

Versuchsanleitungen zu den Experimenten mit Wärmestrahlung

1. CO₂ Absorption und T⁴ Gesetz.

Die Versuchskomponenten sind überwiegend auf einem Experimentierbrett fest montiert.

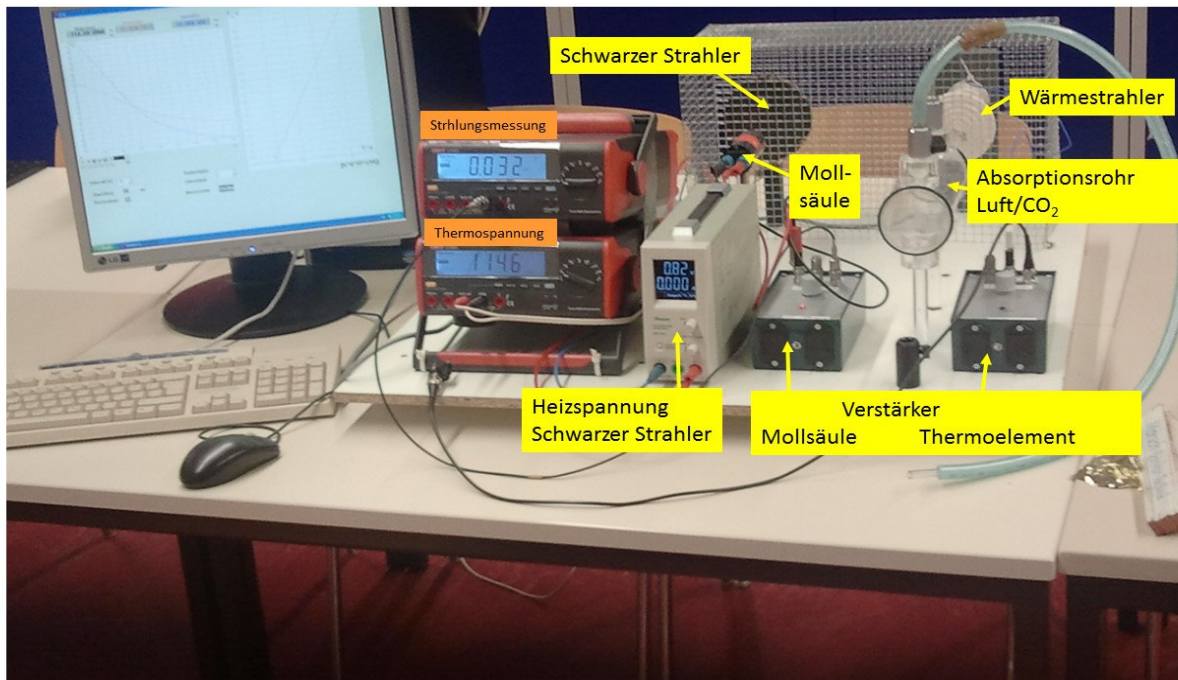


Abb.1: Aufbau der beiden Infrarotexperimente.

Zu den auf dem Experimentierbrett fest montierten und verkabelten Komponenten müssen noch folgende Verbindungen hergestellt werden:

- USB Anschluss der beiden Digitalmultimeter am Rechner (Buchsen und Kabel sind markiert).

1.1 Messung der Temperaturabhängigkeit eines schwarzen Strahlers

Der ‚schwarze Strahler‘ ist hier eine schwarz eloxierte Messingscheibe, die mit einem Heizband elektrisch erhitzt wird von Zimmertemperatur bis auf ca. 125 °C. Als Stromquelle dient ein Niederspannungsnetzgerät (0 – 20 V).

Die emittierte Wärmestrahlung wird mit einer Thermosäule nach Moll gemessen. Diese besteht aus vielen geschwärztem 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 gemessen. 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 Digitalmultimeter gemessen.

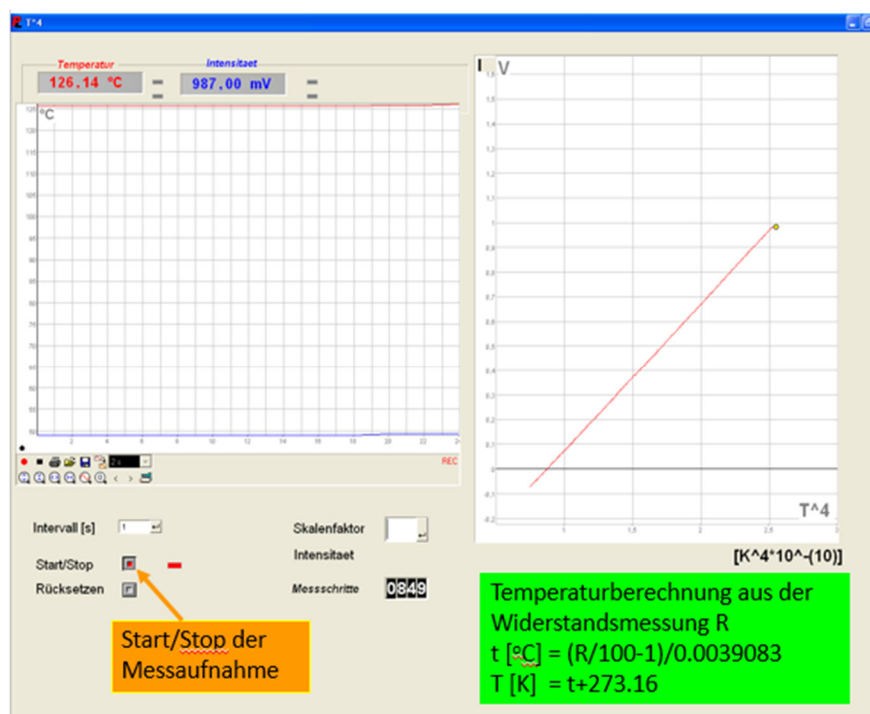
Zur Datenauslese und Auswertung werden die Digitalmultimeter über USB Schnittstellen durch einen Rechner ausgelesen, auf dem das [ProfilabExpert](#) Programm [T4messung](#) läuft. Dieses zeigt auf seiner Frontplatte die instantanen Messwerte, die Temperatur und Intensität als Funktion der Zeit und den Plot Intensität vs. T^4 .

Durchführung der Messung

Schließen sie die beiden Bananenstecker mit der Aufschrift T4PT100 an das untere DMM an und wählen sie den Messmodus Ω . 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 [T4messung](#). Es erscheint die unten gezeigte Frontplatte.



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'n die Tasten [RS232](#).

Das Programm ist jetzt zur Messung bereit.

- Starten sie die Messaufnahme durch Klick auf den roten Knopf (Start/Stop)
- 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 beides stabilisiert hat 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 im rechten Diagramm ein Messpunkt bewegen und eine rotes Messdiagramm Intensität gegen 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 für ihr Protokoll. (Screen Shot ([Fn+S-Abf](#)), starten sie das Programm [Paint Start→Ausführen → mspaint](#) und fügen sie die Ablage in das Paint-Fenster ein..

Bitte beachten sie:

Das Profilabprogramm berechnet die Temperatur in Celsius aus der Widerstandsmessung nach der Formel $t [^{\circ}\text{C}] = (E0/100-1)/0.0039083$ wobei E0 der ausgelesene Widerstandswert ist. Für den rechten Graphen berechnet das Programm die 4. Potenz der absoluten Temperatur. Sie hat die Größenordnung 10^{10} . Um das Diagramm übersichtlicher zu machen wird der T^4 Wert daher mit $10^{(-10)}$ multipliziert.

Sie können sich das graphische Profilab-Programm auch gerne selbst anschauen oder erklären lassen → dazu Programm [T4messungsource](#) starten.

Wie wächst die Intensität der Strahlung mit der absoluten Temperatur?

1.2 Absorption von Wärmestrahlung durch Kohlendioxid

Kohlendioxid ist nach Wasserdampf das wichtigste Spurengas und für den beobachteten Klimawandel wird von den Umweltphysikern überwiegend die Erhöhung der CO₂ Konzentration in der Atmosphäre verantwortlich gemacht. Dafür ist fast nur eine starke Absorptionsbande im Bereich von 15 µm verantwortlich, die etwa im Maximum der Wärmestrahlungsemission der Erde bei 390 K liegt. Den Effekt dieser Bande im Labor zu messen ist schwierig, da 390 K Zimmertemperatur

entspricht. Wenn eine Wärmequelle höherer Temperatur genutzt wird, dann verschiebt sich die Emission zu kürzeren Wellenlängen und der Prozentsatz der absorbierten Wärmestrahlung wird geringer.

Im Versuch wird daher eine Wärmequelle (Terrarienlampe) mit einer Temperatur von etwa 350 °C genutzt, bei der das Maximum der Emission bei etwa 5 µm liegt. Dies deckt sich gut mit einer zweiten starken Absorptionsbande bei etwa 4.3 µm.

Die Wärmestrahlung der Keramiklampe durchquert einen 30 cm langen Plexiglaszylinder, der auf beiden Seiten mit Haushaltsfolie abgeschlossen ist, die IR Strahlung nur wenig absorbiert. Hinter dem Austrittsfenster wird die Transmittierte Strahlung mit der Thermosäule gemessen.

Im Zentrum des Plexiglasrohrs ist ein Thermoelement (K10) angebracht, mit dem die Gastemperatur im Plexiglaszylinder gemessen wird.

Durchführung der Messung

- Stellen sie die Mollsäule in den Halter vor dem Plexiglasrohr.
- Verbinden sie den Output des Verstärkers für die Thermospannung mit dem unteren Digitalmultimeter. Es wird eine Spannung gemessen, nutzen sie daher die Anschlüsse **COM** und **V** und stellen sie den Auswahlschalter auf **V**.
- Zu Beginn ist der Zylinder mit Luft gefüllt
- Starten sie das Profilabprogramm **CO2absorption** und starten sie die Datennahme



- Schalten sie die Terrariumlampe mit dem Kippschalter ein
- Beobachten sie den Verlauf der Strahlungsintensität und der Temperatur auf der Frontplatte durch Klick auf den roten Knopf im Zeitdiagramm. Warten sie, bis beide Messwerte konstant geworden sind. Das kann bis zu 15 Minuten dauern.

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 CO₂ zu registrieren. Hierzu auf den Knopf Aufnahme klicken.
- Füllen sie in der Wartezeit den CO₂ Beutel aus der Kohlensäureflasche der SodaClub Füllstation, damit das Gas temperieren kann
- Verbinden sie den Schlauch des CO₂ Beutels mit dem Einfüllstutzen am Plexiglaszylinder und öffnen sie beide Hähne. Drücken sie das CO₂ mit leichtem Druck in den Zylinder. Sie sollten dabei beobachten, dass im Diagramm die transmittierte Strahlung sehr schnell kleiner wird.
- Schließen sie beide Hähne wieder.
- Beobachten sie die gemessene Strahlung und die Gastemperatur. Stoppen sie die Messung sobald sich die Messwerte stabilisiert haben +2 Minuten.
- Drucken sie das Diagramm aus.

Interpretieren sie die Messergebnisse. Wie erklären sie den Temperaturverlauf?

A1: Zur Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers

Ein schwarzer Strahler ist ein Körper, der elektromagnetische Strahlung – insbesondere Strahlung im optischen und Infrarotbereich 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

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

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.

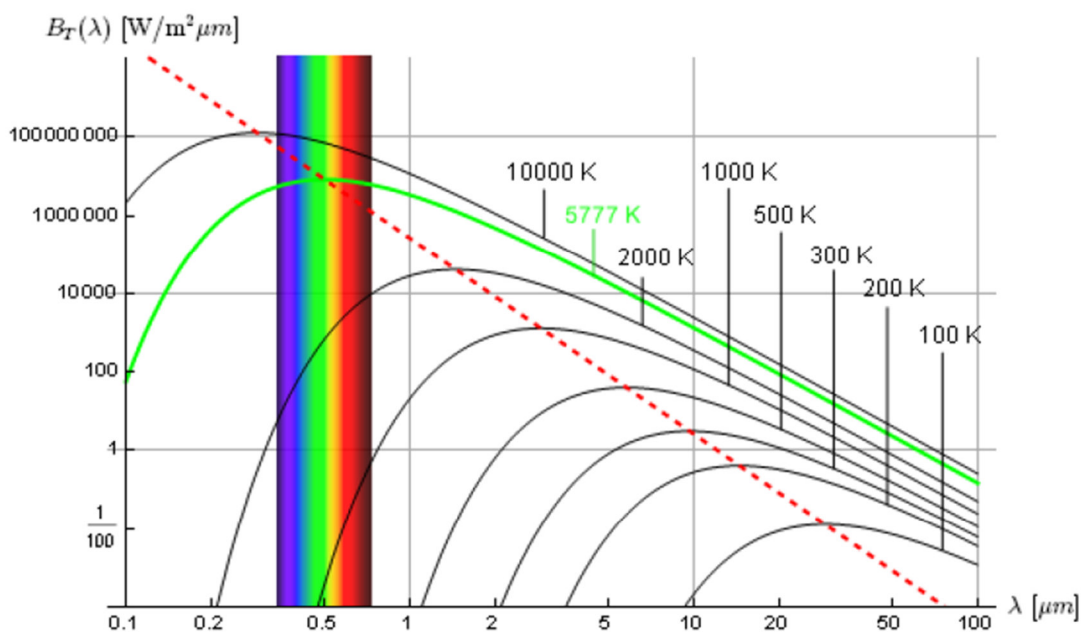


Abb.1: Spektrale spezifische Ausstrahlung $B_T(\lambda)$ eines schwarzen Körpers in logarithmischer Auftragung. Der gefärbte Wellenlängenbereich entspricht dem des sichtbaren Lichts

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

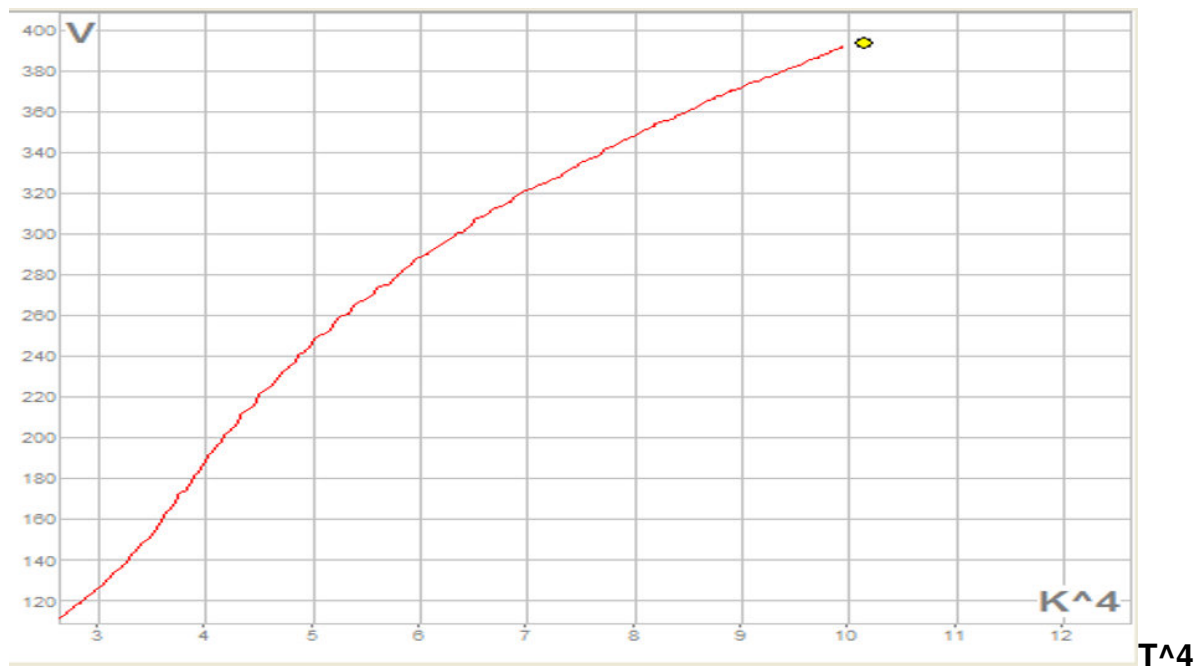


Abb.2: gemessene Intensität der Wärmestrahlung einer keramischen Terrarienlampe gegen die 4. Potenz der absoluten Temperatur. Sie ist offensichtlich kein ‚schwarzer‘ Strahler.

A2: Absorption von Wärmestrahlung durch CO₂.

Wärmestrahlung wird von CO₂ in zwei Bereichen um 4.26 μm und 15 μm absorbiert.

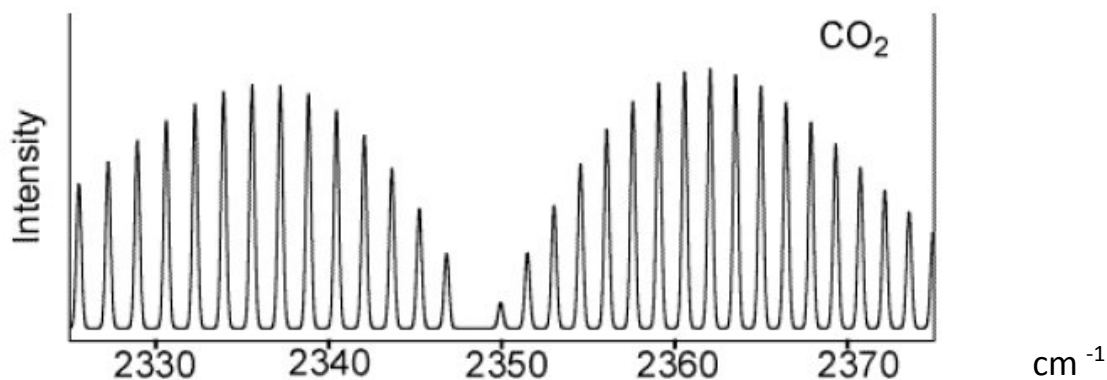


Fig.1: Calculated CO₂ absorption spectrum (4,30 μm – 4,21 μm)

Wie obige Abbildung zeigt, handelt es sich nicht um eine einzige Absorptionslinie sondern um eine ganze Familie von Linien, die dadurch entstehen, dass im CO₂-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 $15\ \mu\text{m}$) 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 Effekt), 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.