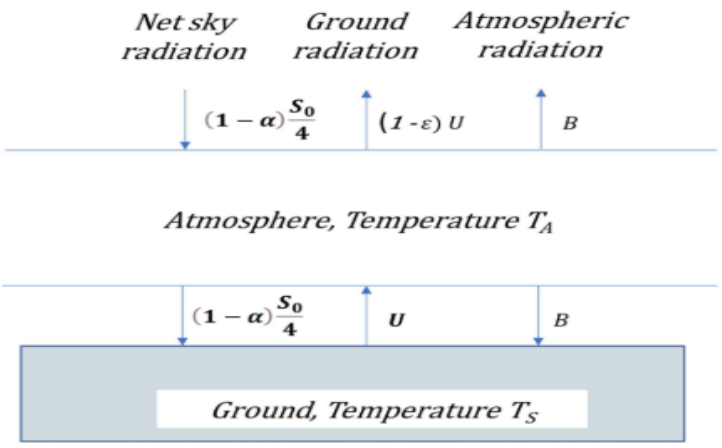


Abbildung 3. Ein Einschichtmodell der Atmosphäre, wobei *S* die solare Bestrahlungsstärke, α die Wolkenalbedo und β die Oberflächenabsorption ist. *U* ist die terrestrische Strahlung, von der ein Teil (1 - ε) direkt durch die Atmosphäre in den Weltraum eindringt, und *B* ist die von der Atmosphäre emittierte Strahlung [5].

Anstelle von geschichteten Atmosphärenmodellen gibt es hervorragende halbempirische Formeln, die verwendet werden können. Der Nachthimmel wird durch Wolken und Feuchtigkeit gegen Strahlungsverluste abgeschirmt, während klare und trockene Bedingungen starke Strahlungsverluste nicht kompensieren können. Dies wurde z. B. mit dem modifizierten Swinbank-Modell untersucht [7] [8].

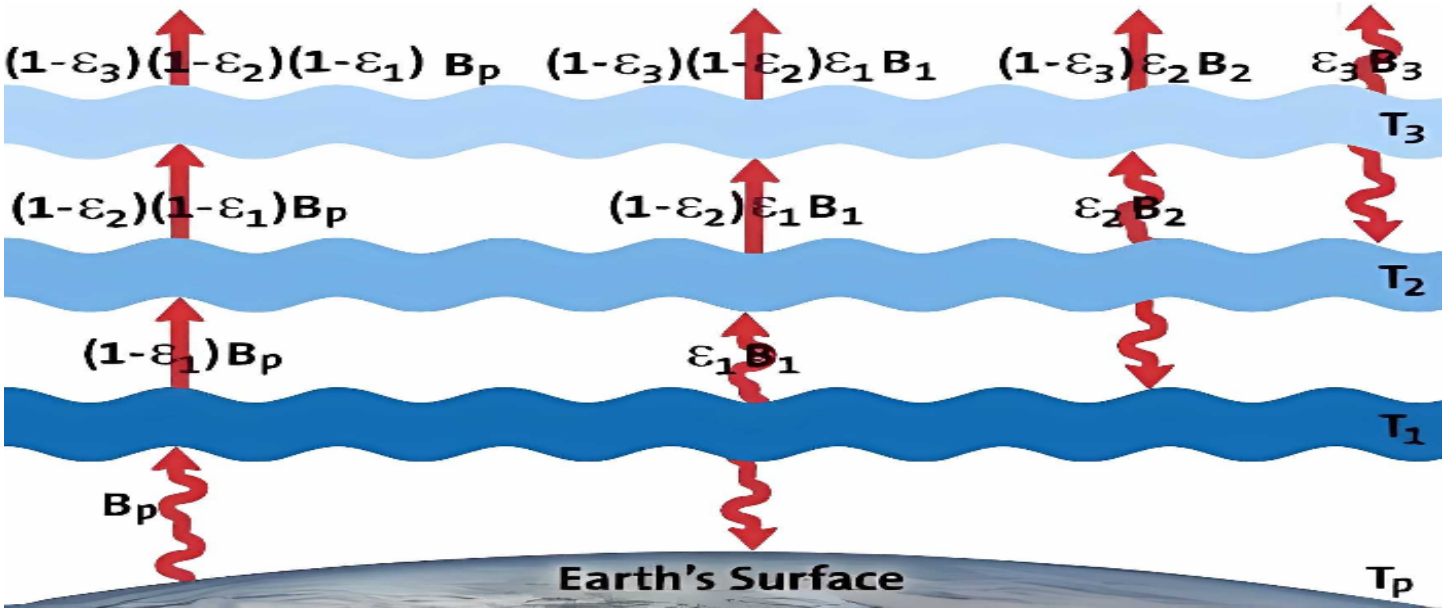


Abbildung 4. Ein mehrschichtiges Atmosphärenmodell, hier mit drei Schichten [6].

$$_{SB} + 1\ (=PK\,C)^2 \cdot 8.78 \cdot 10^{-13} \cdot T_S^{5.852} \cdot R\,H^{0.07195}$$

$$P_{SB} = \left(1 + KC^2\right) \cdot 8.78 \cdot 10^{-13} \cdot T_S^{\,5.852} \cdot RH^{0.07195}$$

(7)

mit

P_{SB} aufwärts und abwärts gerichtete atmosphärische Strahlung in $^{W/m2}$

K 0,34 Wolken < 2 km, 0,18 für 2 km < Höhe < 5 km, 0,06 für >5 km

C Bewölkung (0 klarer Himmel, 1 bedeckter Himmel)

T Temperatur in ˚K

RH relative Luftfeuchtigkeit in %

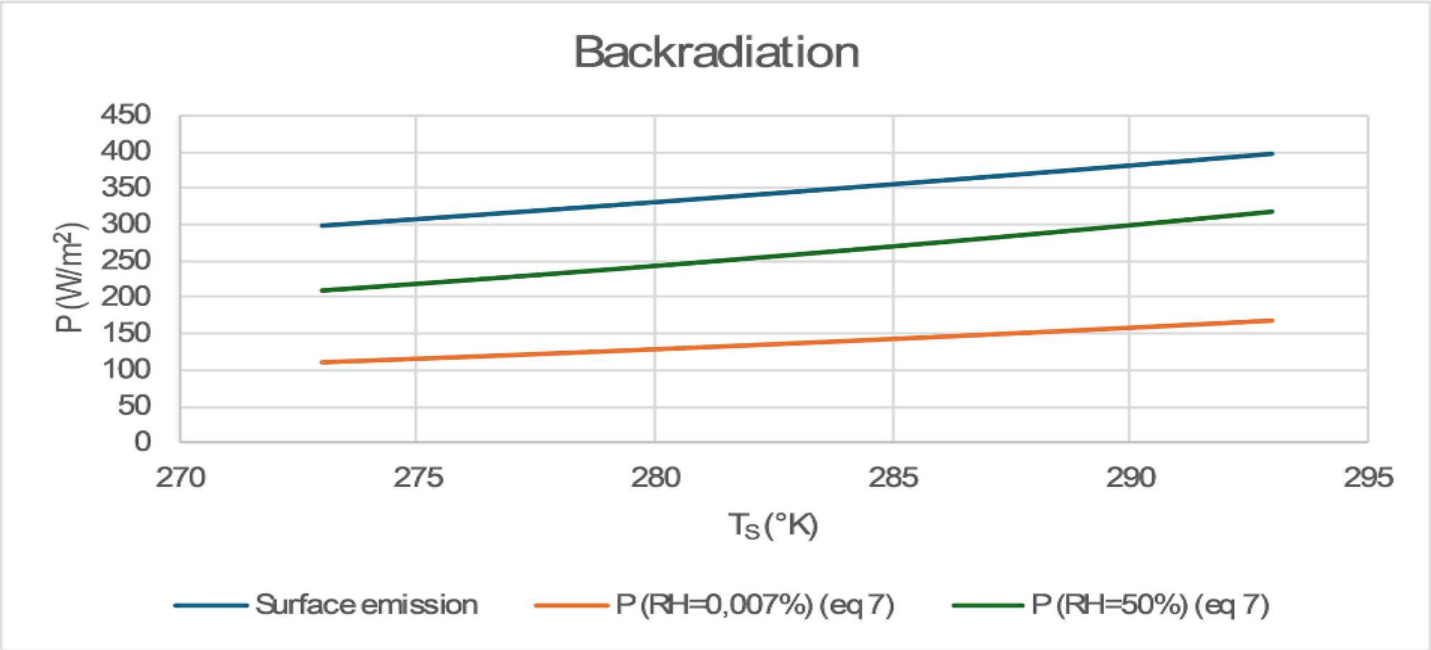
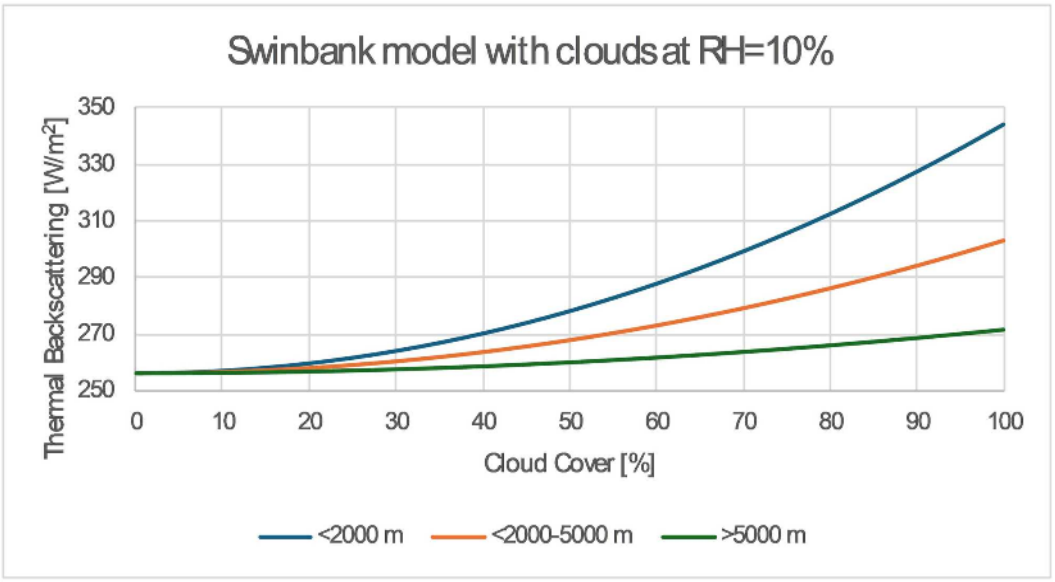


Abbildung 5. Die Wirkung der Luftfeuchtigkeit auf die Rückstrahlung im Vergleich zwischen RH = 0,007% und RH = 50%. Die blaue Linie ist die Oberflächenstrahlung bei einem Emissionsgrad $\varepsilon_S \cong 0{,}95$ nach Stefan-Boltzmann.

Wie in **Abbildung 5** zu sehen ist, hat die Luftfeuchtigkeit einen starken Einfluss und die Wolkenbedeckung einen noch stärkeren Einfluss auf die Rückstrahlung.



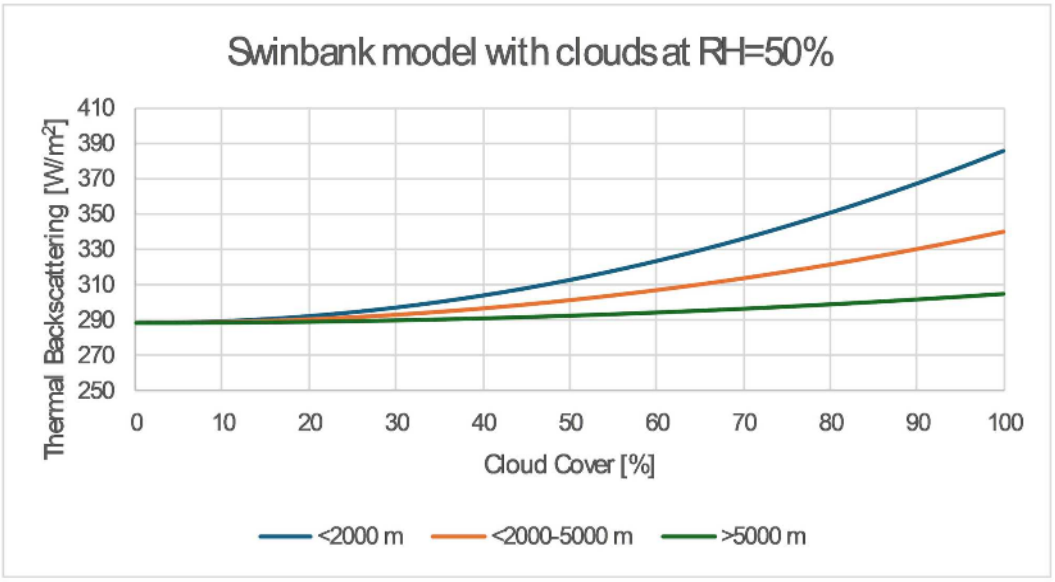


Abbildung 6. Thermische Rückstrahlungseigenschaften des bewölkten Himmels bei RH = 10 % und RH = 50 %.

Die letzten Abbildungen (**Abbildung 6**) zeigen, dass die Klimavorhersagen entscheidend von Werten wie der durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit, der Wolkenbedeckung und der Albedo abhängen. Diese Werte variieren je nach lokaler Temperatur und geografischen Details erheblich über die Oberfläche. Gitternetzmodelle können solche Werte nur bis zu einem gewissen Grad über die Jahre der Beobachtungen hinweg berücksichtigen. Instabilitäten und Risiken aufgrund einer fehlerhaften Modellierung der positiven Rückkopplungsschleife und/oder der Vernachlässigung externer geo- oder astrophysikalischer Einflüsse sind offensichtlich.

Daten aus Bodenmessungen (**Abbildung 7**) zeigen, dass die Abwärtsstrahlung (Rückwärtsstrahlung) der Atmosphäre in der Tat eine vollständige Sättigung der IR-CO-Bänder$_2$ zeigt und keine spürbare zusätzliche thermische Verstärkung (TF) durch zunehmendes CO_2 in der unteren Atmosphäre unterstützt. Sie zeigt eine fast vollständige Sättigung des zentralen 15-µ-Peaks und eine annähernde Sättigung der umliegenden 15-µ-Bandenränder. Frühere Studien [10] kamen ebenfalls zu dem Schluss, dass die TF durch einen weiteren Anstieg des atmosphärischen CO_2 nicht wesentlich beeinflusst wird (**Abbildung 8**). Andererseits ist bekannt, dass Konzentrationen unter 50 % des derzeitigen Niveaus schädlich für das Pflanzenwachstum und das Klima wären.

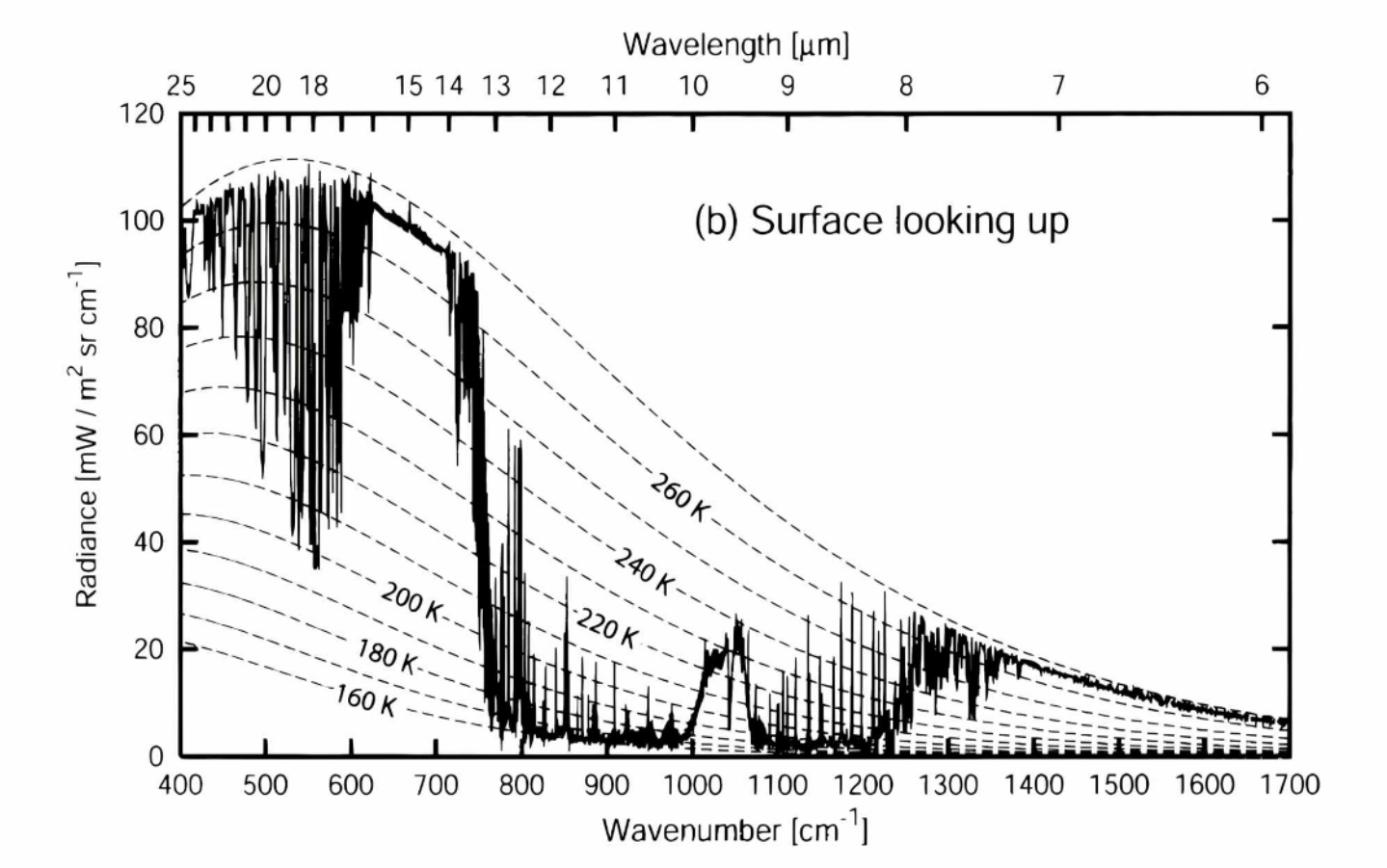


Abbildung 7. Messungen [9] des Infrarot-Emissionsspektrums der wolkenfreien Atmosphäre an der arktischen Oberfläche mit Blick nach oben.

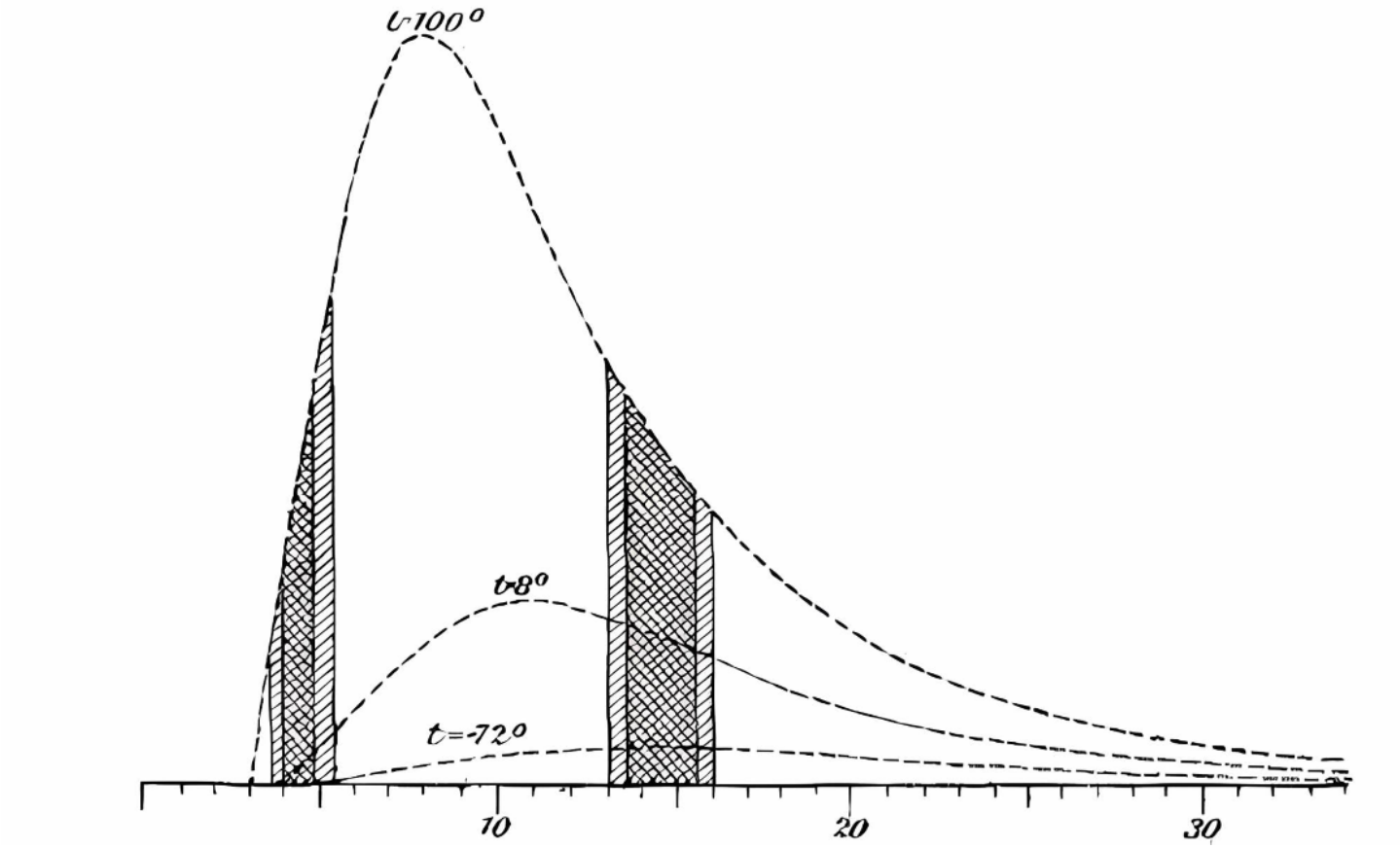


Abbildung 8. Studien von J. Koch in der physikalischen Abteilung von Knut Angström [10].

Die wellenlängenabhängige Absorption $a\,\lambda$

und die Re-Emission wird nach dem Beers'schen Gesetz berechnet, wonach die Transmission mit zunehmender Absorberdicke L exponentiell abnimmt

$$ {}_{\lambda}a\,(\,L\,) = \;1\text{-}\;t\,({}_{\lambda}\,L\,) = \;1\text{-}\;I\,({}_{\lambda}\,L\,)\,/I\,(\,0\,) = {}_{\lambda}\;\;1\text{-}\;e^{-k(\lambda,L)} $$

$$ a_{\lambda}\left(L\right) = 1 - t_{\lambda}\left(L\right) = 1 - \frac{I_{\lambda}\left(L\right)}{I_{\lambda}\left(0\right)} = 1 - e^{-k(\lambda,L)} $$

(8)

Nach dem Kirchhoff'schen Gesetz muss die absorbierte Strahlung wieder emittiert werden, oder anders ausgedrückt, das Absorptionsvermögen muss dem Emissionsvermögen entsprechen. Für ein begrenztes Wellenlängenfenster $\Delta\lambda$ wird der spezifische Emissionsgrad $\varepsilon_{\Delta\lambda}\,(L)$ daher wie folgt berechnet

$$ \varepsilon_{\Delta\lambda}\left(L\right) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda}\left(0\right)\cdot a_{\lambda}\left(L\right) d\lambda}{\int_{0}^{\infty} I_{\lambda}\left(0\right) d\lambda} $$

(9)

wobei der spektrale Extinktionskoeffizient a_{λ} wird von HITRAN oder ähnlichen Datenbanken bezogen.

Die Bedeutung der ungesättigten Ränder im 15-µ-Band wird stark überschätzt, denn es lässt sich leicht zeigen, dass sie bei einer Extinktion < 3 nur 0,17 % zum gesamten Band beitragen, wenn wir ihre jeweiligen Integrale betrachten (**Abbildung 9**). Dies wurde auch von Howard [11] gezeigt und in dieser Studie weiter verwendet.

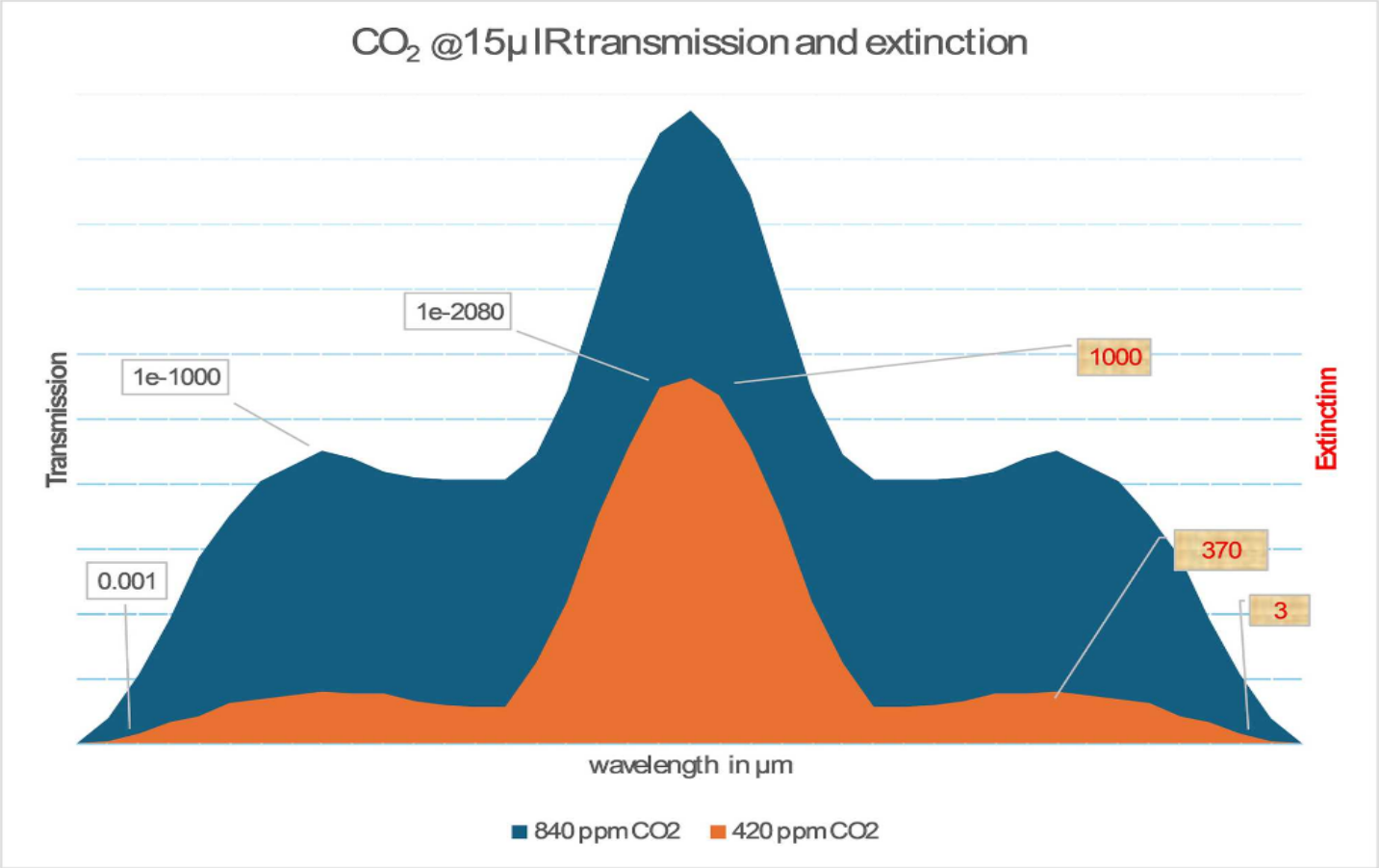


Abbildung 9. Transmissions- und Extinktionsverhältnisse im 15-µ-Band.

Die Infrarotspektren (IR) der vier wichtigsten GH-Gase über eine Weglänge von 100 Metern sind in **Abbildung 10** dargestellt, wobei die Konzentrationen denen der Atmosphäre auf Meereshöhe bei 45 % relativer Luftfeuchtigkeit entsprechen.

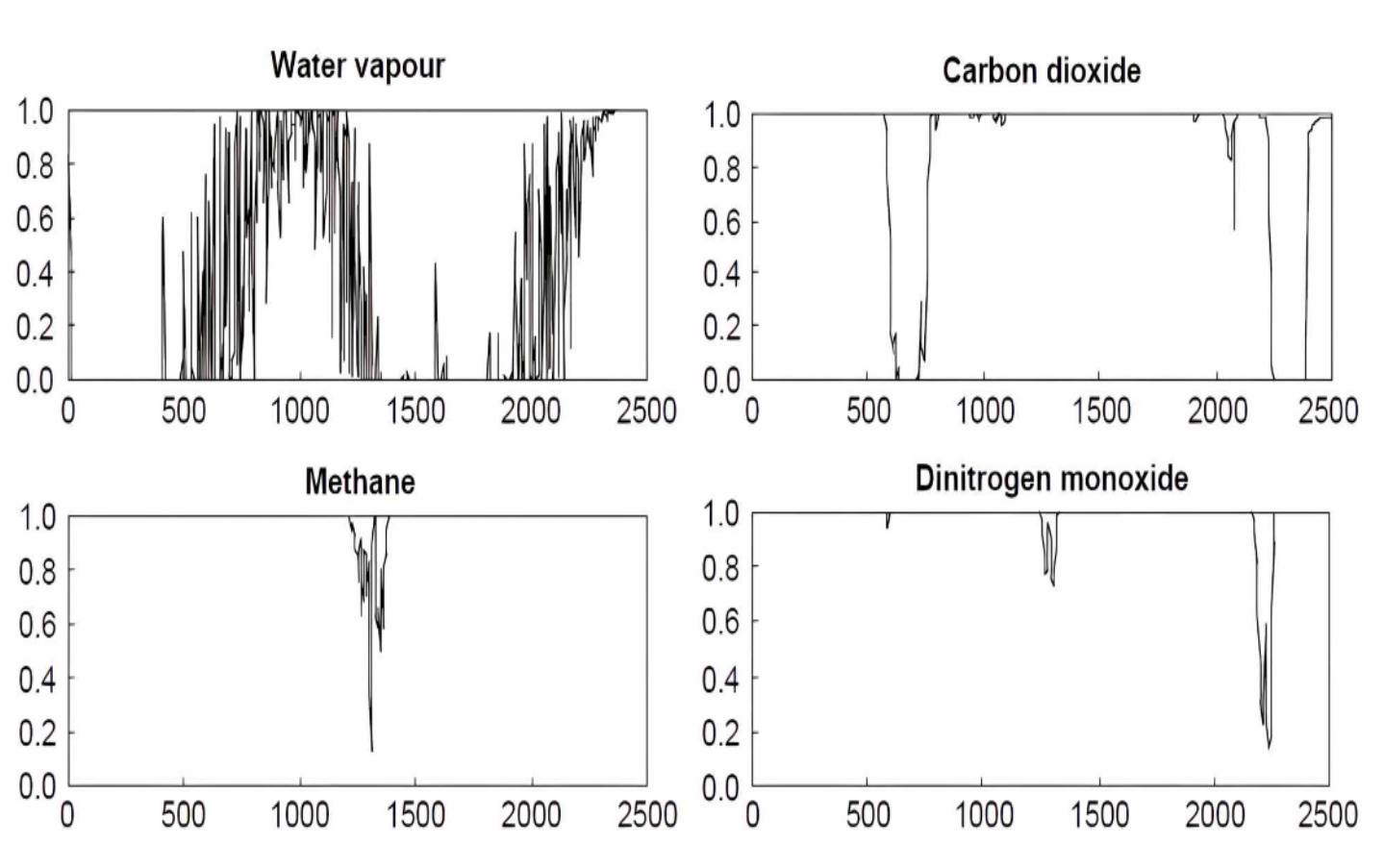


Abbildung 10. Infrarotspektren der wichtigsten Treibhausgase, berechnet anhand der HITRAN-Datenbank; die Transmission ist gegen die Wellenzahl ($^{cm-1}$) aufgetragen [4].

Die 0 - 500 $^{cm-1}$ Bande von H_2 O bei 45% RH absorbiert 66% der IR-Strahlung der Oberfläche. Die 1300 - 1800 $^{cm-1}$ Bande absorbiert weitere 1%.

Eine Atmosphäre mit einem Druck von 1 bar hätte eine theoretische Dicke von 8,2 km. Zur Veranschaulichung der effektiven Säulenhöhe des aktuellen CO_2 in verschiedenen Höhen erhalten wir die folgende **Tabelle 1**.

Tabelle 1. Äquivalent von 400 ppm atmosphärischem CO_2 in Metern bei 1 bar atmosphärischem Druck.

H [m]	**M(z)/M**	**1-M(z)/M**	**L_{CO2}^{up} [cm]**	**L_{CO2}^{down} [cm]**
0	0	1	344,83	0
500	0,06893722	0,93106278	321,06	23,77
1.000	0,1331221	0,8668779	298,93	45,9
5.000	0,51045834	0,48954166	168,81	176,02
10.000	0,76034896	0,23965104	82,64	262,19
20.000	0,94256738	0,05743262	19,8	325,03
30.000	0,98623621	0,01376379	4,75	340,08
40.000	0,99670149	0,00329851	1,14	343,69
¥	1	0	0	344,83

wobei wir die höhenabhängige Masse *M* aus der barometrischen Formel erhalten

$$[Mz\ ]\ /M = 1 - e^{\ -z/H}$$

$$\frac{M[z]}{M} = 1 - e^{-\frac{z}{H}}$$

(10)

mit H = 7 km. Die Gesamtmasse unterhalb der Höhe z wird berechnet als

$$(Mz) = \int_0^z \rho(z')\, dz' = \rho(0) H (1 - e)^{-zH}$$

$$M(z) = \int_0^z \rho(z')\, dz' = \rho(0) H \left(1 - e^{-\frac{z}{H}}\right)$$

(11)

Die Dicke der CO -Schicht$_2$ L_{CO2} ist ein berechneter Wert für eine Standardatmosphäre bei 1013,25 hPa und einem Gesamtgewicht von 5,13 × ^{1015} Tonnen Luft in 8,21 km Höhe bei derzeit 400 ppm. Die Tabelle hilft, die Größenordnung bei der Untersuchung der atmosphärischen Treibhauseffekte von CO_2 zu verstehen. Sie zeigt auch, dass 75 % des gesamten CO_2 in der Troposphäre unterhalb von 10 km Höhe und 95 % unterhalb von 20 km enthalten sind. Würde man das gesamte CO_2 (bei 400 ppm) einer 8,2 km dicken Atmosphäre mit einem Druck von 1 bar in einer einzigen Säule konzentrieren, so würde die Höhe der Säule etwa 3,5 m betragen. Die optische Weglänge der IR-Strahlung von CO_2 beträgt unter diesen Bedingungen weniger als 1 cm, so dass bereits bei den derzeitigen Konzentrationen eine vollständige Sättigung zu erwarten ist.

Aus der Thermodynamik ergibt sich

$$dT/dz = (\gamma - 1)/\gamma \; m\, g / R$$

$$\frac{dT}{dz} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} mg \Big/ R$$

(12)

wobei $\gamma = c_P / c_v$ (z.B. 7/5 für trockene Luft), m = 29 g/mol und R die Gaskonstante ist. Für die internationale Standardatmosphäre mit γ = 1,26 erhalten wir dT/dz = - 6,5 dK / km . Mit dieser Formel können wir die LW-Rückstrahlung in größeren Höhen abschätzen (**Abbildung 11**), wenn wir $Ts \rightarrow Ts - dT/dz \times \Delta z$.

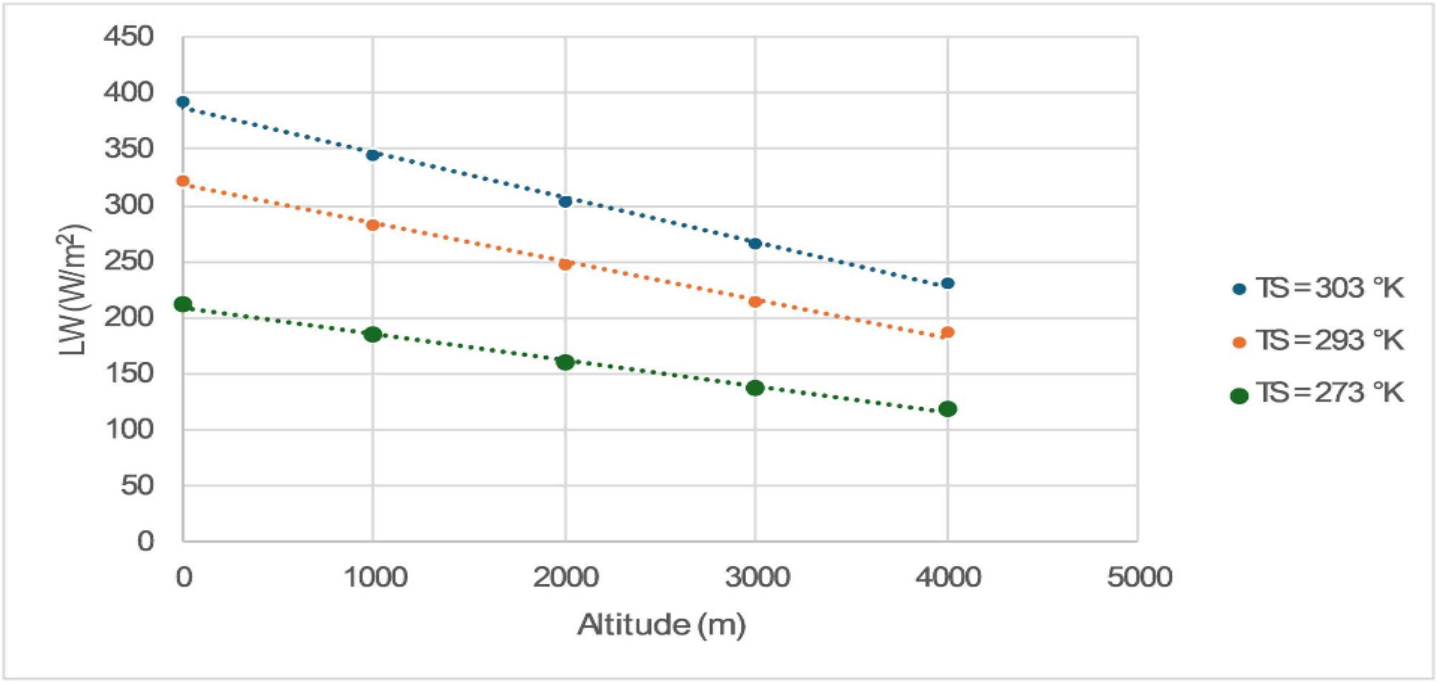


Abbildung 11. Geschätzte Rückstrahlung in einer Standardatmosphäre bei drei verschiedenen Oberflächentemperaturen.

Dies kann mit den Messungen einer Gruppe der ETH Zürich aus dem Jahr 1998 verglichen werden (**Abbildung 12**).

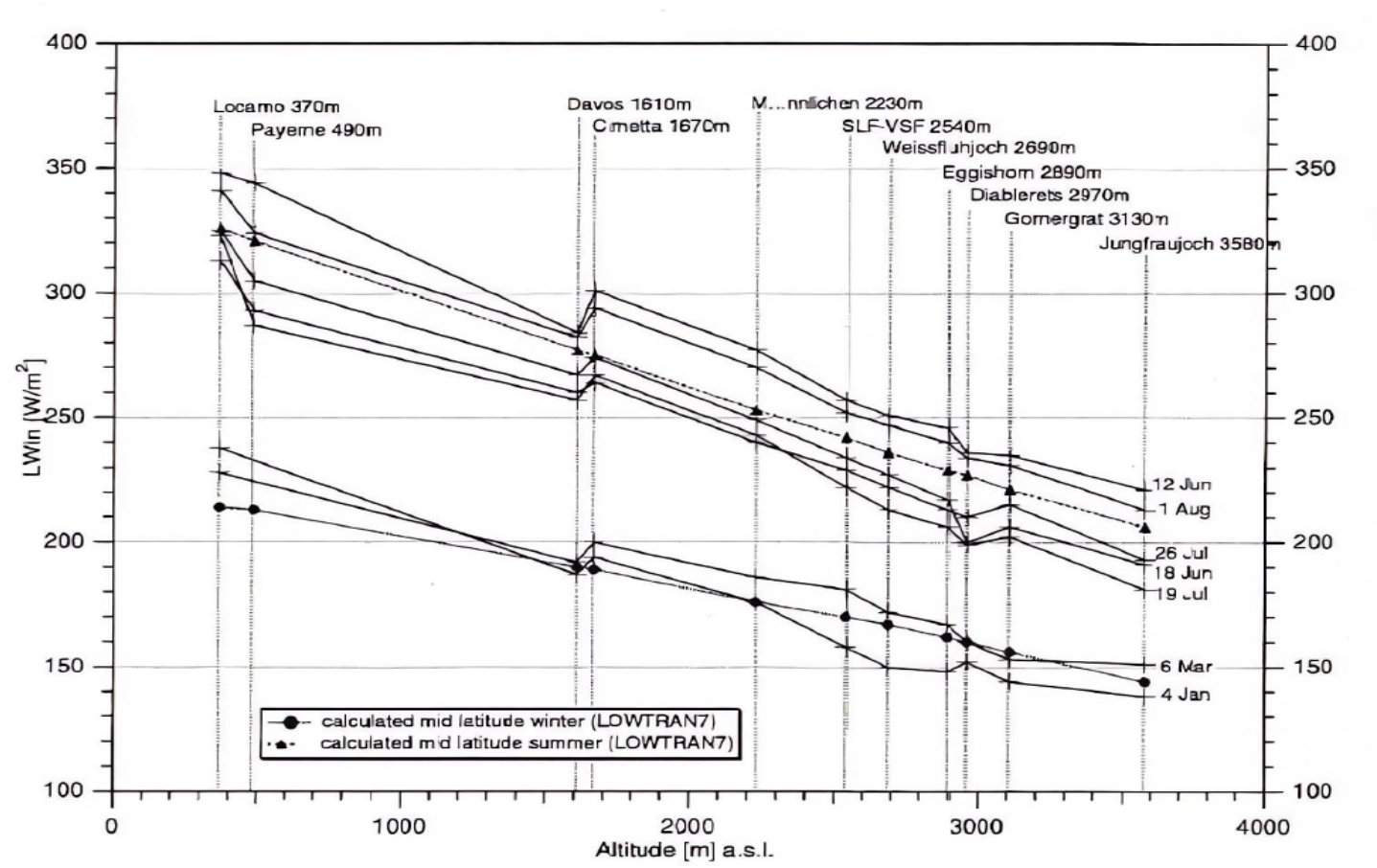


Abbildung 12. Höhenabhängigkeit der Rückstrahlung mit freundlicher Genehmigung von C. Fröhlich [12].

Das Absorptionsvermögen *a* kann mit Hilfe des Beer'schen Gesetzes für einen Infrarotstrahler aus Gleichung (8) in einer allgemeineren Form berechnet werden.

$^{-k.c.L}a\ (\ c\ ,\ L\ )=\ 1-\ t\ (\ c\ ,\ L\ )=\ 1-\ I\ (\ c\ ,\ L\ )\ /I\ (\ c\ ,\ 0\ )=\ 1-\ e$ xml-ph-0033@deepl.inte

$$a(c,L)=1-t(c,L)=1-\frac{I(c,L)}{I(c,0)}=1-e^{-k.c.L}$$

(13)

Aus Akram [13] können wir k = 1,82 × $^{10\text{-}6\ \text{ppm-1cm-1}}$ erhalten, um a als Funktion von L zu berechnen.

Abbildung 13 zeigt die Sättigung der IR-Absorption bei den derzeitigen CO_2 -Werten bereits bei einer Luftsäulenlänge von weniger als 20 m. Aus diesem einfachen Modell müssen wir schließen, dass andere Mechanismen als der CO_2 -Anstieg eine signifikante atmosphärische Wärmeverstärkung (ATE) im Gesamtenergiehaushalt erklären müssen.

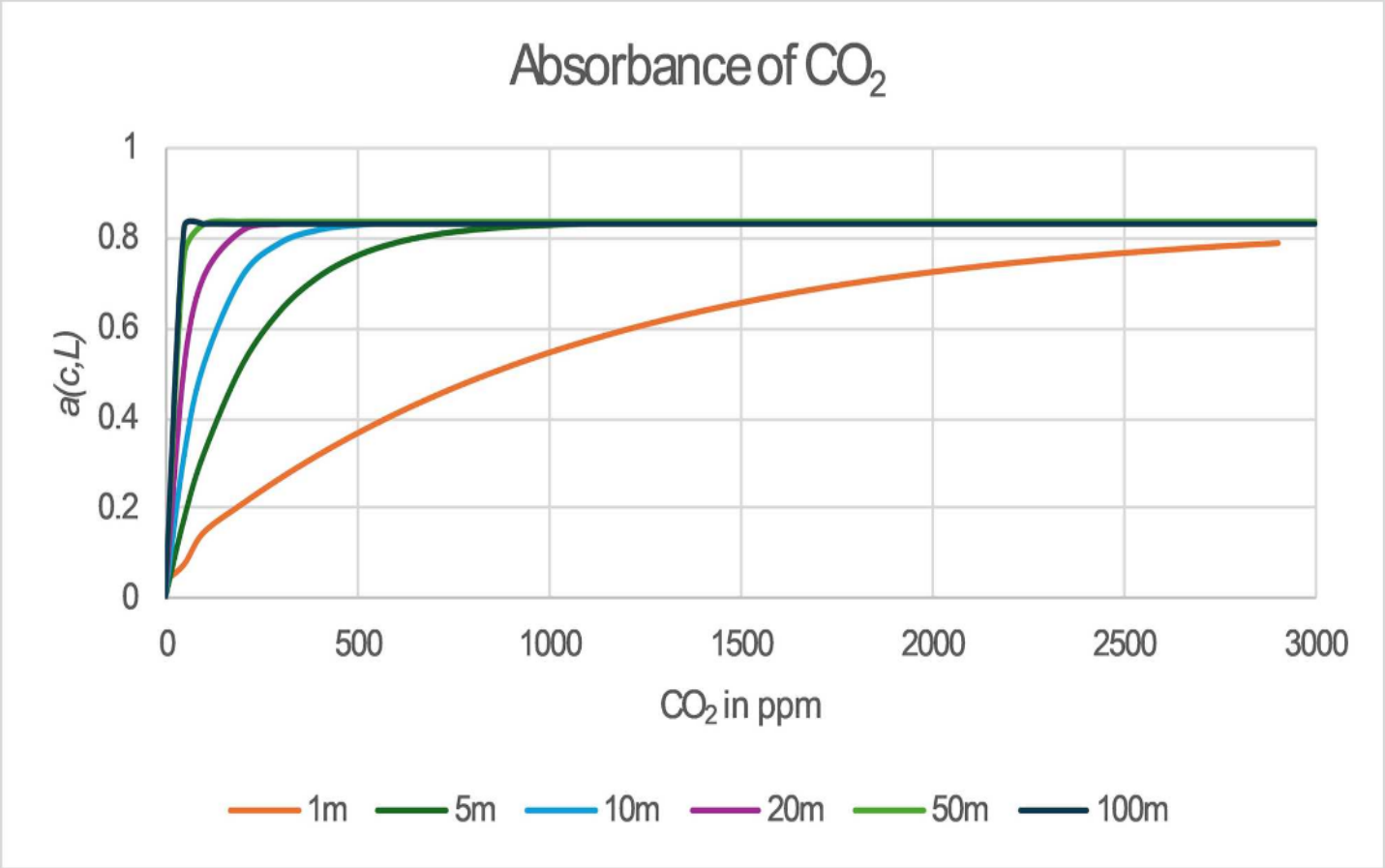


Abbildung 13. Absorption der IR-Lichtquelle EMIRS200 in CO_2 von [13].

Howards [11] parametrisiert die Gesamtabsorption der starken Linien bei 15 µm und 4,3 µm nach

$$\int A\ \nu\ d\ \nu = C + D\ \log\ w + K\ \log\ (\ p + P\ )$$

$$\int A_\nu d\nu = C + D\log w + K\log\left(p + P\right)$$

(14)

und

$$=A\int A_\nu\ d\ \nu\ /(\nu_2\ -\ \nu\ )_1$$

$$\bar{A} = \frac{\int A_\nu d\nu}{\nu_2 - \nu_1}$$

(15)

Setzt man diese Werte für ν_2 - ν =$_1$ 250 cm^{-1} im 15-µm-Band und ν_2 - ν =340$_1$ cm^{-1} für das 4,3-µm-Band ein, so erhält man für eine atmosphärische Standardschicht von 1 km Dicke (**Abbildung 14**) und für eine 8,2 km dicke Atmosphäre (**Abbildung 15)** die Werte, die für **Tabelle 2** verwendet wurden.

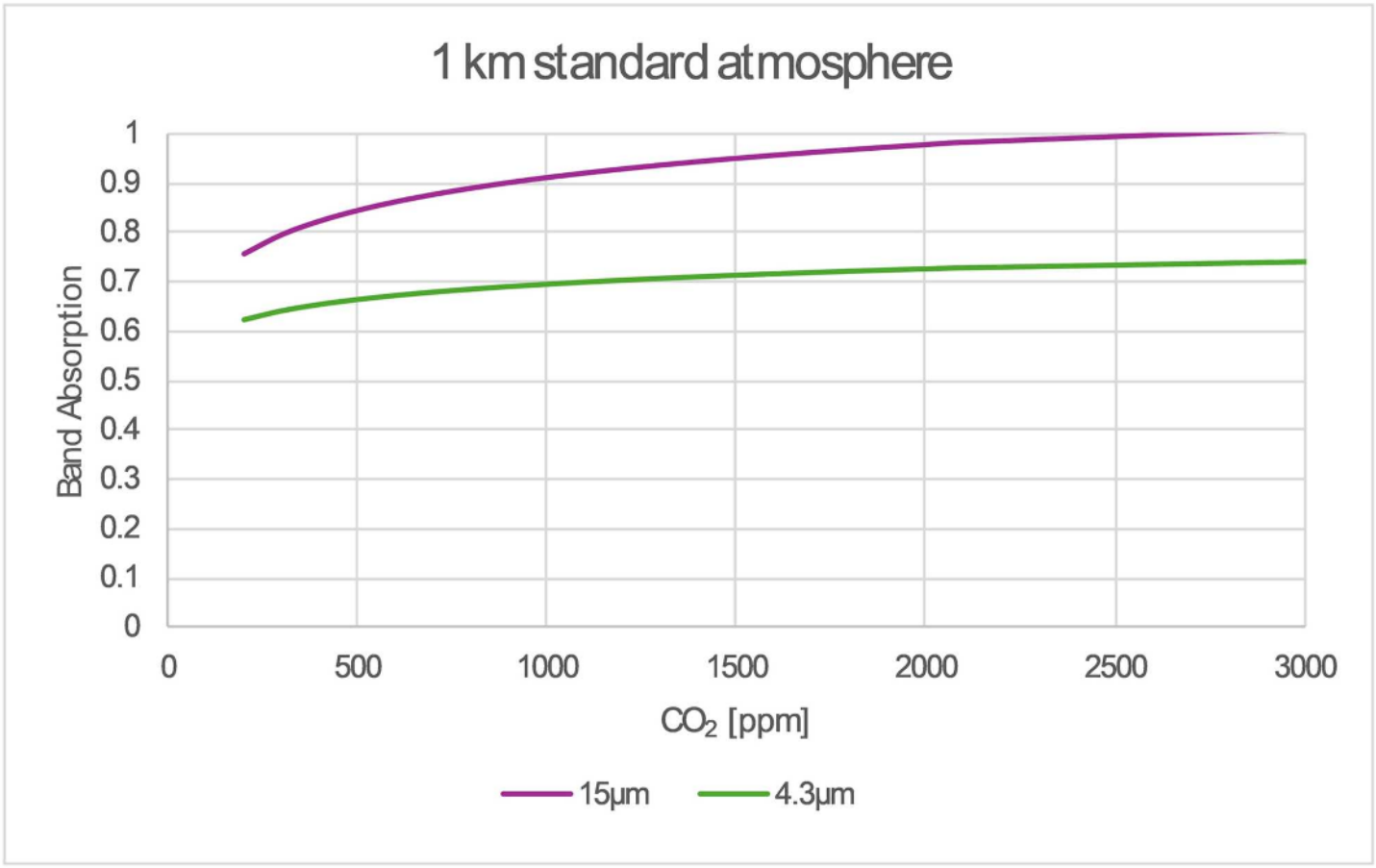


Abbildung 14. Bandabsorption in 1 km Standardatmosphäre [11].

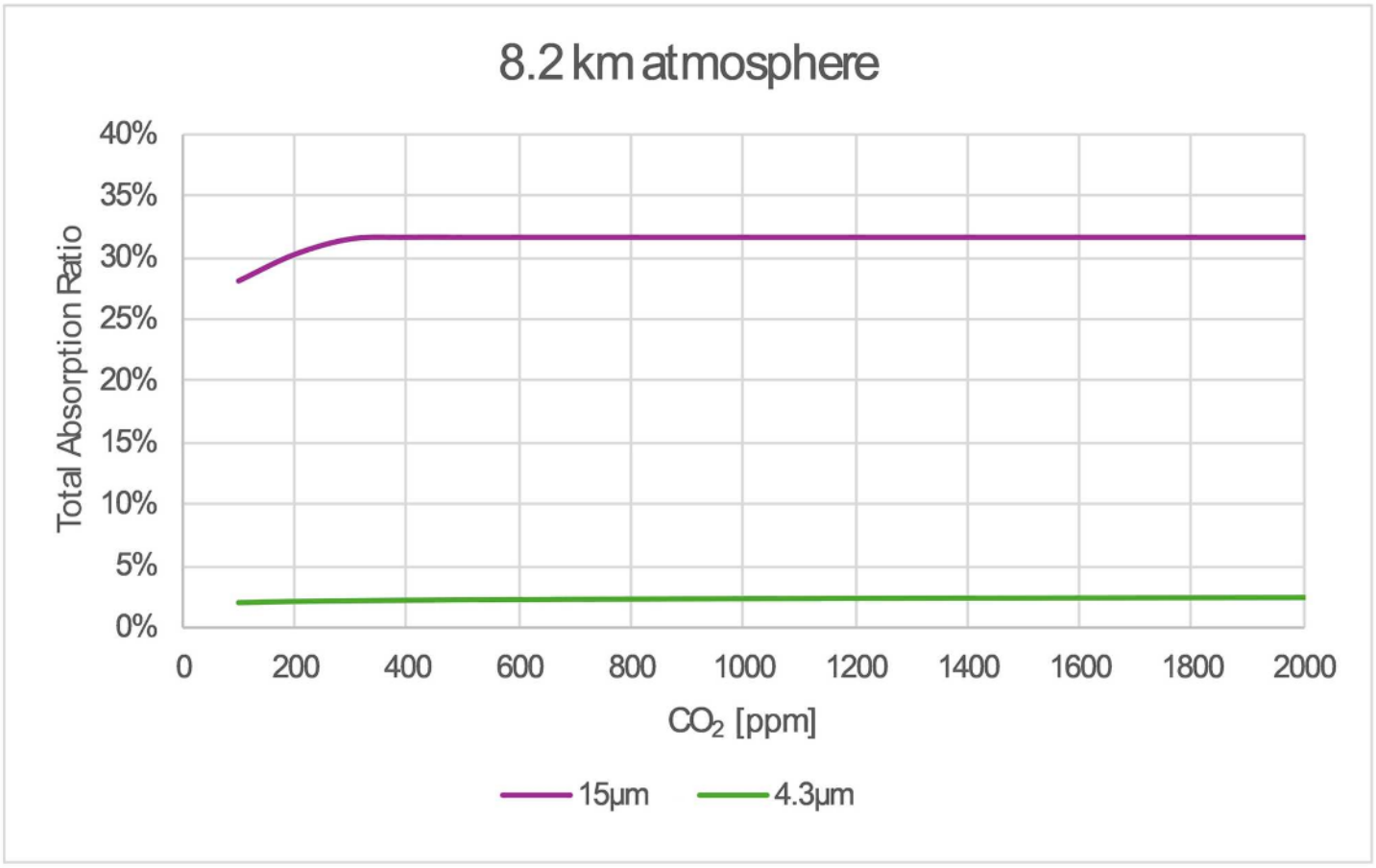


Abbildung 15. Absorptionsverhältnisse für die beiden starken CO_2 Absorptionsbanden [11].

Ein Anstieg von 400 auf 800 ppm CO_2 zeigt keinen messbaren Anstieg der IR-Absorption für die 15-µ- und 4,3-µ-Bänder und somit eine vollständige Sättigung. Andere ausführliche Studien [14] schätzen das gesamte terrestrische langwellige Absorptionsvermögen a .LW

$$a\,(\,L\,) = \int_0^\infty I\,(\,0_\lambda\,)\cdot a\,(_\lambda L\,)\,d_\lambda\,/(\int_0^\infty I\,(\,0_\lambda\,)d\,\lambda\,)\times 100\ \%$$

$$a(L) = \frac{\int_0^\infty I_\lambda(0)\cdot a_\lambda(L)\,d\lambda}{\int_0^\infty I_\lambda(0)\,d\lambda}\times 100\%$$

(16)

und erhalten die folgenden Ergebnisse für verschiedene Breitengrade.

Tabelle 2. Berechnetes a_{LW} von Harde [14] für verschiedene CO_2 Konzentrationen.

	absorptivities ε (%)				
CO_2 (ppm)	tropics	mid-latitudes	high-latitudes	average 3 zones	global mean
0	81,90	69,44	58,98	74,68	77,02
35	83,80	74,48	67,04	78,43	80,08
70	84,18	75,35	68,32	79,10	80,62
140	84,65	76,31	69,80	79,86	81,29
210	84,99	77,00	70,77	80,40	81,76
280	85,28	77,51	71,52	80,83	82,14
350	85,53	77,95	72,14	81,19	82,45
380	85,65	78,12	72,38	81,34	82,58
420	85,76	78,33	72,68	81,51	82,74
490	85,91	78,67	73,16	81,80	83,00
560	86,16	78,98	73,61	82,06	83,24
630	86,35	79,29	74,02	82,32	83,46
700	86,52	79,58	74,41	82,56	83,68
770	86,69	79,85	74,78	82,79	83,88

Die nächste Abbildung (**Abbildung 16**) zeigt die globalen Mittelwerte der obigen Tabelle. Während unser früheres Modell die Schichtstruktur vernachlässigte, indem es von einer isobaren Atmosphäre ausging, berücksichtigte Harde [14] die barometrischen Effekte.

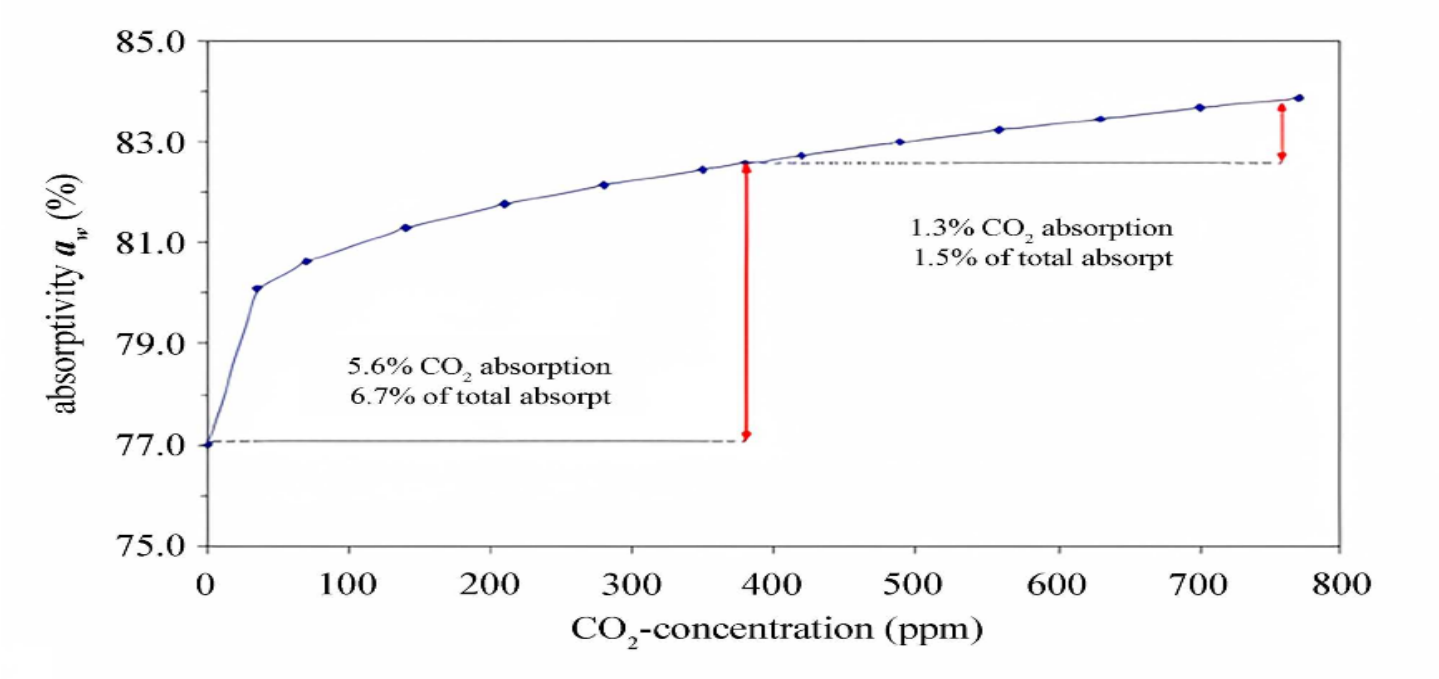


Abbildung 16. Einfluss der Verdoppelung der CO_2 Konzentration auf das Gesamtabsorptionsvermögen [14].

Diese Studie zeigt eine Obergrenze der zusätzlichen ATE um 1,5 %. Durchschnittliche Oberflächentemperaturen von T_S = 288˚K entsprechen einer Schwarzkörperstrahlung von 390 Wm^{-2}. Aus den vorangegangenen Überlegungen haben wir gelernt, dass eine Verdoppelung der CO_2 atmosphärischen Konzentration von 400 auf 800 ppm eine maximale Änderung der in der Atmosphäre absorbierten Energie um 1,5 % bedeutet, d. *h.* eine Zunahme der Rückstrahlung um maximal 3 Wm^{-2}. Unter Verwendung der Stefan-Boltzmann-Formel erhalten wir dann eine erste Schätzung eines entsprechenden Temperaturanstiegs oder GH-Beitrags von 0,5˚K bei einem atmosphärischen Gehalt von 800 ppm im Vergleich zu den derzeitigen 400 ppm. Dies stimmt auch sehr gut mit den Ergebnissen von Wijngaarden und Happer überein [2].

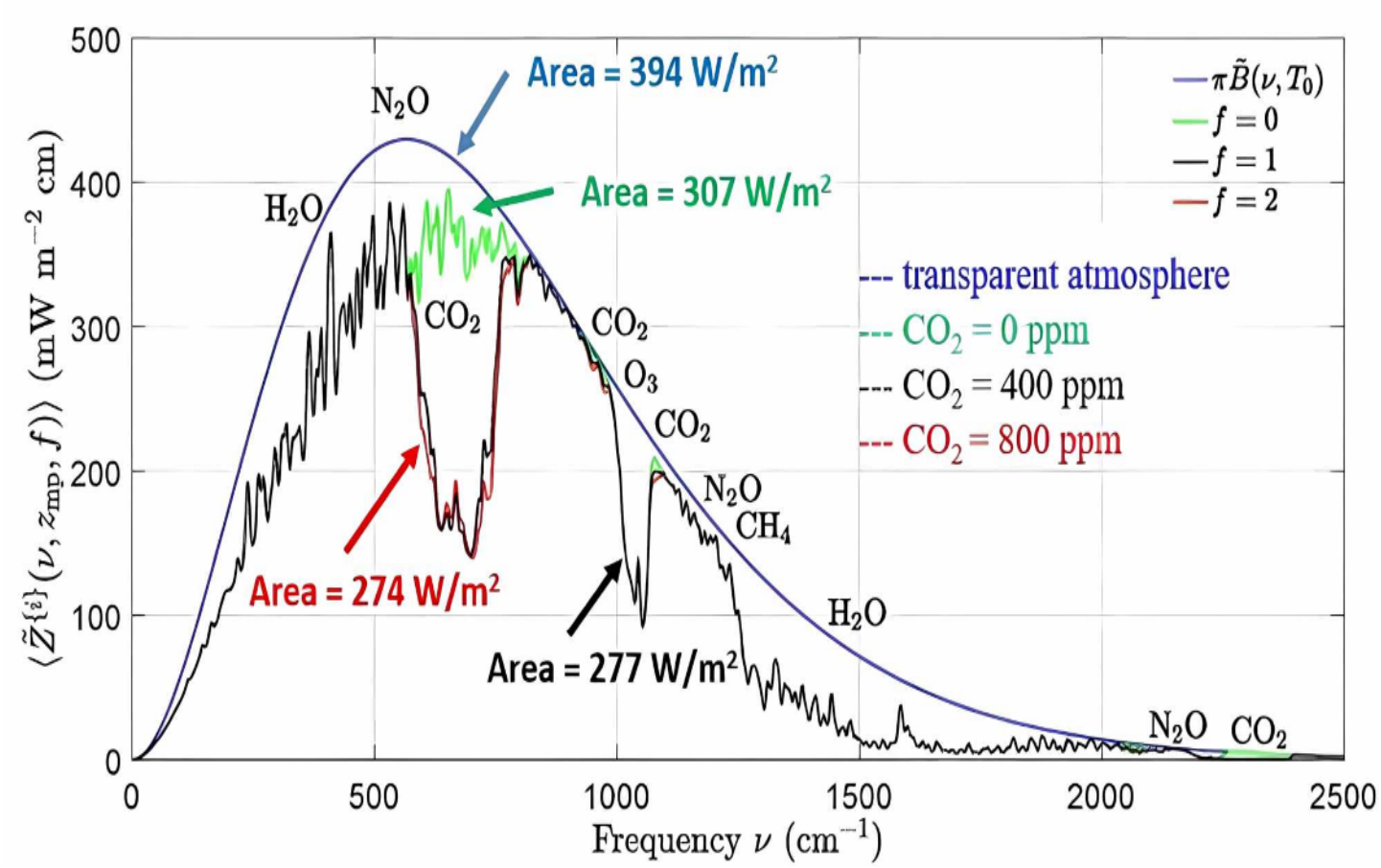


Abbildung 17. Änderungen des atmosphärischen Gesamtabsorptionsvermögens durch CO_2 Erhöhungen, berechnet von Wijngaarden und Happer [2].

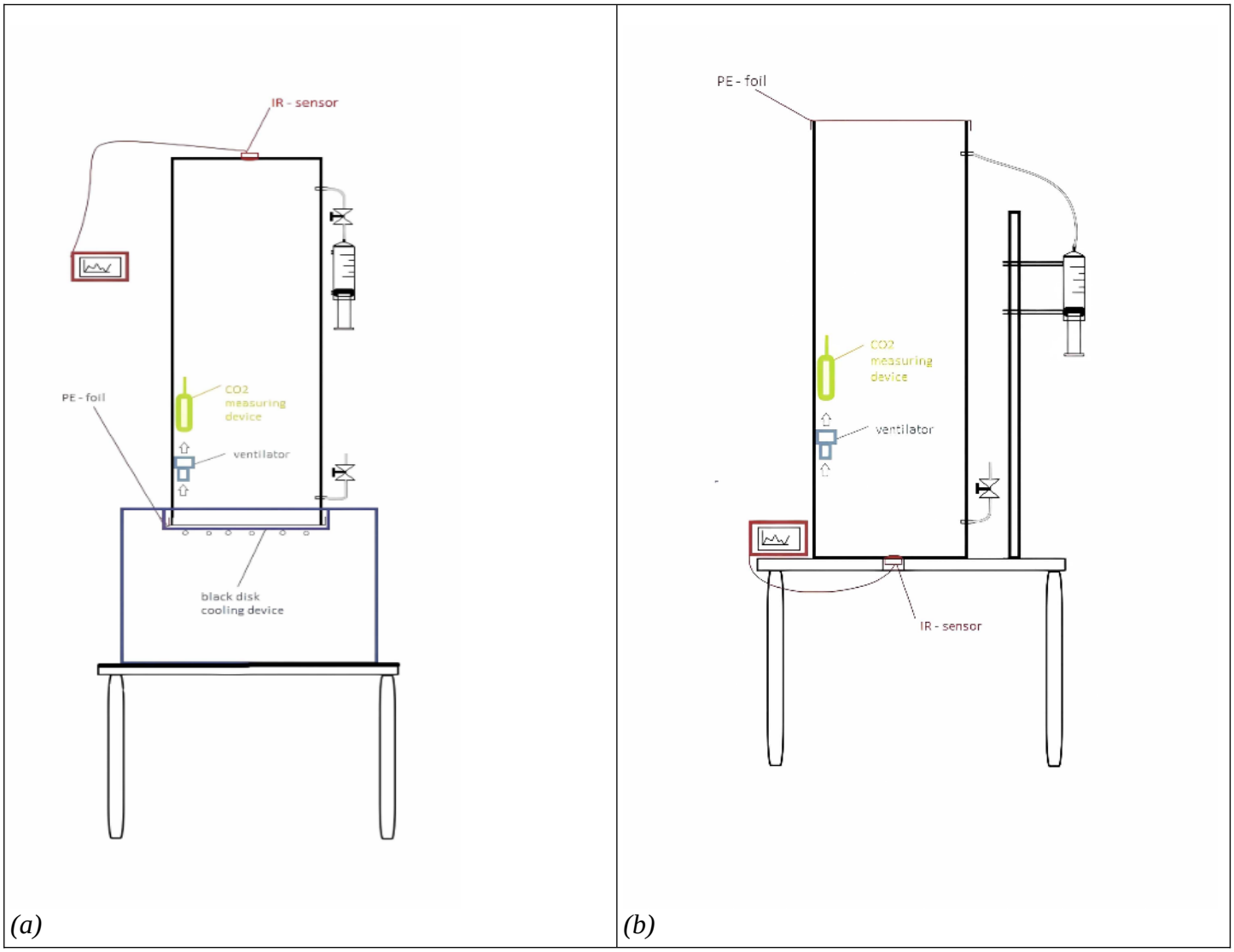
Messungen am Boden stimmen mit **Abbildung 17** überein und zeigen eine fast vollständige Sättigung der IR-Absorption in unserer Atmosphäre. Wir waren daher daran interessiert, einen einfachen und unabhängigen, kostengünstigen Versuchsaufbau zu entwickeln, um dieses Sättigungsverhalten zu demonstrieren. Dieser Aufbau und die erzielten Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

2. Experimentelle Methoden

Ziel dieser Arbeit war es daher, auf einfache Weise zu zeigen, dass ein IR-aktives Gas tatsächlich die Wärmestrahlung eines Körpers beeinflussen kann. Ein weiteres Ziel war es zu zeigen, dass die Rückstrahlung von CO_2 durch die Sättigung der Absorption begrenzt ist. Dies wurde durch zwei verschiedene Versuchsaufbauten realisiert.

Die Messungen sollten es uns ermöglichen, herauszufinden, ob das von anderen gemessene und in den vorangegangenen Abschnitten dieser Arbeit diskutierte Sättigungsverhalten tatsächlich korrekt ist, und Rückschlüsse auf die Frage der CO_2 -induzierten globalen Erwärmung zu ziehen.

Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik fließt die Wärme von wärmeren zu kälteren Objekten ("bergab"), es sei denn, es wird Energie in irgendeiner Form zugeführt, um die Richtung des Wärmeflusses umzukehren, oder es gibt ein Medium, das einen Teil der Energie absorbiert und isotrop weiterleitet, so wie Treibhausmodelle den Strahlungshaushalt in unserer Atmosphäre beschreiben. Unsere Testatmosphären wurden gegen eine -25˚C gekühlte schwarze Scheibe ("Labormodus") oder einen wolkenlosen Nachthimmel ("Außen- oder Feldmodus") unter Verwendung der natürlichen IR-Quelle der Oberflächen- und atmosphärischen Rückstrahlung untersucht.



(a) *(b)*

Abbildung 18: Versuchsaufbau für (a) "Labormodus" unter Verwendung eines Kühlkompressors und (b) "Feldmodus".

Übersetzen wir diese Anordnungen in Energieflussdiagramme wie in **Abbildung 3** und **Abbildung 4**, analysieren wir zunächst **Abbildung 18(a)**.

Wie in **Abbildung 19** dargestellt, wird die Reaktion des IR-Sensors im "Labormodus" ausschließlich durch die Rückstrahlung aus der Testatmosphäre 2 mit zunehmender CO-Konzentration bestimmt$_2$. Die Kühlplatte auf der anderen Seite des Prüfzylinders ermöglicht einen Wärmefluss gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Innerhalb des Volumens des Prüfzylinders sind ein CO_2 Detektor und ein Ventilator mit geringer Leistung angebracht, die von einem kombinierten Netzteil betrieben werden. Die Kommunikation mit dem CO_2 Detektor erfolgt über Bluetooth. β ist das Intensitätsverhältnis $\beta = A_D \sin^2 \theta$ für einen IR-Detektor mit numerischer Apertur θ innerhalb der zylindrischen Prüfsäule und der Detektorfläche A_D von 1 ^{cm2}. ε_2 hängt ausschließlich von den GH-Gaskonzentrationen im Prüfröhrchen ab und die Intensität $\beta /2\ \varepsilon_1\ \varepsilon_2\ \sigma\ T_1^4$ wird mit einem Thermopile-IR-Detektor von Thorlabs® gemessen.

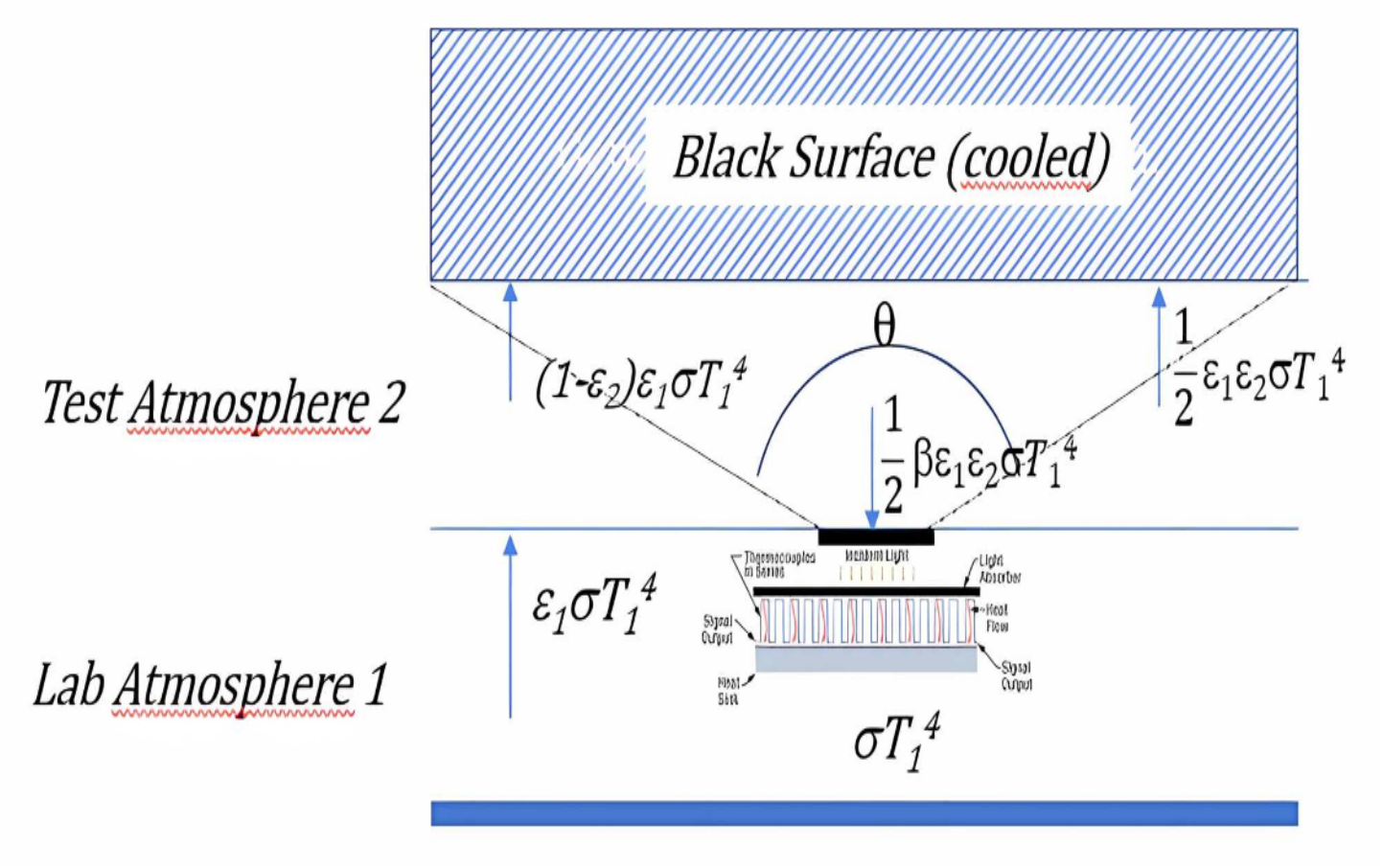


Abbildung 19. Prüfstand "Lab Mode" mit gekühlter schwarzer Scheibe.

Im "Feldmodus" (**Abbildung 18(b)**) wird der Prüfzylinder um 180˚ gedreht, der Kühlkompressor wird entfernt und durch den klaren Nachthimmel ersetzt. Der Temperaturgradient ist in diesem Fall die Differenz zwischen $T\ S$

und T_E , wobei T_E aus (7) abgeleitet ist

$$T_E = 4\sqrt{\frac{\left(1+KC^2\right)\cdot 8.78\cdot 10^{-13}\cdot T_S^{\,5.852}\cdot RH^{0.07195}}{\sigma}}$$

(17)

Die nach unten gerichtete Strahlung, die durch die Prüfkammer in den IR-Detektor gelangt, wird bestimmt durch

$$=P\beta\ e_1\ e_2\ s\ T_E^{\,4}$$

$$P = \beta e_1 e_2 s T_E^4$$

(18)

Unter Verwendung der Parametrisierung von Howard [11] erhalten wir für CO_2 Testatmosphären Leistungsdichten unterhalb der Nachweisgrenze des IR-Sensors von 10 µW/cm^2 in diesem Aufbau. Die Verwendung stärkerer GH-Gase würde ε_1 deutlich erhöhen, wie wir in unserer Versuchsreihe getestet haben. Dies würde beweisen, dass CO_2 ein relativ schwaches Treibhausgas ist, selbst wenn seine Konzentration in den Prozentbereich ansteigt, verglichen mit anderen GH-Gasen, die bereits bei relativ niedrigen Konzentrationen nachweisbar sind.

3. Ergebnisse

Der 7-Liter-Testzylinder in **Abbildung 18(a)** wurde mit reinem Stickstoff aufgefüllt. CO_2 wurde in 50-ml-Schritten zugegeben. Gleichzeitig wurde mit dem CO_2 Detektor die Konzentration gemessen, während der Ventilator versuchte, das Gasvolumengemisch zu homogenisieren. In **Abbildung 20** sind die erhaltenen Leistungswerte des IR-Detektors aufgetragen.

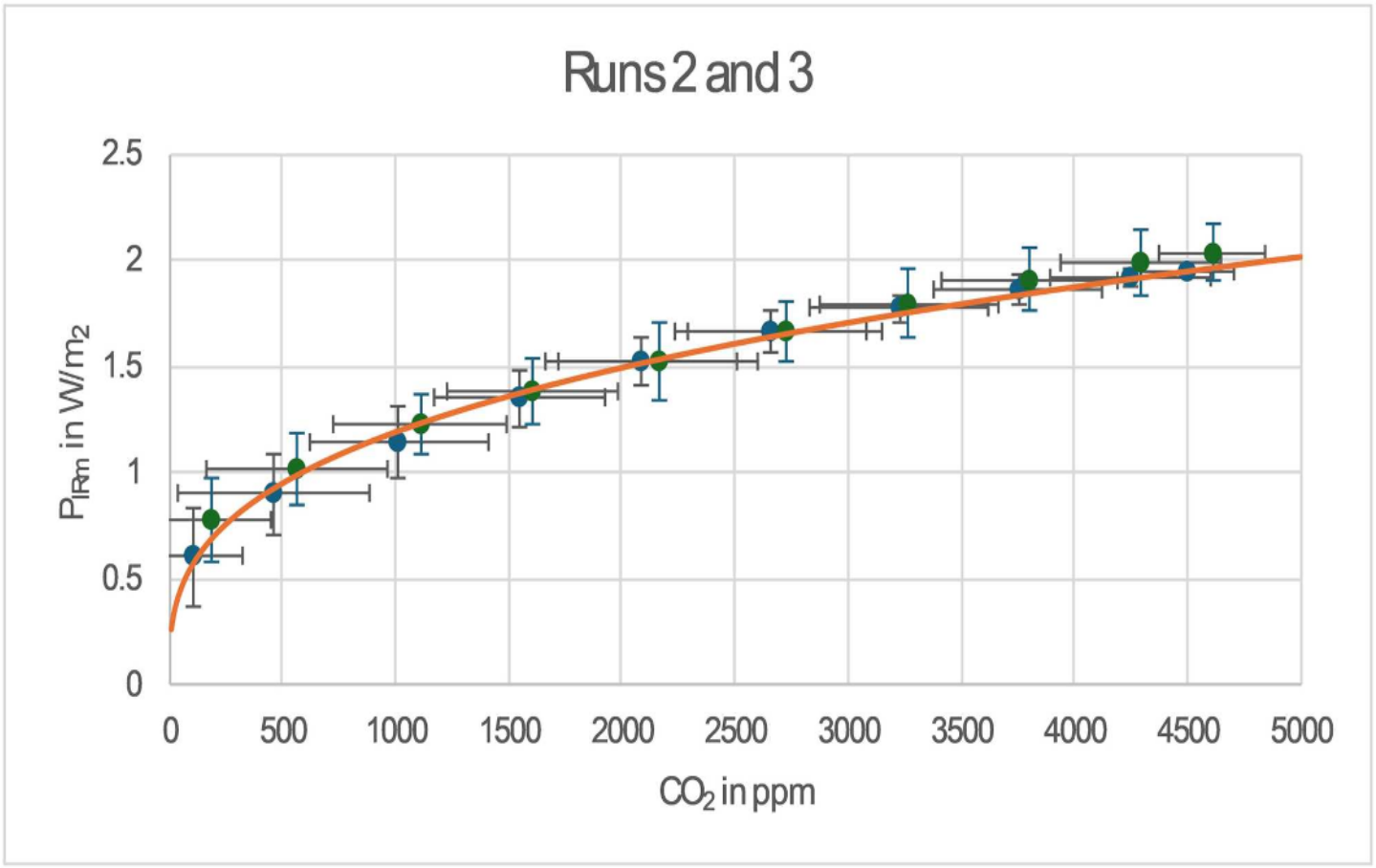


Abbildung 20. Lauf 2.2 und Lauf 2.3 im Labormodus beim Mischen von CO_2 in eine reine Stickstoffatmosphäre.

Aus den vorangegangenen Überlegungen können wir die Rückstrahlung durch die Parametrisierung von Howard [11] (Gleichungen (14)-(15)) abschätzen.

Niedrige Werte der Absorptionslänge liegen außerhalb des Anpassungs- und Messbereichs von Howard, dienen aber als Extrapolation zur Abschätzung von Größenordnungen. Der Trend in **Abbildung 21** ist in der Tat den Messwerten in **Abbildung 20** sehr ähnlich und bestätigt das logarithmische Verhalten der Absorption.

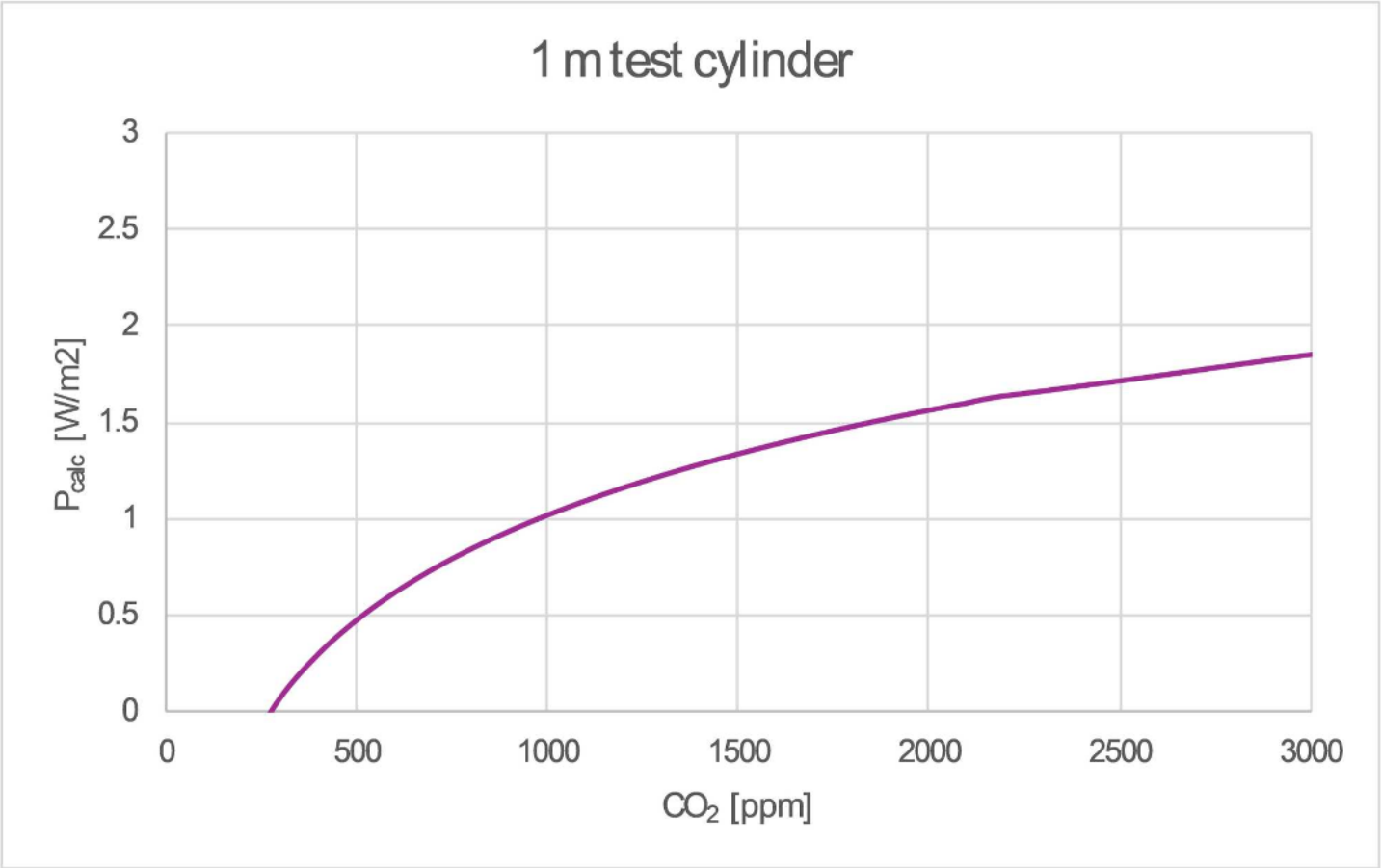


Abbildung 21. P berechnet nach Howard [11].

Anhand der in **Abbildung 20** dargestellten Werte können wir den Absorptionsanteil A_f für unterschiedliche CO-Konzentrationen$_2$ in N_2 Atmosphären schätzen

$$\ln (I_0 / I) =_1 \varepsilon \cdot c \cdot d$$

$$\ln\left(\frac{I_0}{I_1}\right) = \varepsilon \cdot c \cdot d$$

(19)

wobei c die molare Konzentration (mol·m^{-3}) und d die Luftsäulenlänge (m) ist. Wir verwenden die Funktion des Beer-Lambert-Gesetzes (13), wobei ε. der Absorptionskoeffizient unserer Testatmosphäre ist, und erhalten

$$_f \ = A(I_o - I)/I = (\ 1- e)^{-\varepsilon \cdot c.d}$$

$$A_f = \frac{I_o - I}{I} = \left(1 - e^{-\varepsilon \cdot c.d}\right)$$

(20)

Mit Hilfe von (20) kann die Rückstrahlung für eine gegebene Luftsäulenlänge (**Abbildung 22**) bei bodennahen Bedingungen für die Sättigung bei einem bestimmten ppm CO_2 berechnet werden.

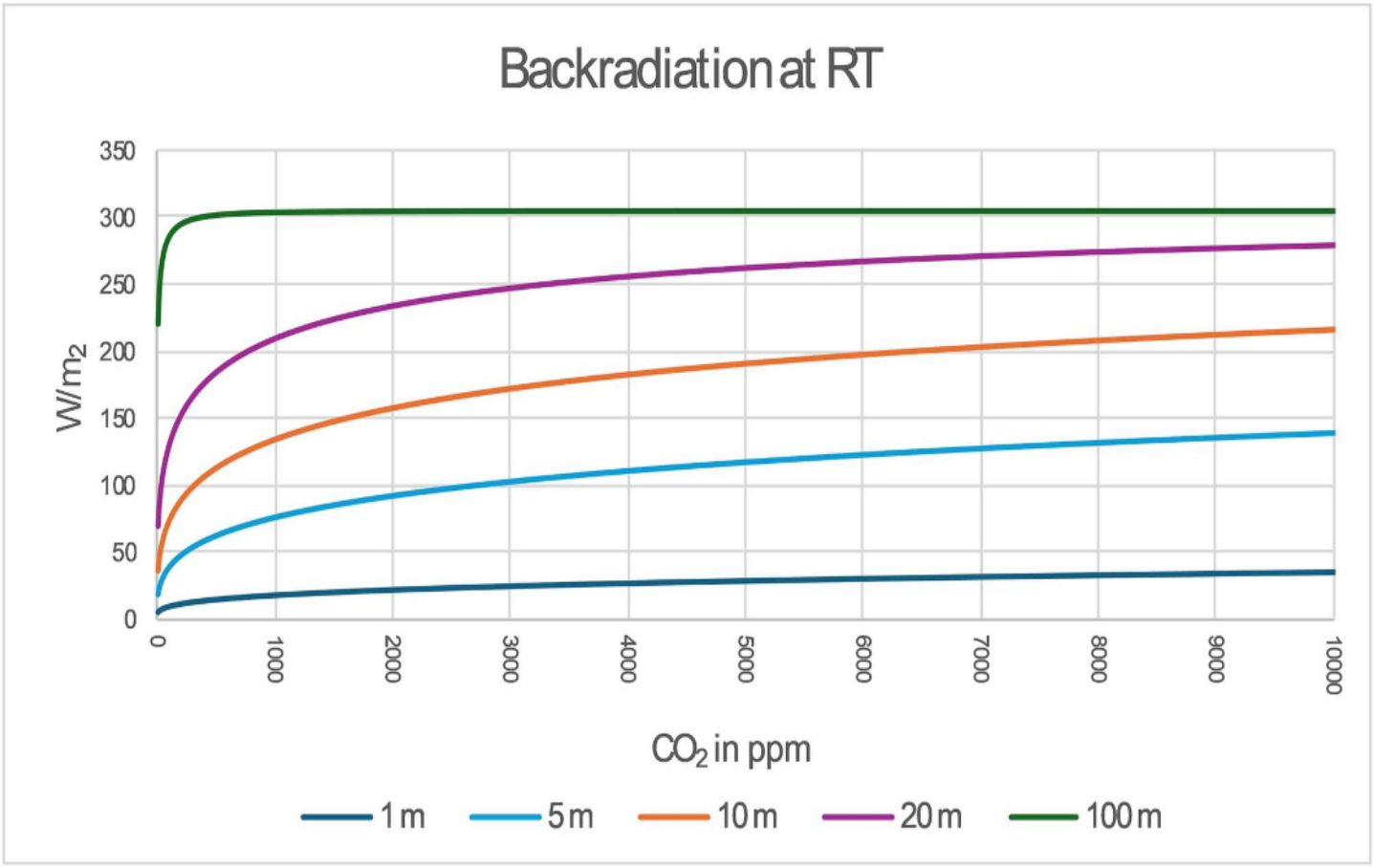


Abbildung 22. Berechnete Rückstrahlung für verschiedene lange Luftsäulen bei Raumtemperatur (RT).

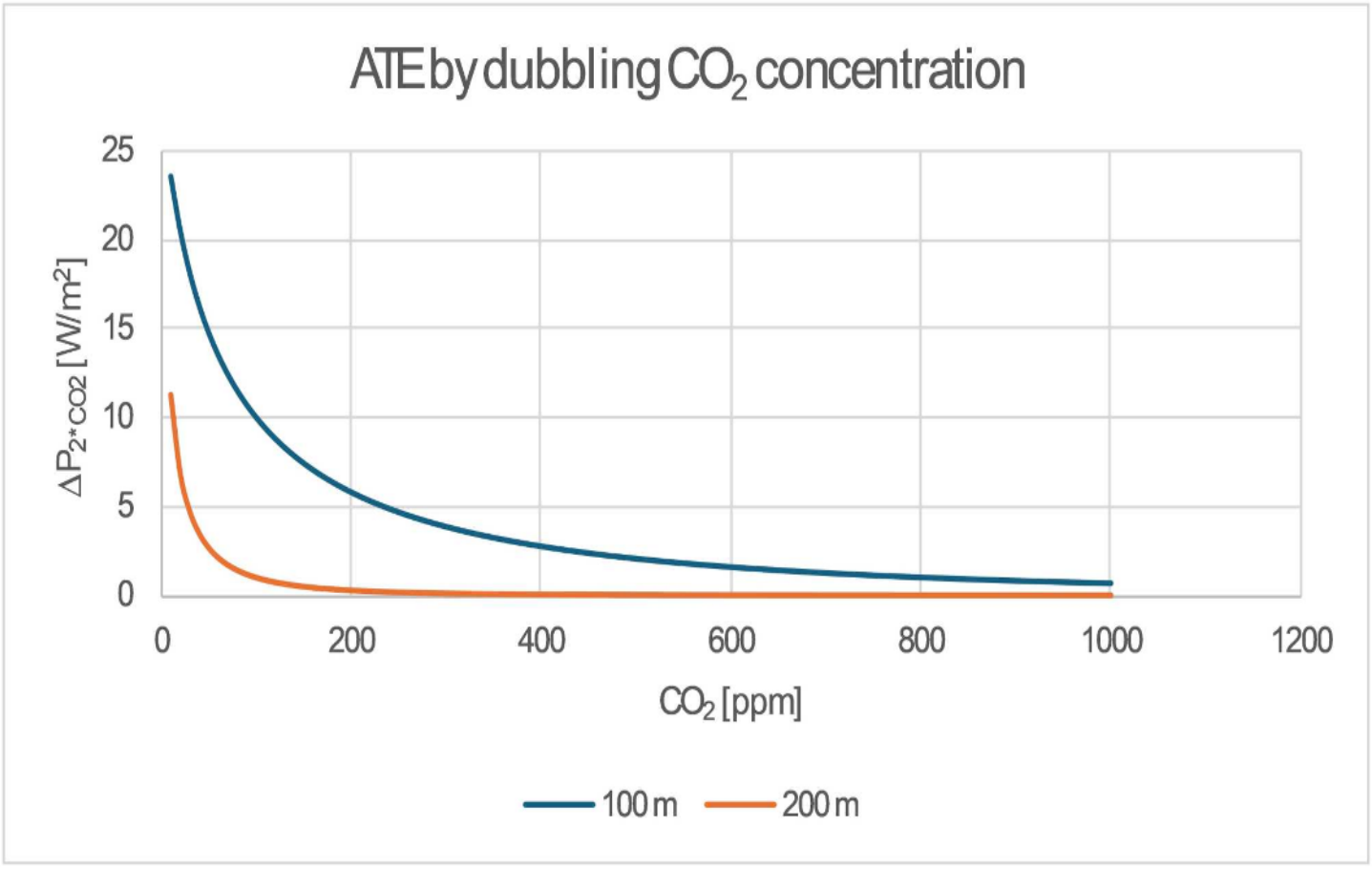


Abbildung 23. Berechnete Auswirkung der CO_2 Verdoppelung auf die rückgestreute Leistung in zwei Luftsäulen.

In **Abbildung 23** haben wir die entsprechende atmosphärische thermische Verstärkung (ATE) bei Verdoppelung der tatsächlichen CO_2 Konzentration für eine homogene Atmosphäre von 100 m Dicke bei 1 bar berechnet. Das Ergebnis zeigt eine rasche Abnahme der ATE mit zunehmender Länge der Luftsäulen. Die Anwendung dieses Ergebnisses auf die reale Welt bedeutet eine Sättigung der CO_2 Konzentration in Bezug auf messbare thermische Effekte. Dies wird im nächsten Kapitel ausführlicher behandelt.

Abbildung 24 zeigt das Ergebnis der so genannten Feldmessungen vor einem schwarzen, wolkenlosen Nachthimmel. Es gibt einen klaren Hinweis darauf, dass keine messbare Rückstreuung zu beobachten ist, wenn dem System CO_2 von 0 bis 5000 ppm hinzugefügt wird. Gleichung (9) mit ε_1 -0,2, ε_2 < 0,2 und β-0,02 ergibt $\beta\varepsilon_1\ \varepsilon_2 < 0{,}0004$ und damit $P = \beta\varepsilon_1\ \varepsilon_2\ \sigma T_E\ 4 < 3 \times 10^{-2}$ W/m^2 = 3 µW/cm^2. Die Arbeitsleistung des verwendeten Thermopile Thorlabs Detektors mit 1 ^{cm2} aktiver Fläche beginnt bei 10 µW. Bei stärkeren GH-Gasen wäre es möglich, die Nachweisgrenzen zu überschreiten und eine Reaktion zu erzielen. Dies wurde durch die Verwendung des Freongases C H F_{224} wie in der nächsten Abbildung gezeigt.

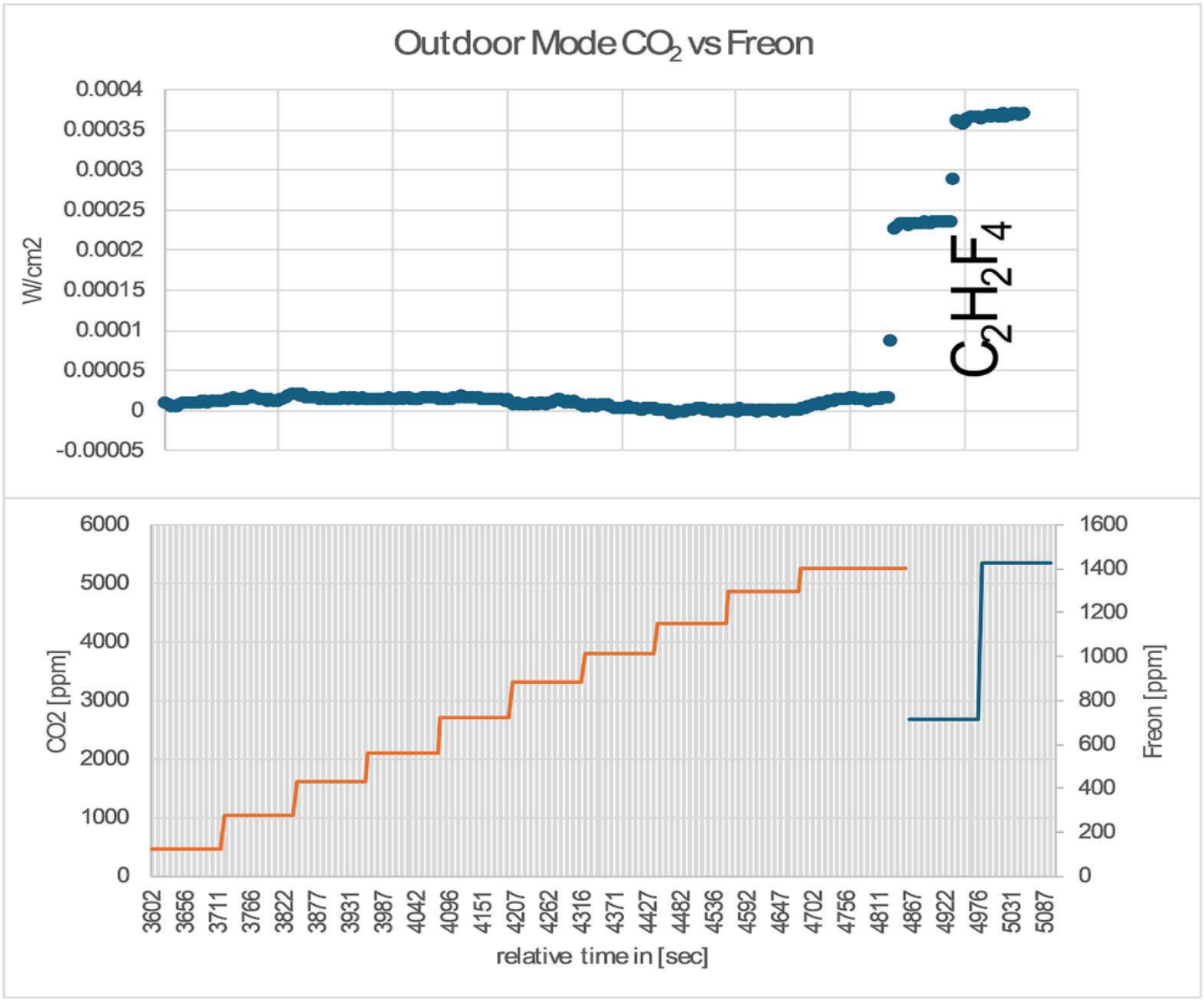


Abbildung 24. Feldmodus-Vergleichsmessung CO_2 und Freon (C H F_{224}).

Der Detektor reagierte tatsächlich, wenn C H F_{224} Freon bis zu 1400 ppm zugesetzt wurde. Die vom NIST [15] gemessene Absorption von C H F_{224} (**Abbildung 25**) ist in der Tat bis zu 100-mal stärker als die von derselben Einrichtung [16] gemessene von CO_2 (**Abbildung 26**).

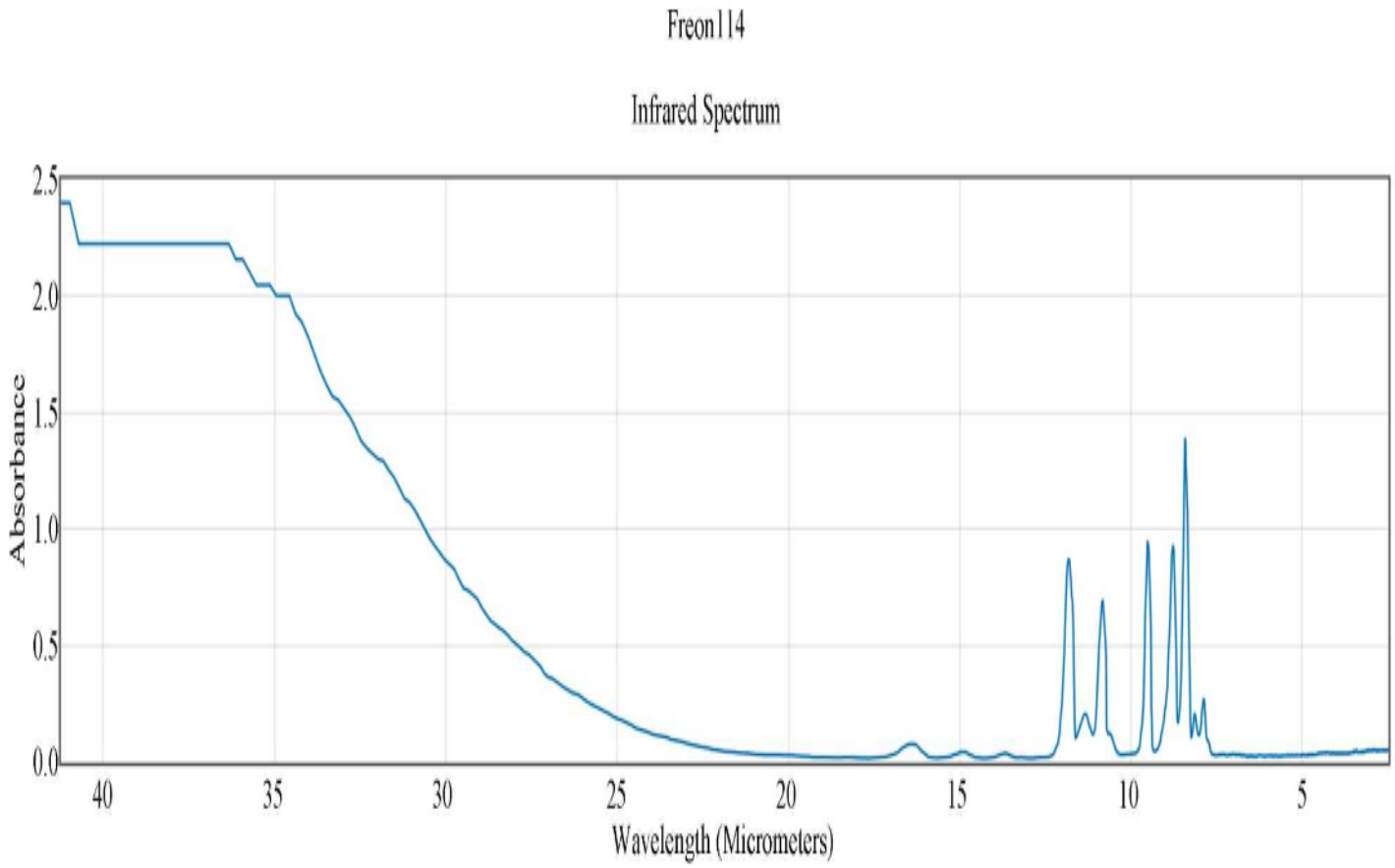


Abbildung 25. Absorptionsgrad von Freon (C H F_{224}) [15].

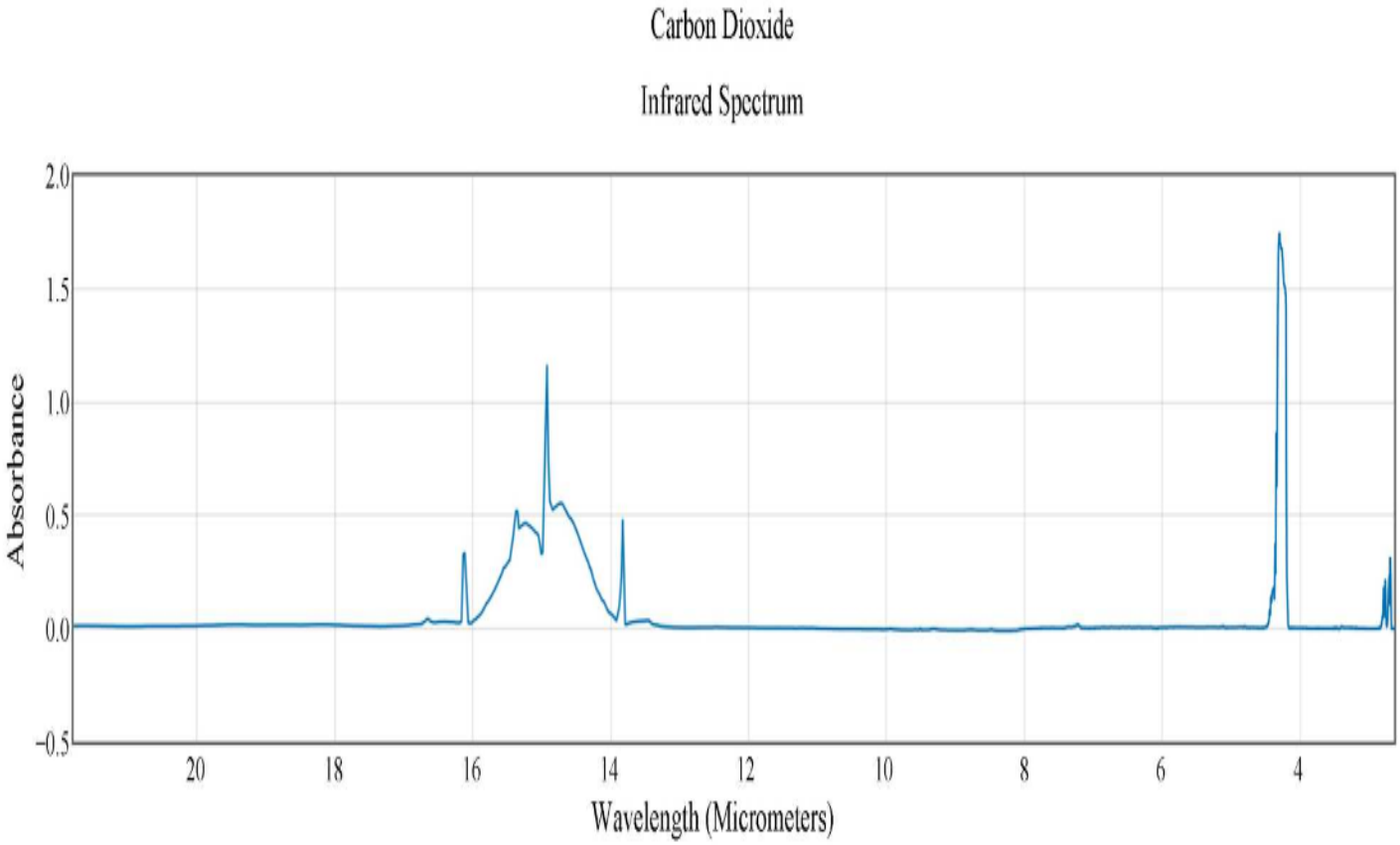


Abbildung 26. Absorptionsvermögen von Kohlendioxid (CO_2)[16].

4. Diskussion

Atmosphärische Fenster, insbesondere die optischen und infraroten, beeinflussen die Verteilung von Energieflüssen und Temperaturen in der Energiebilanz der Erde. Die Fenster sind abhängig von Wolken, Wasserdampf, Spuren von Treibhausgasen und anderen Komponenten der Atmosphäre.

Von den durchschnittlich 341 Watt pro Quadratmeter (W/m^2) der Sonneneinstrahlung an der Oberseite der Atmosphäre erreichen etwa 161 W/m^2 die Oberfläche über atmosphärische Fenster und durch Wolken (Albedo). Die IR-Absorption durch die Atmosphäre und die entsprechende atmosphärische Erwärmung führen zu einem Gleichgewicht von 333 W/m^2 Rückstrahlung und ausgehender LW-Oberflächenstrahlung von 396 W/m^2 latenter Wärme aus Verdunstung (80 W/m^2) und anderen Wärmeverlusten (17 W/m^2). Unsere Messungen stimmen mit den Beschränkungen auf einen Anstieg der Rückstrahlung um maximal 3 W/m^2 bei einer Verdoppelung des CO-Gehalts von 400 auf 800 ppm überein. Dieser geringfügige Beitrag dürfte einen Temperaturanstieg von nicht mehr als 0,5˚K übersteigen - ein Wert, der nicht im Bereich signifikanter Auswirkungen für klimatische Veränderungen liegt und viel geringer ist als die jährlichen Temperaturschwankungen in allen Regionen der Erde.

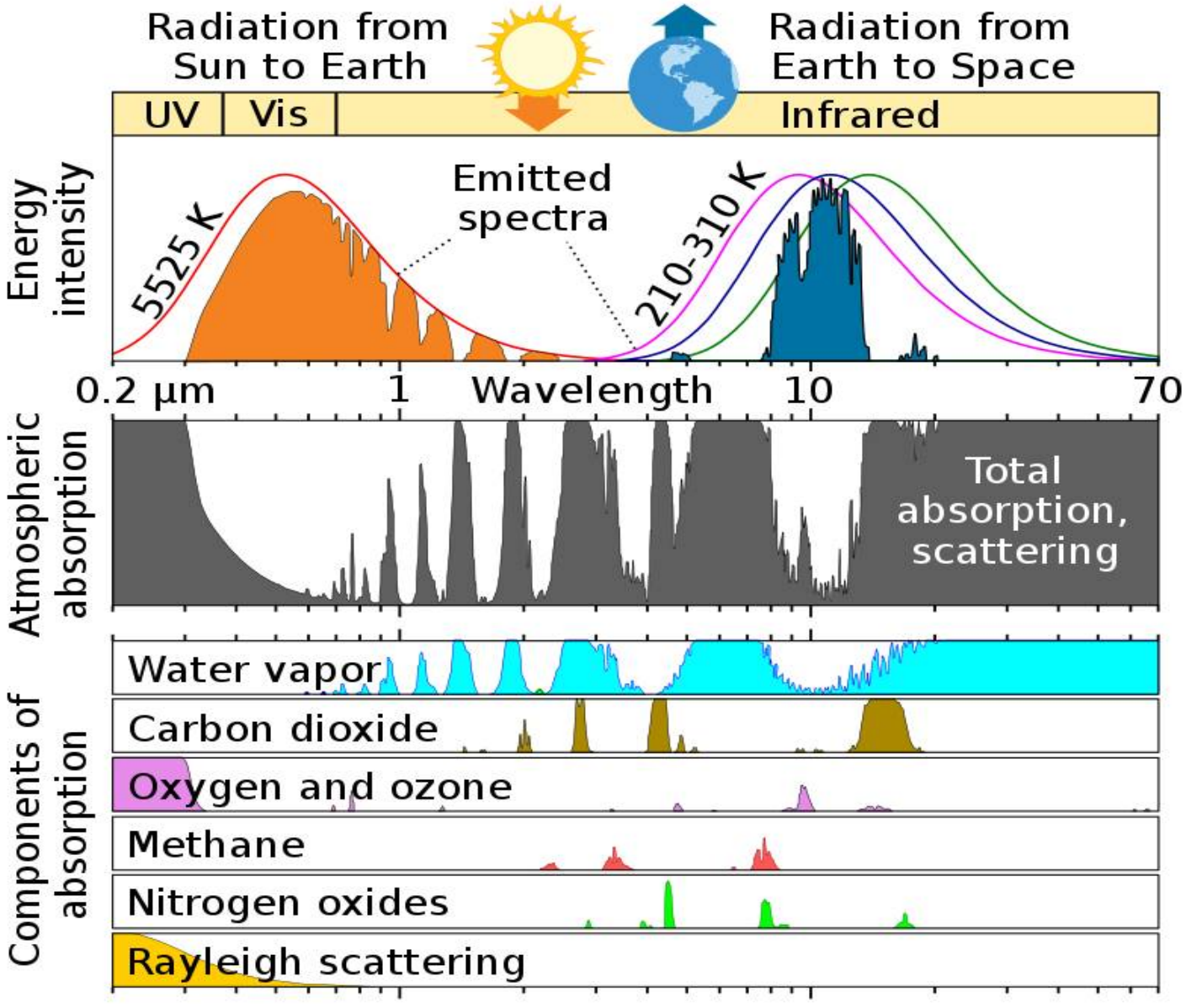


Abbildung 27. "The Atmospheric Window", NOAA [17] [18].

Aus **Abbildung 27** sollte ersichtlich sein, dass die Ränder der beiden markanten CO_2 -Fenster nur geringe Beiträge liefern. Wasserdampf ist in der Tat der Hauptabsorber und andere GH-Gase sind bei ihren derzeitigen Konzentrationen nicht relevant. Erhöhter Wasserdampf sollte auch bei konstanten Aerosolkonzentrationen zu einer Wolkenbedeckung führen. Geringfügige Schwankungen der Sonnenkonstanten und der kosmischen Strahlung durch ausgewogene Rückkopplungsschleifen sollten ein langfristiges thermisches Gleichgewicht ermöglichen. Schwankungen sind oft auf unnatürliche Zeitskalen, Langzeitkonstanten und statistisches Rauschen zurückzuführen. In einem vereinfachten Bild, in dem wir eine Atmosphäre mit gleichmäßiger Dichte entsprechend der Oberflächendichte ρ = 1,2225 $kg \cdot m^{-3}$ betrachten, erhalten wir ein atmosphärisches Luftsäulengewicht von 10.300 $kg \cdot m^{-2}$ auf einer Länge von 8425 m. Aus unseren Messungen und einem einfachen Beer-Lambert-Modell einer solchen Luftsäule fanden wir (**Abbildung 13**) bereits in 200 m eine vollständige Sättigung bei den derzeitigen CO_2 Konzentrationen, ohne nennenswerte Beiträge zu weiteren ATE. Schildknecht [19] kommt mit ähnlichen Argumenten zu dem Ergebnis, dass eine Verdopplung des CO_2 -Gehalts in der Luft von 380 ppm auf 760 ppm in einem Jahrhundert eine Zunahme von $\Delta T \approx 0{,}5^{\circ}C$ bedeutet, was gut mit den erwarteten Werten dieser und anderer Arbeiten übereinstimmt.

Unsere Ergebnisse sollten daher zu den bisher akzeptierten Erkenntnissen beitragen, die keinen Grund für die Verursachung von Klimaausreißern durch erhöhte CO_2 Gehalte angeben. Ekholm [20] führte die Idee der fiktiven atmosphärischen Strahlungswerte aufgrund der CO_2 Erhöhung ein. Ihm zufolge ist die säkulare Abkühlung der Erde die Hauptursache für die Schwankungen des Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre. Er erläuterte, dass Kohlendioxid eine Schlüsselrolle beim Treibhauseffekt spielt und dass sich seine Schlussfolgerung auf die früheren Arbeiten von Fourier, Pouillet, Tyndall und anderen stützt. Nach ihren Schätzungen wird eine Verdreifachung des Kohlendioxidgehalts die globalen Temperaturen um 7˚C bis 9˚C erhöhen. Ein Anstieg des Kohlendioxids dürfte die hohen Breitengrade stärker erwärmen als die Tropen und zu einem wärmeren, gleichmäßigeren Klima auf der gesamten Erde führen. Hansen [21] sagte dies vor dem Kongress aus und machte die Öffentlichkeit auf den Klimawandel aufmerksam. Hansen behauptete: "Die stärkste Rückkopplung geht vom Wasserdampf aus". Dieses Argument scheint zwar stichhaltig zu sein, muss aber in Anbetracht paläoklimatischer Fakten in Frage gestellt werden, z. B. dass höhere Temperaturen in der Eem-Zwischeneiszeit vor 120.000 Jahren und der Holstein-Zwischeneiszeit vor 5.000 bis 15.000 Jahren keinen Kipppunkt oder einen galoppierenden Treibhauseffekt ausgelöst haben. Sarker [22] stellt richtig fest, dass 0,24 Gigatonnen Kohlenstoff 50.000 Jahre lang in die Atmosphäre ausgestoßen wurden, um diese als *PETM* bekannte starke Erwärmung zu verursachen. Im Vergleich dazu stößt der Mensch jährlich 10 Gigatonnen, also etwa die fünfzigfache Menge an Kohlenstoff, in die Atmosphäre aus. Es besteht kein Zweifel daran, dass eine Erwärmung des Klimas negative Auswirkungen auf verschiedene wichtige Eigenschaften hat, z. B. auf den Trockenheitsindex von Flüssen [23]. Selbst wenn man nur die Flüsse untersucht, gibt es viele andere anthropogene Auswirkungen, die nicht mit CO_2 zusammenhängen und die ihre derzeitige und künftige Umweltintegrität dramatisch beeinflussen [24] [25]. Die derzeitige globale Erwärmung kann natürlich und/oder anthropogen bedingt sein. Auf jeden Fall müssen wir verstehen, wie es zu einem 100 m höheren Meeresspiegel oder zur Vergletscherung großer Landmassen ohne anthropogene CO_2 Emissionsauslöser kommen konnte. Zusätzliche Energie oder Energieverluste sind auf natürliche Kräfte zurückzuführen, die vollständig verstanden werden müssen, bevor man falsche Schlüsse zieht. Die Eiskerndaten zeigen keine grundlegend anderen Temperaturschwankungen in den letzten 10.000 Jahren. Wir brauchen auch ein besseres Verständnis der Gültigkeit von Energieflussdiagrammen, wie sie vom IPCC veröffentlicht wurden. Es wäre ein großer Erfolg unserer Bemühungen, wenn solche Fragen auch unter Berücksichtigung der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse neu überdacht werden könnten.

5. Schlussfolgerung

Der experimentelle Nachweis in dieser Arbeit bestätigt frühere Arbeiten, dass steigende CO-Werte$_2$ bei den derzeitigen Werten in der Atmosphäre nicht wesentlich zur Erwärmung durch mehr Rückstrahlung beitragen

können. Wir haben auch gezeigt, dass zunehmende schädliche Treibhausgase wie Freon eine starke Reaktion auf Rückstrahlung zeigen, wenn sie in unsere atmosphärische Testkammer gelangen. Klimamodelle und ihre CO_2 treibenden Kräfte sollten überarbeitet werden, und es sollten viel mehr experimentelle Beweise über die IR-Strahlungsreaktion von Treibhausgasen gesammelt werden, bevor man die aktuellen Erwärmungstrends und die Mechanismen des Klimawandels als monokausal für die Theorien über Treibhausgase erklärt.

Interessenkonflikte

Die Autoren erklären, dass es keine Interessenkonflikte im Zusammenhang mit der Veröffentlichung dieses Artikels gibt.

Referenzen

[1] Europäisches Parlament (2023) Fortschritte der EU bei der Verwirklichung ihrer Klimaziele für 2020 (Infografik). https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20180706STO07407/fortschritte-der-eu-bei-der-verwirklichung-ihrer-klimaziele-infografik?at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=DSA&at_goal=TR_G&at_audience=&at_t

[2] van Wijngaarden, W.A. und Happer, W. (2020) Dependence of Earth's Thermal Radiation on Five Most Abundant Greenhouse Gases. arXiv: 2006.03098. https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.03098

[3] Happer, W. und Lindzen, R. (2022) Comment and Declaration on the SEC's Proposed Rule "The Enhancement and Standardization of Climate-Related Disclosures for Investors", File No. S7-10-22, 87 Fed. Reg. 21334. https://www.sec.gov/comments/s7-10-22/s71022-20132171-302668.pdf

[4] Barrett, J. (2005) Greenhouse Molecules, Their Spectra and Function in the Atmosphere. *Energie & Umwelt*, 16, 1037-1045. https://doi.org/10.1260/095830505775221542

[5] James, I. N. (1994). Einführung in zirkulierende Atmosphären. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/cbo9780511622977

[6] https://web.archive.org/web/20230329191117/www.acs.org/climatescience/atmosphericwarming/multilayermodel.html

[7] Swinbank, W.C. (1963) Long-Wave Radiation from Clear Skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89, 339-348. https://doi.org/10.1002/qj.49708938105

[8] Goforth, M.A., Gilchrist, G.W. und Sirianni, J.D. (2002) Cloud Effects on Thermal Downwelling Sky Radiance. *Proceedings of* SPIE-The *International Society for Optical Engineering* 4710, Orlando, 15. März 2002. https://doi.org/10.1117/12.459570

[9] Petty, G.W. (2006) A First Course in Atmospheric Radiation. Sundog Publishing, 223.

[10] Angström, A. (1918) Smithsonian Inst., Misc. Coll. 65, 3. https://www.realclimate.org/images/Angstrom.pdf

[11] Howard, J.N., Burch, D.E. und Williams, D. (1956) Infrared Transmission of Synthetic Atmospheres II Absorption by Carbon Dioxide. *Journal of the Optical Society of America*, 46, 237-241. https://doi.org/10.1364/josa.46.000237

[12] Fröhlich, C., Philipona, R. und Marty, C. (1998,) Untersuchung des Oberflächenstrahlungshaushaltes in den Alpen und im Vergleich zum schweizerischen Mittelland. VDF Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.

[13] Makhdoumi Akram, M., Nikfarjam, A., Hajghassem, H., Ramezannezhad, M. und Iraj, M. (2020) Low Cost and Miniaturized NDIR System for CO_2 Detection Applications. *Sensor Review*, 40, 637-646. https://doi.org/10.1108/sr-06-2019-0140

[14] Harde, H. (2014) Advanced Two-Layer Climatemodel for the Assessment of Global Warming by CO_2 . *Open Journal of Atmospheric and Climate Change*, 1, 1-51.

[15] C_2 Cl F_{24} . https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C76142&Type=IR-SPEC&Index=2

[16] CO_2 . https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C124389&Units=SI&Type=IR-SPEC&Index=1#IR-SPEC
[17] National Oceanic and Atmospheric Administration (2023) Das Atmosphärische Fenster. https://www.noaa.gov/jetstream/satellites/absorb
[18] US-Handelsministerium, NOAA. Die Energiebilanz Erde-Atmosphäre. https://www.weather.gov/
[19] Schildknecht, D. (2020) Sättigung der Infrarot-Absorption durch Kohlendioxid in der Atmosphäre. *International Journal of Modern Physics B*, 34, Artikel 2050293. https://doi.org/10.1142/s0217979220502938
[20] Ekholm, N. (1901) On the Variations of the Climate of the Geological and Historical Past and Their Causes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 27, 1-62. https://doi.org/10.1002/qj.49702711702
[21] Hansen, J., Johnson, D., Lacis, A., Lebedeff, S., Lee, P., Rind, D., *et al*. (1981) Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. *Science*, 213, 957-966. https://doi.org/10.1126/science.213.4511.957
[22] Sarker, S. (2022) Fundamentals of Climatology for Engineers (Grundlagen der Klimatologie für Ingenieure): Lecture Note. *Eng*, 3, 573-595. https://doi.org/10.3390/eng3040040
[23] Sarker, S. (2021) Investigating Topologic and Geometric Properties of Synthetic and Natural River Networks under Changing Climate. https://stars.library.ucf.edu/etd2020/965
[24] Gao, Y., Sarker, S., Sarker, T. und Leta, O.T. (2022) Analyzing the Critical Locations in Response of Constructed and Planned Dams on the Mekong River Basin for Environmental Integrity. *Environmental Research Communications*, 4, Artikel 101001. https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac9459
[25] Sarker, S., Veremyev, A., Boginski, V. und Singh, A. (2019) Critical Nodes in River Networks. *Scientific Reports*, 9, Artikel Nr. 11178. https://doi.org/10.1038/s41598-019-47292-4