

# Spektroskopie und Umweltphysik der Atmosphäre: Experimente im Schülerlabor

## Material zur Vorbereitung für Schüler und Lehrer

Der Strahlungshaushalt der Erde, der das globale Klima bestimmt, ist dominiert von

- Der Sonneneinstrahlung und Absorption des Sonnenlichts auf der Erdoberfläche und zu einem kleinen Teil auch in der Atmosphäre.
- Der Wärmeabstrahlung von der Erdoberfläche
- Der Atmosphäre, die durch Absorption und Emission von Wärmestrahlung die mittlere Oberflächentemperatur der Erdoberfläche im Strahlungsgleichgewicht von 5 °C auf komfortable 20 °C anhebt (natürlicher Treibhauseffekt).

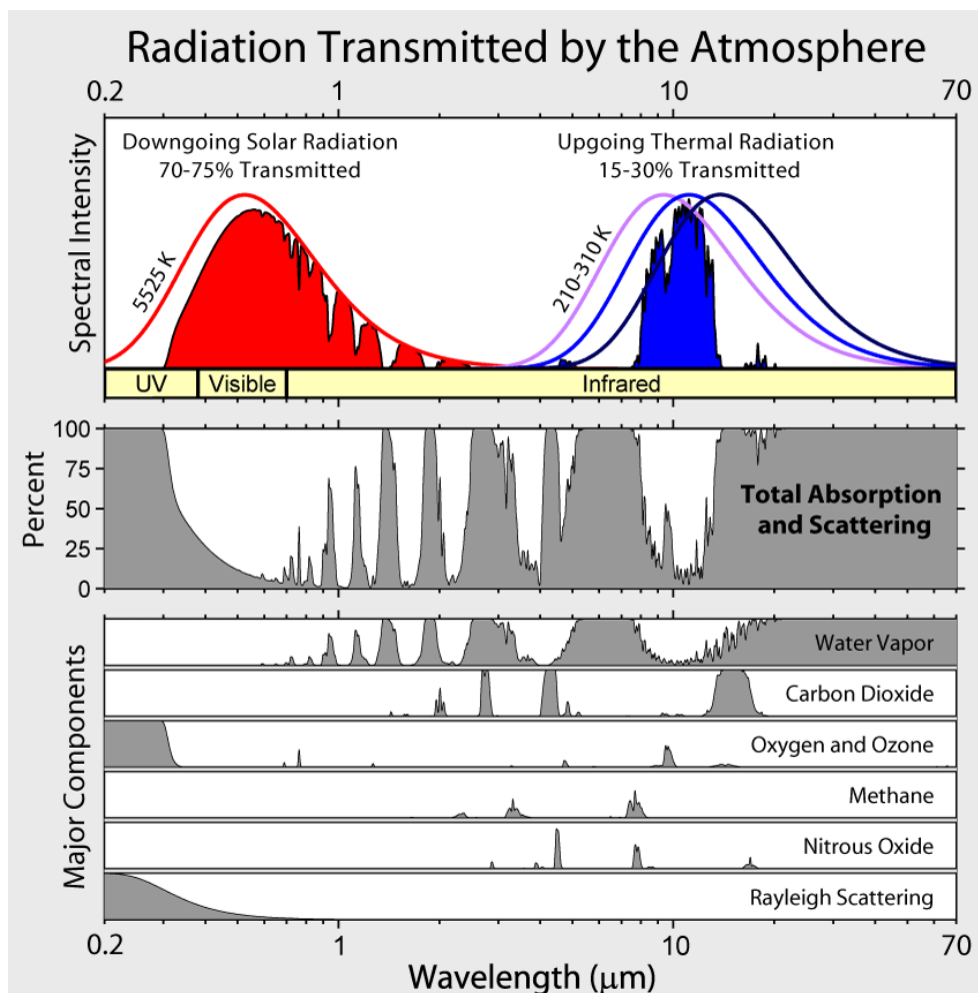


Abb.1: Die am Erdboden ankommende Sonnenstrahlung (rotes Spektrum) und die von der Erde direkt abgestrahlte Infrarotstrahlung (blaues Spektrum) werden stark durch Treibhausgase stark beeinflusst insbesondere durch Wasserdampf und  $\text{CO}_2$ .

Die experimentellen Methoden, mit denen der Strahlungshaushalt der Erde untersucht wird, basieren hauptsächlich auf Strahlungsmessungen und spektroskopischen Messungen der Atmosphäre vom Erdboden oder von Satelliten aus.

Das Schülerlabor soll den Schülern erlauben, durch eigene Experimente zur Strahlung, Emission und Absorption im sichtbaren und Infrarotbereich wichtige physikalische Grundlagen zum Strahlungshaushalt der Erde zu verifizieren und zu verstehen. Ebenso lernen sie, wie kurzlebige Spurengase wie z.B.  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , die zur Luftverschmutzung und zum Strahlungshaushalt beitragen, gemessen werden können. Natürlich lernen sie damit auch experimentelle Grundlagen der Strahlungsmessung und der Spektroskopie kennen.

Im Schülerlabor sind drei Experimentgruppen verfügbar, aus denen die Schüler selbst (in Zweiergruppen) Experimente durchführen. Ergänzt werden diese Experimente durch Demonstrationsobjekte und Poster.

## Experimentgruppe 1: Sichtbares Licht

### 1.1 Sonnenspektrum, Absorption und Fluoreszenz.

Messung des "Sonnenspektrums bzw. des Streulichts aus der Atmosphäre" und Demonstration von Absorption und Fluoreszenz.

Hierzu wird ein USB Gitterspektrometer genutzt, das in einem Wellenlängenbereich von 230 bis 950 nm das Spektrum auf 1 nm genau registriert.

Die Aufnahme des Spektrums mit Hilfe eines PC ist eine Sache von wenigen Minuten.

Die Schüler sollen das Spektrum interpretieren, die Oberflächentemperatur der Sonne abschätzen und solare und terrestrische Fraunhoferlinien zuordnen.

Als Ergänzung wird die Absorption und Fluoreszenz von weißem Licht (Halogenstrahler) in Natriumdampf nachgewiesen. Hierzu wird eine Natriumdampföhre genutzt, durch die ein Bündel weißen Lichts einer Halogenlampe geschickt wird. Gemessen wird das Spektrum mit dem Spektrometer im Durchlicht (Absorption) und senkrecht dazu (Fluoreszenzlicht). Das Verständnis von Absorption und Emission von Strahlung ist grundlegend für das Verständnis der Vorgänge in der Atmosphäre.

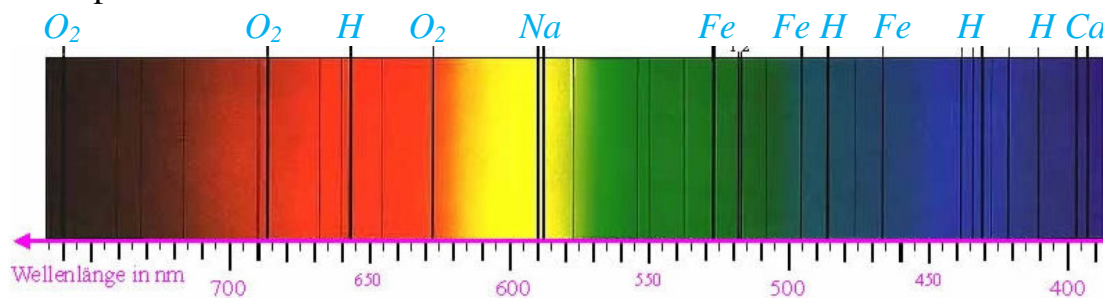


Abb. 1a: Fraunhoferspektrum der Sonne mit Linienzuordnung

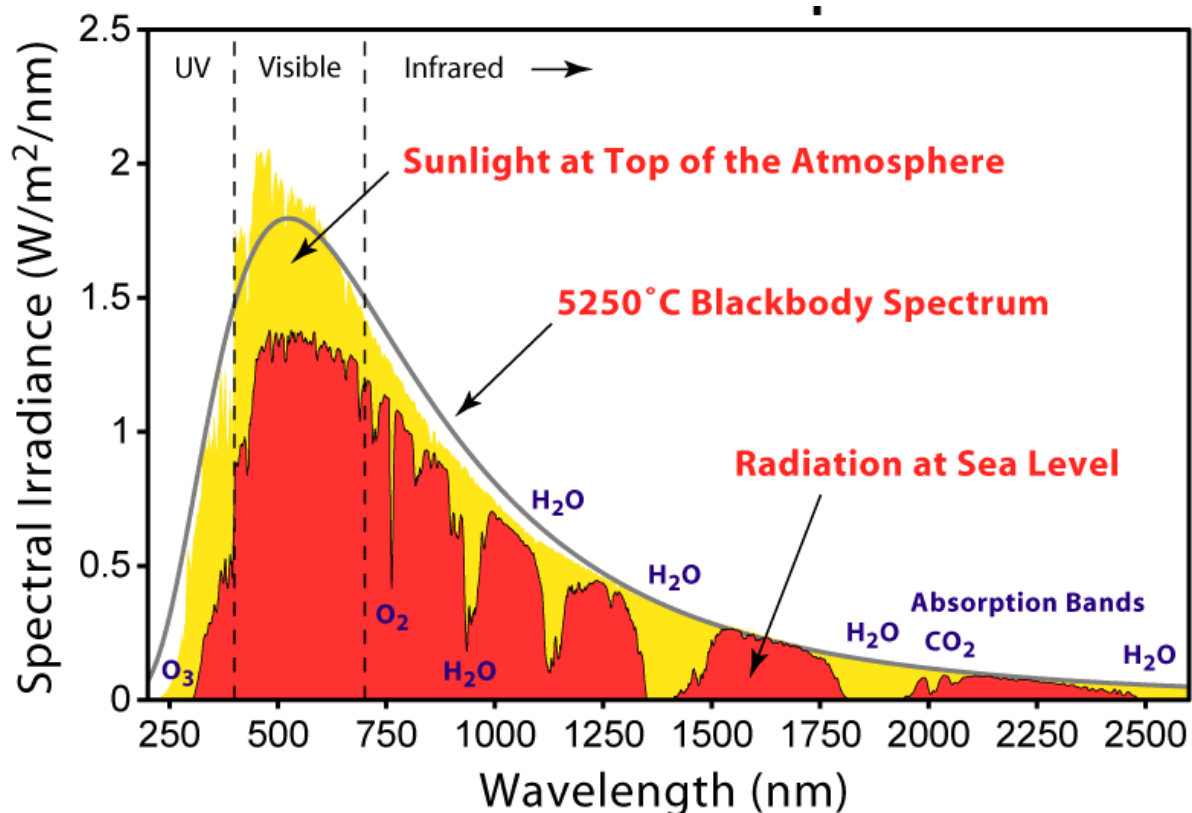


Abb. 2: Das Spektrum der Sonne außerhalb der Atmosphäre und am Erdboden im Vergleich zum Spektrum eines schwarzen Strahlers mit einer Temperatur von 5250 °C.

## 1.2 Spektralanalyse

Die von Bunsen und Kirchhoff ‚erfundene‘ Spektralanalyse ist die wahrscheinlich wichtigste physikalische Methode zur Identifizierung von Elementen und Molekülen. Sie liefert als einzige Informationen zur chemischen Zusammensetzung der leuchtenden Materie im Weltall (Sterne, Gasnebel,...). Die Methode wird im Schülerlabor mit Hilfe von Funkenentladungen genutzt, welche die Atome der Elektroden ionisieren.

Hierzu nehmen Schüler mit einem 2. Spektrometer die Spektren von Funkenentladungen verschiedener Elektrodenmaterialien auf und ordnen die beobachteten Spektrallinien mit Hilfe von Spektraltabellen den Elementen zu.

## 1.3 Zusatznutzen

Der experimentelle Aufbau kann danach durch die Schüler auch genutzt werden um sich die Spektren einiger Lichtquellen anzuschauen wie Glühlampe, Energiesparlampe, LED's, Smartphonedisplay.

## Experimentgruppe 2: Wärmestrahlung

In einer Folge kleiner Experimente sollen wichtige Eigenschaften der Wärmestrahlung und Absorptionseigenschaften von  $\text{CO}_2$  im Infrarotbereich untersucht werden. Kohlendioxid ist nach Wasserdampf das zweitwichtigste Treibhausgas in der Erdatmosphäre. Die starke Zunahme der  $\text{CO}_2$  Konzentration durch die Industrialisierung führt zur Erhöhung der mittleren Bodentemperatur auf der Erde (antropogener Treibhauseffekt).  $\text{CO}_2$  Absorption begrenzt das Infrarotfenster auf der langwelligen Seite (siehe Abb.1).

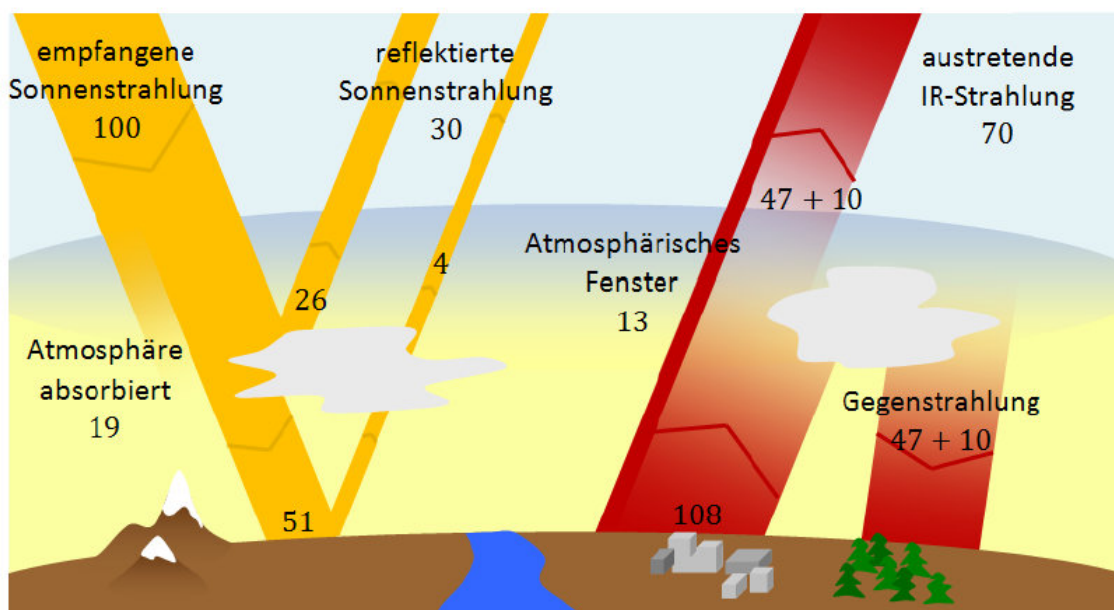


Abb.3: Strahlungsbilanz der Erde in Prozent, normiert auf die Solarkonstante von  $1367 \text{ W/m}^2$ . Etwa 70% der auf die Erde einfallenden Sonnenstrahlung werden auf dem Erdboden oder in der Atmosphäre absorbiert. Die von der Erde abgestrahlte Wärmestrahlung hat insgesamt dieselbe Leistung, es werden aber nur 13% direkt in das Weltall abgestrahlt (im Infrarotfenster), der Rest wird durch die Treibhausgase meist mehrfach absorbiert, emittiert und letztlich aus höheren kälteren Schichten der Atmosphäre abgestrahlt.

Der Effekt der Treibhausgase ist sehr gut zu sehen, wenn man das von Satelliten aus gemessene Spektrum der Wärmeabstrahlung mit dem am Erdboden gemessenen vergleicht (Abb.4)

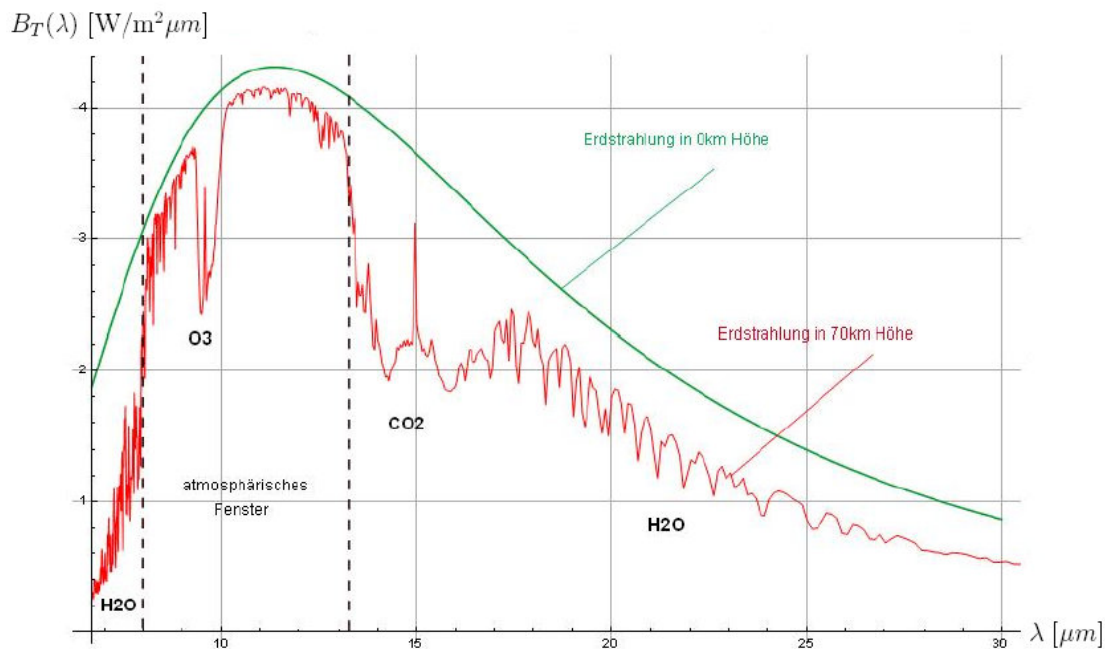


Abb.4: Gemessene Wärmeabstrahlung der Erde in Bodennähe (grüne Kurve) und aus großer Höhe (rote Kurve). Der Absorptionseffekt der wichtigsten Spurengase ist gut erkennbar.

## 2.1 Absorption von IR-Strahlung durch $\text{CO}_2$ und Temperaturerhöhung des Gases

Hierzu wird zwischen IR-Quelle (betrieben bei  $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und Detektor ein Plexiglasrohr gestellt, das 2 IR-durchlässige Fenster aus Polyethylen hat. Dieses ist erst mit Luft gefüllt und wird dann mit  $\text{CO}_2$  gefüllt.

Gemessen werden:

- die durch das Rohr transmittierte Infrarotstrahlungsleistung mit einem Strahlungsdetektor hinter dem Rohr
- die Gastemperatur im Rohr. Die Temperatur steigt wenn  $\text{CO}_2$  eingefüllt wird, weil durch die Einstrahlung von Wärmestrahlung das  $\text{CO}_2$  Molekül zu verstärkter Rotation angeregt wird und damit durch Molekülstöße auch zu höherer Translationsenergie.

*Hinweis: hier wird die Absorptionsbande des  $\text{CO}_2$  bei  $4.26 \mu\text{m}$  genutzt, die bei  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  im Maximum der Emission liegt. Dies ist NICHT die  $15 \mu\text{m}$ -Bande, die für den 'Treibhauseffekt in der Atmosphäre' verantwortlich ist. Da deren Wellenlänge einer Temperatur von ca.  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  entspricht und zudem die Absorptionsstärke wesentlich geringer ist, kann deren Effekt im Labor nicht gut nachgewiesen werden.*

Zur Messung wird ein einfaches Datennahmesystem (ProfilabExpert) in Kombination mit 2 Digitalmultimetern genutzt, so dass die Daten online graphisch dargestellt werden können.

## 2.2 Messung des $T^4$ Gesetzes für die Wärmestrahlung schwarzer Körper

Gezeigt wird live, dass die Strahlung eines schwarzen Strahlers mit der 4. Potenz der absoluten Temperatur ansteigt. Dieses Stefan-Boltzmann Gesetz ist grundlegend für das Verständnis der Strahlungsbilanz der Erde, auch wenn Sonne und Erde keine perfekten schwarzen Strahler sind.

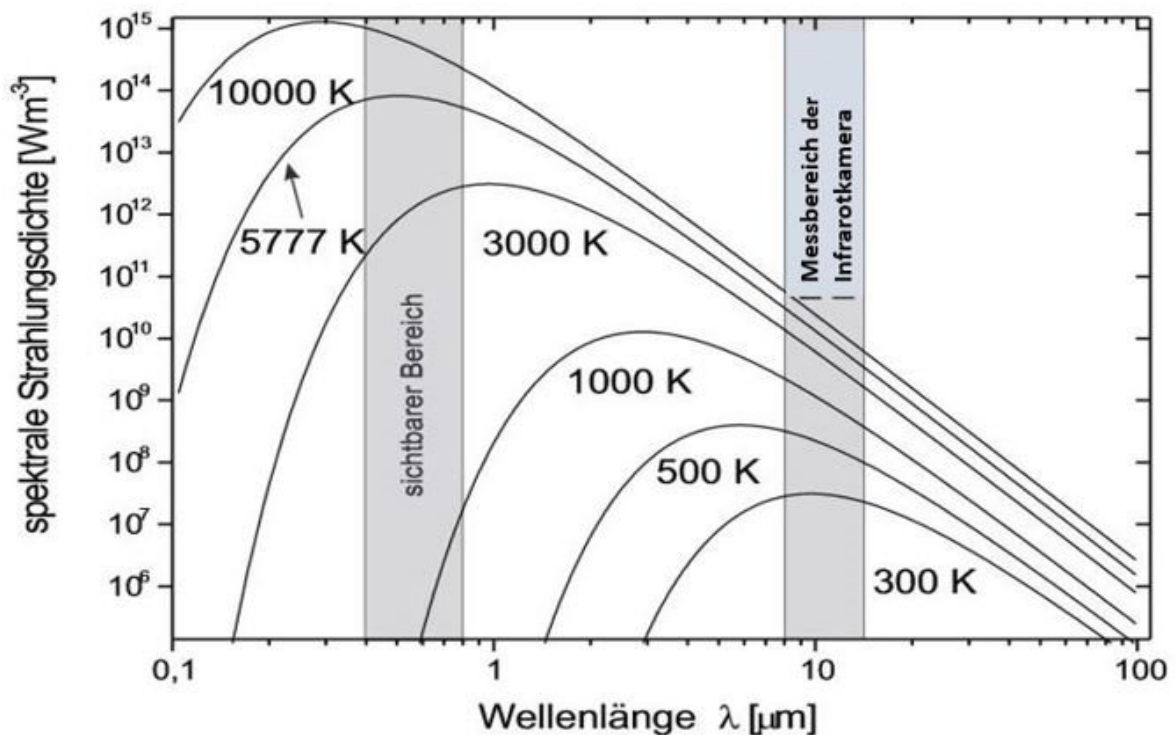


Abbildung 3: Spektrale Intensitätsverteilung eines schwarzen Körpers bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Temperatur von 5777 K entspricht der effektiven Temperatur der Sonnenoberfläche. Die Flächen unter den Kurven sind  $\sim T^4$

Für das Experiment steht ein heizbarer Strahler zur Verfügung (geschwärzte Messingplatte), dessen Temperatur über ein Niederspannungsnetzgerät von Zimmertemperatur bis ca. 125 °C hochgeregelt wird. Gemessen wird die abgestrahlte Leistung und die Temperatur der Platte. Beide Messwerte werden als Funktion der Zeit graphisch dargestellt. Gleichzeitig wird das Strahlungssignal gegen die 4. Potenz der absoluten Temperatur des Strahlers angezeigt.

### 2.3 Demonstrationsexperimente: Absorptionsverhalten im Infraroten und Wärmebildkamera.

Nachweis von Wärmestrahlung durch eine Infrarotkamera und Temperaturmessung mit einem Pyrometer. Mit ihrer Hilfe lassen sich auch sehr anschaulich Eigenschaften der Wärmestrahlung und interessante Anwendungsmöglichkeiten einer solchen Kamera zeigen.

- das unterschiedliche Transmissionsvermögen von Materialien im Sichtbaren und in Infraroten wird untersucht. Hierzu wird eine Wärmequelle, z.B. ein Mensch, durch verschieden Fenster fotografiert: Glas, Plexiglas (IR undurchsichtig), schwarzes Polykarbonat (IR transparent).

Anregungen für Demonstrationen von Anwendungen sind:

- Wärmebilder haben ein Gedächtnis.
  - Auf welchen Stühlen haben Schüler gegessen
  - Wo wurde ein Objekt mit Reibung über den Boden gezogen...



Abb. 8: Auf dem rechten Stuhl saß eine Person mit nackten Füßen

- Die Kamera kann im Rahmen von Schulprojekten auch gut genutzt werden z.B. zum Auffinden von Wärmelecks an Gebäuden, von Warm- und Kaltwasserrohren etc.
- Zusätzlich wird ein einfaches Handpyrometer zur Temperaturmessung genutzt

### Experiment 3: Nachweis von Spurengasen wie $\text{NO}_2$ , ( $\text{SO}_2$ , $\text{O}_3$ ) mit DOAS

Der Nachweis der Spurengase erfolgt durch die Messung ihrer charakteristischen Absorptionsbanden im UV und sichtbaren Licht, die einen unverwechselbaren Fingerabdruck ihrer Anwesenheit darstellen. Für hohe Empfindlichkeit – zum Nachweis kleiner Konzentrationen von Spurengasen – müssen Intensitätsänderungen im Promillebereich gemessen werden. Hierzu wird ein temperaturstabilisierter USB Spektrograph im Wellenlängenbereich 290 nm bis 520 nm genutzt zur Aufnahme der

Spektren und ein Auswerteprogramm (DOASIS), das am IUP Heidelberg entwickelt wurde. Das Spektrometer wird mit den Linien einer Hg Dampfdrucklampe kalibriert, es werden außerdem apparative Korrekturen auf den Kanaloffset und den Dunkelstrom gemacht.

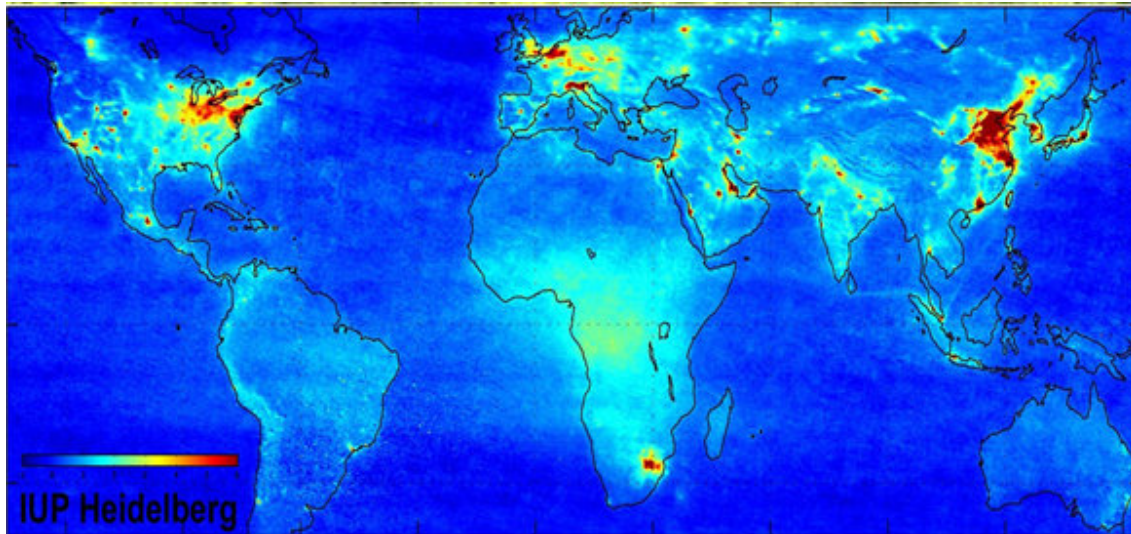
**3.1** Zuerst wird das Messprinzip mit einem Tischexperiment untersucht und verdeutlicht, bei dem die Spektren einer weißen Halogenlampe zuerst direkt und dann nach dem Durchgang durch eine Gasküvette mit geringer  $\text{NO}_2$  Konzentration registriert und verglichen werden. Die  $\text{NO}_2$  Konzentration kann durch diese Messung einfach von Hand bestimmt werden.

**3.2** Danach wird die  $\text{NO}_2$  Konzentration in der Nähe der Schule in Bodennähe gemessen durch ein Teleskop aus dem offenen Fenster. Es wird eine Messung des Sonnenstreulichts senkrecht nach oben (Referenzlichtquelle) und unter flachem Winkel – Lichtweg durch bodennahe Schichten mit  $\text{NO}_2$  Konzentration- gemacht. Der Vergleich erlaubt eine Abschätzung der  $\text{NO}_2$  Konzentration am Messtag. Sollte es am Messtag regnerisch sein, dann wird die Messung keine  $\text{NO}_2$  Konzentration ergeben, da dieses von Regen ausgewaschen wird. In diesem Fall kann auf ältere Messdaten für die Auswertung zurückgegriffen werden.

**3.3** Als letzte Messung wird die Ozon-Konzentration in der Stratosphäre bestimmt. Hierzu sind 2 Messungen des senkrecht einfallenden Streulichts um die Mittagszeit (Referenzlicht) und eine am späten Abend erforderlich. Im Allgemeinen kann im Experimentierzeitraum des Schülerlabors nur eine der beiden Messungen durchgeführt werden. Die andere muss daher von den Betreuern vorher durchgeführt und bereitgestellt werden.

Es steht vorerst nur ein Spektrometer zur Verfügung. Die Messdaten können aber auf eine zweite Auswertestation übertragen werden und dann von einer 2. Schülergruppe ebenfalls ausgewertet werden





*Abb.6: DOAS Messung der weltweiten NO<sub>2</sub> Konzentration in Bodennähe vom Satelliten aus. Diese ist ein wichtiger Indikator für die lokale Luftverschmutzung durch Verkehr und Industrie.*