Versuchsanleitungen zu den Experimenten mit Wärmestrahlung

Aufbau im Überblick:

Die Komponenten für den Versuch *CO_2-Absorption* liegen in zweifacher Ausfertigung vor. Die Komponenten für den Versuch *T^4-Gesetz* sind nur auf einem der beiden Rollwagen montiert.

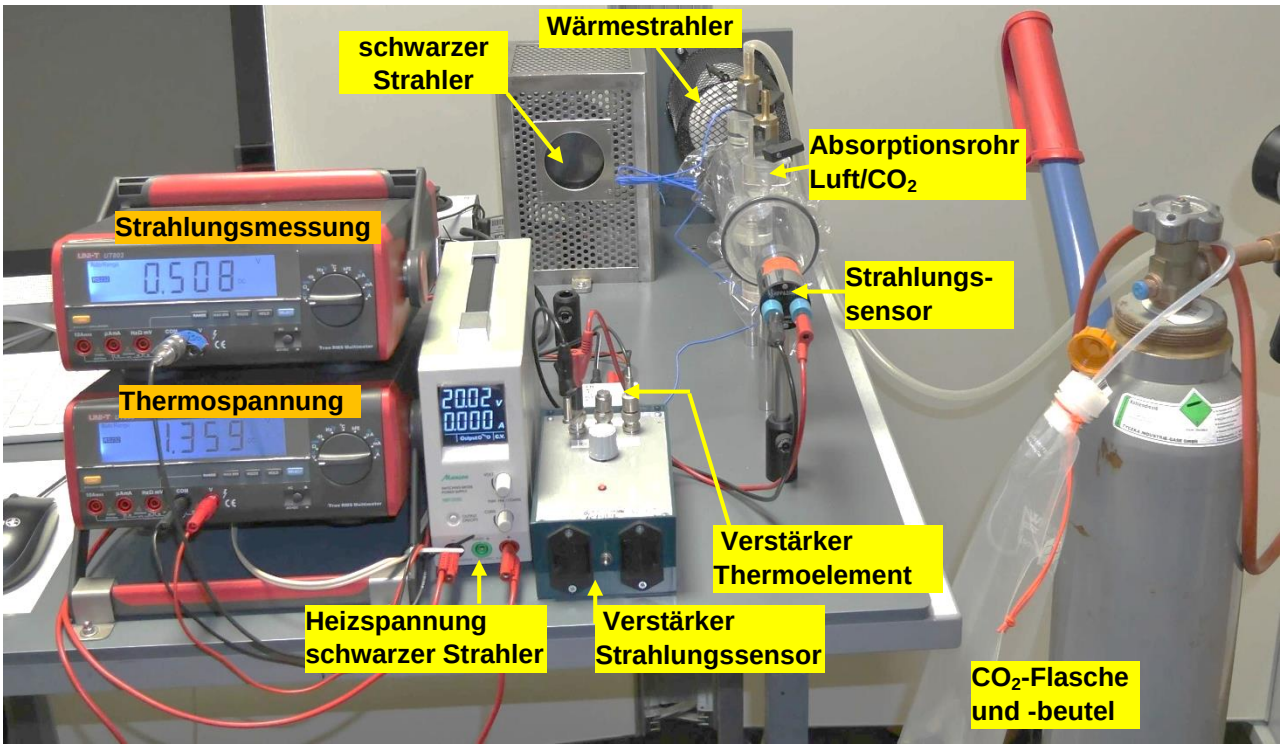


Abb.1: Aufbau der beiden Infrarotexperimente.

1. Absorption von Wärmestrahlung durch Kohlenstoffdioxid

Kohlenstoffdioxid (CO_2) ist nach Wasserdampf das wichtigste Spurengas in der Atmosphäre. Für den beobachteten Klimawandel wird von den Umweltphysikern überwiegend die Erhöhung der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre verantwortlich gemacht. CO_2 absorbiert Wärmestrahlung am stärksten in einem Wellenlängen-bereich von 13 µm bis 17 µm. In diesem Bereich liegt auch das Maximum der Strahlungsabgabe der Erde.

Da bei Zimmertemperatur die Gegenstände in diesem Wellenlängenbereich strahlen, eignet er sich nicht gut für eine Messung im Labor. Da CO_2 auch Infrarotstrahlung mit Wellenlängen um 5 µm gut absorbiert, arbeiten wir im vorliegenden Versuch mit dieser – erzeugt durch eine Terrarienlampe mit einer Temperatur von etwa 350 °C.

Die Wärmestrahlung der Keramiklampe durchquert einen 30 cm langen Plexiglaszylinder, der auf beiden Seiten mit Haushaltsfolie abgeschlossen ist, die IR-Strahlung nur wenig absorbiert. Im Zentrum des Plexiglasrohrs ist ein Thermoelement (Typ K10) angebracht, mit dem die Gastemperatur im Plexiglaszylinder gemessen wird.

Hinter dem Austrittsfenster wird die emittierte Wärmestrahlung mit einem Strahlungssensor gemessen, einer Thermosäule nach Moll. Diese besteht aus vielen

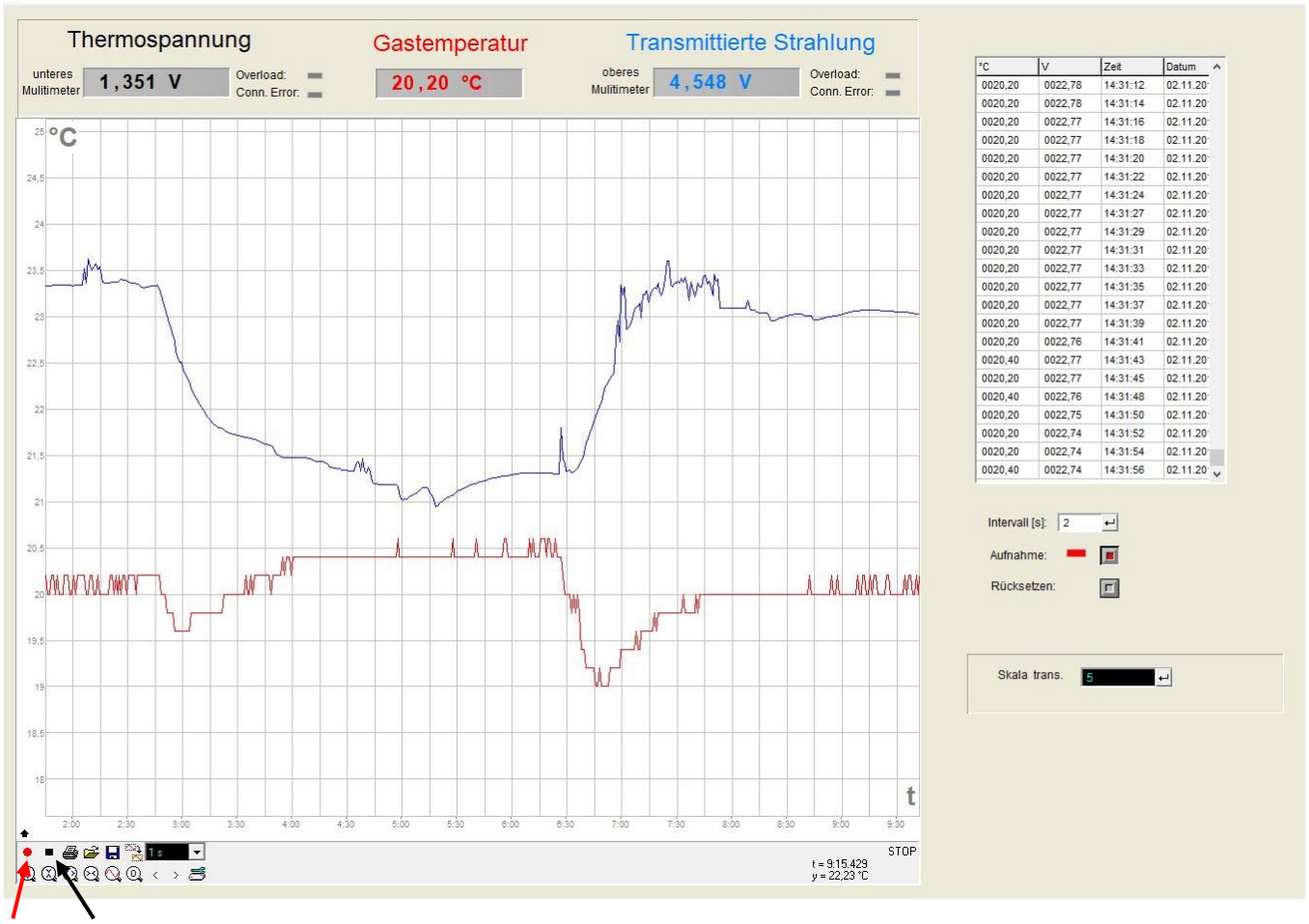
geschwärzten Thermowiderständen, die sich bei Bestrahlung erhitzen und eine Thermospannung proportional zur Intensität der Strahlung erzeugen (wenige mV). Die Spannung wird verstärkt und mit einem über USB auslesbaren Digitalmultimeter (DMM) gemessen.

Durchführung der Messung

- Zu Beginn ist das Absorptionsrohr mit Luft gefüllt
- Stellen Sie den Strahlungssensor in den Halter vor dem Plexiglasrohr

Abb. 2 Digitalmultimeter mit Anschlüssen

- Verbinden Sie den Output des Verstärkers für die Thermospannung mit dem unteren DMM. Es wird eine Spannung gemessen, nutzen Sie daher die Anschlüsse COM und V und stellen Sie den Auswahlschalter auf V (siehe Abb. 2). Verbinden Sie den Verstärker für den Strahlungssensor (Thermosäule) mit dem oberen DMM. Auch hier wird eine Spannung gemessen.
- Aktivieren Sie die USB Auslese durch Drücken des Knopfes RS232
- Starten Sie das Profilabprogramm CO2_Absorption. Sie sollten jetzt vernünftige Werte für die Spannung (hier ein Maß für die Strahlungsintensität; zunächst Werte im mV-Bereich) und die Gastemperatur sehen.
- Schalten Sie die Terrarienlampe mit dem Kippschalter ein
- Klicken Sie auf der Frontplatte des Programms CO2_Absorption auf den roten Knopf im Zeitdiagramm. Beobachten Sie nun den Verlauf der Strahlungs-intensität und der Temperatur. Warten Sie, bis beide Messwerte konstant geworden sind. Das kann länger als 15 Minuten dauern.
- Füllen Sie in der Wartezeit den CO_2-Beutel aus der Kohlensäureflasche, damit das Gas temperieren kann



Start Stopp *Abb. 3: Frontplatte des Profilabprogramms CO2_Absorption*

Jetzt kann die Absorptionsmessung beginnen:

- Starten Sie das Zeitdiagramm neu (Klick auf roten Punkt) und zeichnen Sie die Daten mit Luftfüllung im Rohr für etwa 2 Minuten weiter auf.
- Falls gewünscht können Sie jetzt die Messdaten auch noch als Tabelle ausgeben, um die Änderungen beim Wechsel zu CO_2 zu registrieren. Hierzu klicken Sie auf den Knopf *Aufnahme*.
- Verbinden Sie den Schlauch des CO_2 Beutels mit dem Einfüllstutzen am Plexiglaszylinder und öffnen Sie beide Hähne. Drücken Sie das CO_2 mit leichtem Druck in den Zylinder. Sie sollten dabei beobachten, dass im Diagramm die Intensität der transmittierte Strahlung sehr schnell kleiner wird.
- Schließen Sie beide Hähne wieder
- Sobald sich die Messwerte stabilisiert haben ($\geq$ 2 Minuten), öffnen Sie beide Hähne und pumpen Luft durch
- Sobald sich die Messwerte erneut stabilisiert haben, stoppen Sie die Messung

Interpretieren Sie die Messergebnisse. Wie erklären sie den Temperaturverlauf?

1.2 Messung der Temperaturabhängigkeit eines schwarzen Strahlers

Einer der beiden Aufbauten bietet auch die Möglichkeit, die Temperaturabhängigkeit der Strahlungsintensität eines schwarzen Strahlers zu messen.

Der „schwarze Strahler“ ist hier eine schwarz eloxierte Messingscheibe (= obere Schicht oxidiert und dadurch schwarz), die mit einem Heizband elektrisch erhitzt wird von Zimmertemperatur bis auf ca. 125 ^{o}C. Als Stromquelle dient ein Niederspannungsnetzgerät (0 – 20 V).

Die emittierte Wärmestrahlung wird mit einer Thermosäule nach Moll gemessen, wie schon beim Versuch *CO_2-Absorption* (siehe dort). Die Spannung wird verstärkt und von einem über USB auslesbaren Digitalmultimeter (DMM) wiedergegeben. Zur Temperaturmessung der Platte ist auf diese ein PT100 Widerstand geklebt, dessen Widerstand sich im Messbereich linear mit der Temperatur ändert. Dieser Widerstand wird durch ein zweites DMM gemessen.

Zur Datenauslese und Auswertung werden, wie beim Versuch *CO_2-Absorption,* die Digitalmultimeter über USB-Schnittstellen durch einen Rechner ausgelesen. Das nun verwendete Profilabprogramm heißt T_Potenzen. Dieses zeigt auf seiner Frontplatte die momentanen Messwerte, die Temperatur und Intensität als Funktion der Zeit und Plots der Intensität vs. T, T^2 und T^4 an.

Durchführung der Messung

Schließen Sie die beiden Bananenstecker mit der Aufschrift T4PT100 an das untere DMM an und wählen sie den Messmodus Ω (Abb. 1). Das verstärkte Spannungssignal der Mollsäule sollte bereits am oberen DMM anliegen. Verbinden Sie das Netzgerät mit der Heizung des schwarzen Strahlers (grüne Bananenbuchsen).

Starten Sie auf dem Desktop das Programm T_Potenzen.

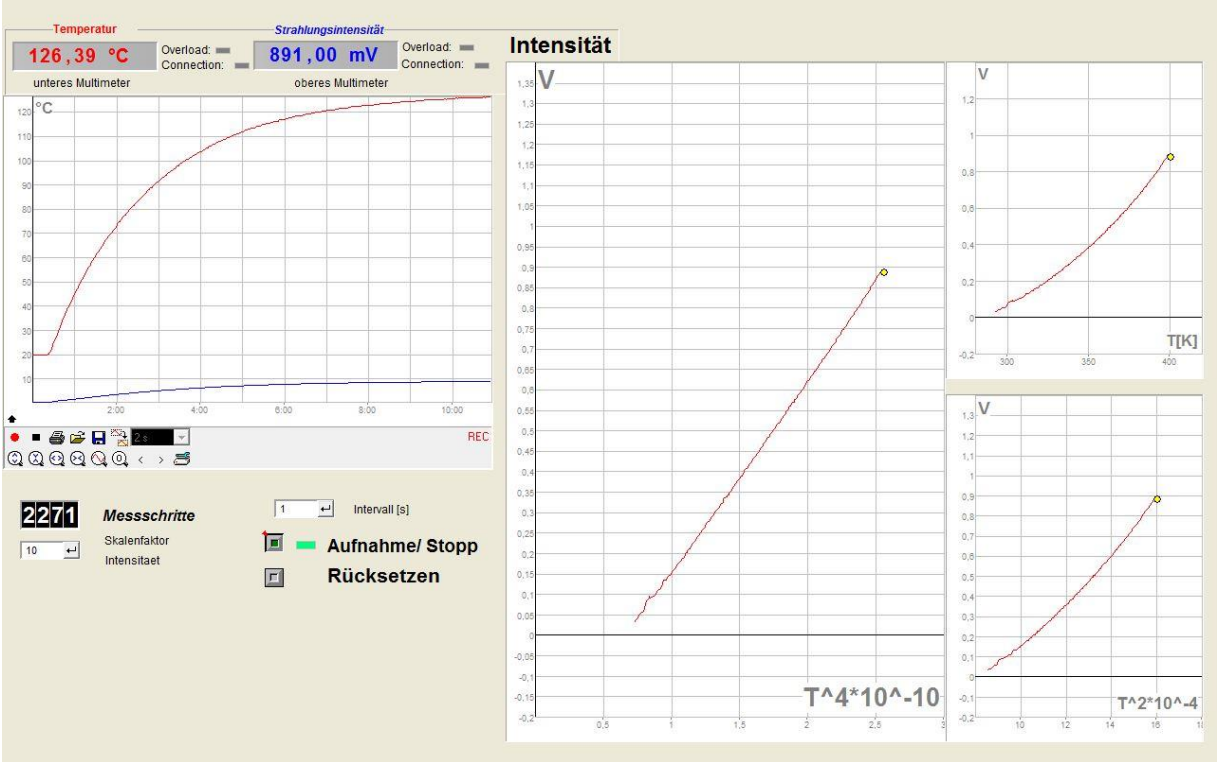


Abb.4: Frontplatte für die Messung der Temperatur-Abhängigkeit der Intensität.

Es erscheint das oben gezeigte Fenster (Frontplatte; hier gezeigt nach fortgeschrittener Messung). Sie sollten jetzt in den beiden numerischen Feldern oben links die Temperatur (Zimmertemperatur) und die Spannung sehen, die das obere DMM anzeigt. Falls das nicht der Fall ist, dann sind die DMM noch nicht für die Auslese aktiviert. Drücken sie in diesem Fall an den DMM's die Tasten RS232.

Das Programm ist jetzt zur Messung bereit.

- Starten Sie die Messaufnahme durch Klick auf Aufnahme/Stopp.
- Drehen Sie die Spannung des Netzgerätes auf 10 V und schalten Sie den Ausgang ein (kleiner Knopf am Gerät unten links). Das Schaltersymbol im Anzeigefenster schließt sich.
- Beobachten sie auf der Profilab-Frontplatte die Änderungen von Temperatur- und Spannungsanzeige. Sobald sich beide stabilisiert haben, drehen Sie die Spannung in 2 V – Schritten weiter hoch. Die Temperatur sollte etwa mit 0.5 Grad pro Sekunde steigen, damit genügend Zeit ist, um bei der Auslese im Strahlungsgleichgewicht zu sein.
- Dabei sollte sich in den drei Diagrammen rechts Messpunkte bewegen und rote Messdiagramme Intensität gegen T, T^2 und T^4 erzeugen. Im y-t-Diagramm links sehen Sie, wie sich die beiden Messwerte zeitlich verändern.
- Erhöhen Sie die Spannung bis auf 20 V. Die Temperatur sollte dabei am Ende etwa 125 °C erreichen.
- Stoppen Sie die Messung und speichern Sie das Bild der Frontplatte mit Hilfe des Snipping Tools (Teil von Windows) für ihr Protokoll und/oder drucken Sie es aus

Bitte beachten sie:

Das Profilabprogramm berechnet die Temperatur in Celsius aus der Widerstands-messung nach der Formel

$$t\,[°C] = \frac{E_0}{(100-1)\cdot 0{,}0039083},$$

wobei E_0 der ausgelesene Widerstandswert ist. Für den rechten Graphen berechnet das Programm u.a. die 4. Potenz der absoluten Temperatur. Sie hat die Größen-ordnung 10^{10}. Um das Diagramm übersichtlicher zu machen, wird der T^4-Wert daher mit10^{-10} multipliziert.

Wie wächst die Intensität der Strahlung mit der absoluten Temperatur?

Anhang 1: Zur Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers

Ein schwarzer Strahler ist ein Körper, der elektromagnetische Strahlung – insbesondere Strahlung im Sichtbaren und im Infraroten – im gesamten Wellenlängenbereich vollständig absorbiert. Wenn ein solcher Strahler im Temperaturgleichgewicht mit der Umgebung ist, dann hängt die Intensität seiner Wärmeabstrahlung nur noch von seiner Temperatur T ab.

Für die Intensität I der gesamten von der Oberfläche abgestrahlten Energie pro m^2 gilt dann das Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$I\ [W/m^2] = \sigma \cdot T^4$$

T ist dabei die absolute Temperatur und σ die universelle Stefan-Boltzmann Konstante.

Die Spektren der Wärmestrahlung sind kontinuierlich und zeigen ein Maximum, das sich mit höherer Temperatur zu immer kürzeren Wellenlängen verschiebt (Planck'sches Spektrum). Die Gesamtintensität I entspricht der Fläche unter den Kurven.

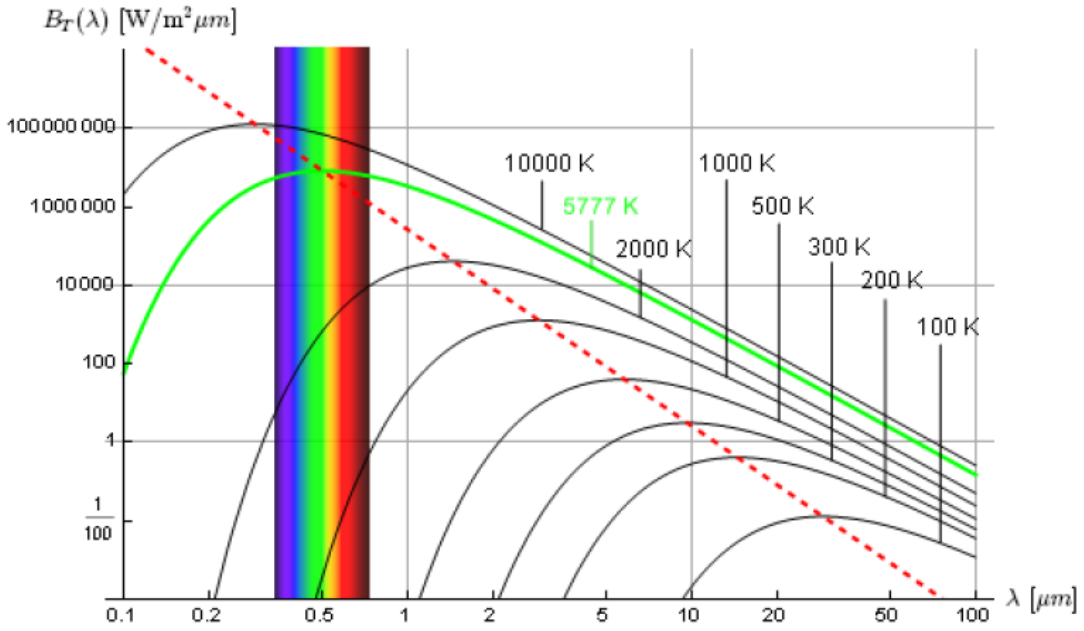


Abb.5: Spektrale spezifische Ausstrahlung $B_T(\lambda)$ eines schwarzen Körpers in logarithmischer Auftragung. Der gefärbte Wellenlängenbereich entspricht dem des sichtbaren Lichts

In einem der beiden Experimente wird die T^4 Abhängigkeit einer eloxierten Messingplatte gemessen – sie ist in guter Näherung ein schwarzer Strahler.

Das gilt nicht für aller Wärmestrahler. Die im 2. Experiment genutzte Terrarienlampe zeigt zum Beispiel ein stark abweichendes Verhalten (Abb.2).

Intensität

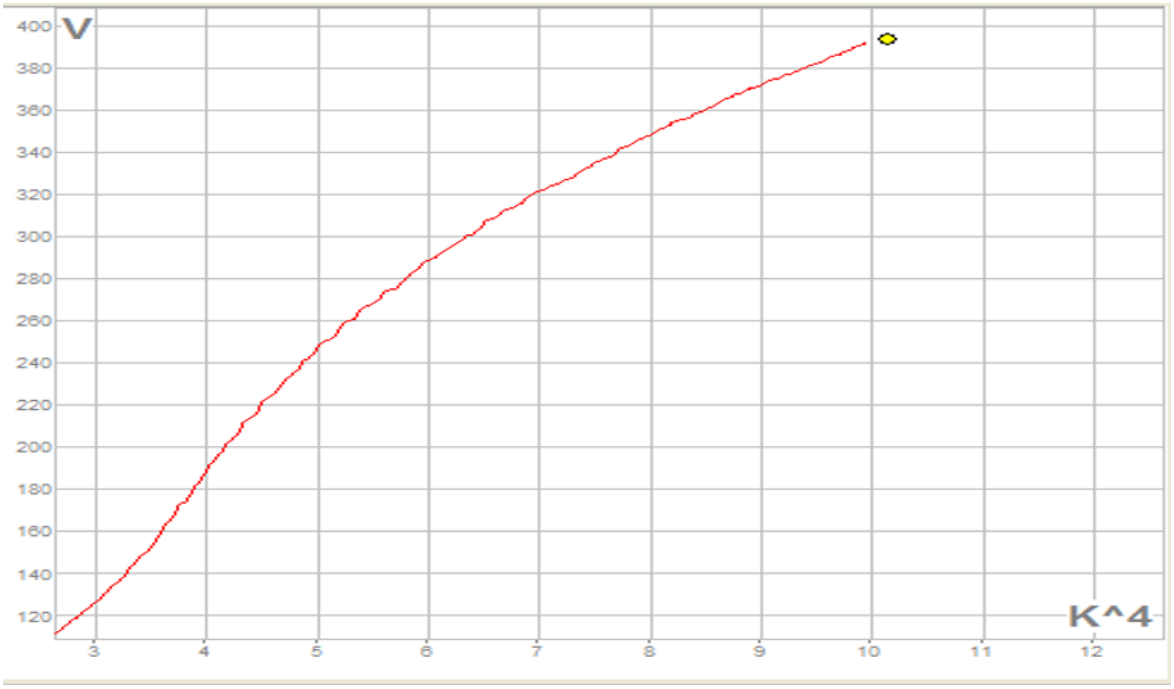


Abb.6: gemessene Intensität der Wärmestrahlung einer keramischen Terrarien-lampe gegen die 4. Potenz der absoluten Temperatur. Sie ist offensichtlich kein schwarzer Strahler.

Anhang 2: Absorption von Wärmestrahlung durch CO_2.

Wärmestrahlung wird von CO_2 in zwei Bereichen um 4.26 µm und 15 µm absorbiert.

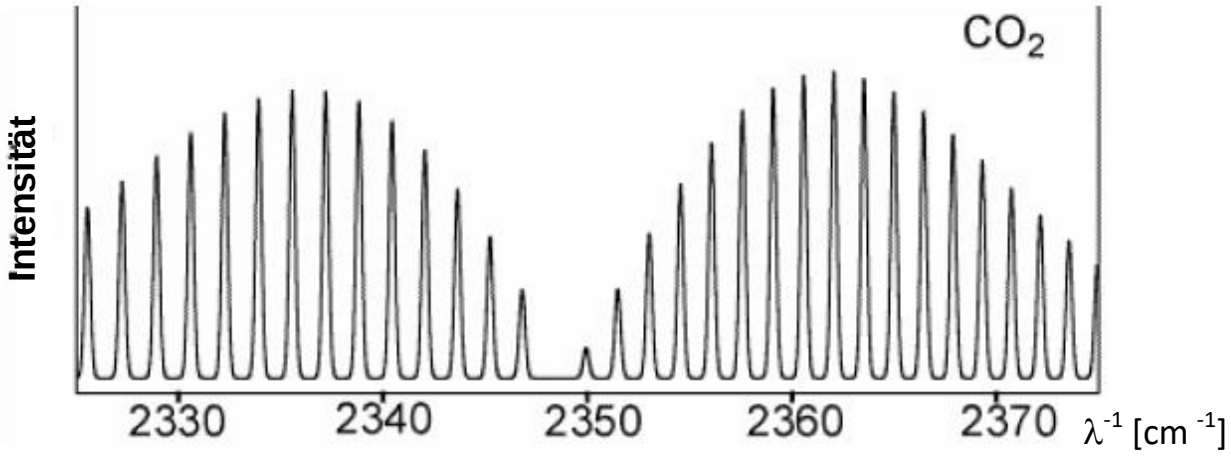


Abb. 7: Berechnetes CO_2-Absorptionsspektrum.
Hier ist der Kehrwehrt der Wellenlänge aufgetragen, von 4,30 µm (ganz links) bis 4,21 µm (ganz rechts).

Wie obige Abbildung zeigt, handelt es sich nicht um eine einzige Absorptionslinie sondern um eine ganze Familie von Linien, die dadurch entstehen, dass im CO_2-Molekül eine Schwingung angeregt wird bei der zentralen Wellenlänge 4.26 µm und in den meisten Fällen sich gleichzeitig die Rotation des Moleküls ändert.

Die absorbierte Energie wird sehr schnell wieder als „Fluoreszenzphoton“ abgegeben. Dieses wird in eine beliebige Richtung zufällig emittiert und kann eine etwas größere oder kleinere Frequenz als das absorbierte Photon haben, da sich im Allgemeinen der Rotationszustand des Moleküls ändert.

Da im Versuch Energie im CO_2 absorbiert wird, stellt sich ein neues Gleichgewicht ein, bei dem die Moleküle im Mittel schneller rotieren als vorher und durch Stöße zwischen den Molekülen dann auch ihre mittlere Geschwindigkeit größer wird. → Die Temperatur des Gases, die proportional zur mittleren Bewegungsenergie der Moleküle ist, erhöht sich.

Für die Strahlungsbilanz in der Atmosphäre bedeutet das:

- CO_2 in der Atmosphäre absorbiert einen Teil der von der Erde emittierten Wärmestrahlung (hauptsächlich bei 15 µm) und erwärmt sich dabei etwas.
- Die absorbierte Energie wird überwiegend sofort wieder emittiert und zwar in alle Richtungen. Das heißt, etwa die Hälfte wird zur Erde zurückgestrahlt, die andere in höhere Luftschichten, wo sie eventuell nochmals absorbiert wird oder in das Weltall entweichen kann.

Die zur Erde zurückgestrahlte Wärmestrahlung erhöht die Temperatur auf der Erdoberfläche im Vergleich zu einer Lufthülle ohne CO_2. Dies ist der Beitrag des CO_2 zum natürlichen Treibhauseffekt der Erdatmosphäre (ca. $^1/_3$ des Effekts), einen größeren Beitrag dazu liefert der Wasserdampf in der Lufthülle (ca. $^2/_3$).

Wenn sich der CO_2-Anteil in der Luft erhöht, muss die mittlere Temperatur auf der Erde steigen.