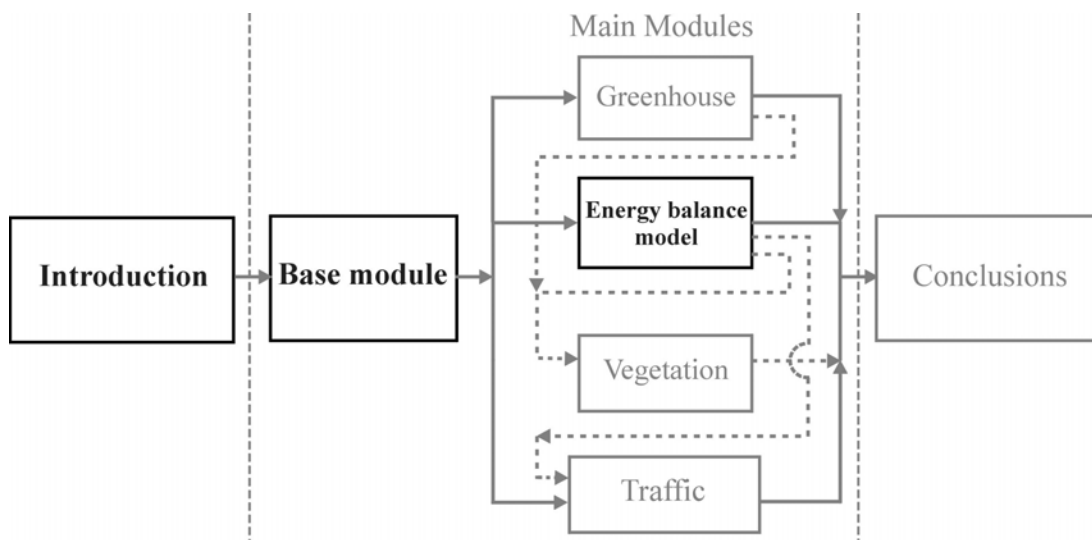




# Experimente zur Einheit Treibhauseffekt



Wilhelm Nürnberger, Sascha Schanze

– Entwurf –



**Wilhelm Nürnberger**, Autor der Kapitel 1-6 ist Lehrer an der Liebigschule in Frankfurt.

**Sascha Schanze**, Autor des Kapitels 7 ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel.

 <p>The IPN - Leibniz-Institute for Science Education is a member of the German Leibniz Association (<i>Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz</i>) and is closely affiliated to the University of Kiel.</p> <p>The institute's mandate is to develop and promote science education through research. Teams of scientists, science didactics experts, educational scientists and psychologists work together on current educational problems and projects.</p> <p>Co-Lab is part of the research area "New media".</p>	 <p><b>Collaborative Laboratories for Europe</b></p> <p>EU project IST-2000-25035 Fifth Framework Programme</p> <p><b>Partners:</b> Universiteit Twente (NL), Universiteit van Amsterdam (NL), Universidad de Murcia (E), Studio TEOS s.r.l., Milano (I), IPN, Kiel (D)</p> <p><b>Team at the IPN:</b> Thorsten Bell, Ulrich Bosler, Timo Ehmke, Manfred Euler, Sascha Schanze, Thilo Wünsch</p>
--	--

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>TEMPERATUR .....</b>	<b>4</b>
1.1	FLÜSSIGKEITSTHERMOMETER .....	4
1.2	GASTHERMOMETER .....	4
1.3	GESETZ VON GAY-LUSSAC: .....	5
1.4	THERMOELEMENT .....	5
<b>2</b>	<b>NEWTON'SCHES ABKÜHLUNGSGESETZ .....</b>	<b>6</b>
2.1	MATHEMATISCHE HERLEITUNG .....	6
2.2	EXPERIMENTELLE BESTÄTIGUNG DES NEWTON'SCHEN ABKÜHLUNGSGESETZES .....	7
<b>3</b>	<b>WÄRME .....</b>	<b>8</b>
3.1	WÄRMETRANSPORT .....	8
3.2	CCD - KAMERA ALS INDIKATOR VON TEMPERATURSTRAHLUNG .....	10
3.3	WÄRMELEITUNG .....	11
3.4	WÄRMESTRAHLUNG .....	12
<b>4</b>	<b>EIGENSCHAFTEN VON CO<sub>2</sub> .....</b>	<b>13</b>
4.1	WÄRMELEITFÄHIGKEIT .....	13
4.2	DICHTE .....	14
<b>5</b>	<b>TEMPERATURSTRAHLUNGSGESETZE .....</b>	<b>15</b>
5.1	STEFAN-BOLTZMANN-GESETZ .....	17
5.2	SUBJEKTIVE BEOBACHTUNG OPTISCHER SPEKTREN .....	19
5.3	WIEN'SCHES VERSCHIEBUNGSGESETZ .....	20
<b>6</b>	<b>ABSORPTIONS- UND EMISSIONSVERMÖGEN .....</b>	<b>22</b>
6.1	KIRCHHOFF'SCHES STRAHLUNGSGESETZ .....	22
6.2	ABSORPTION UND EMISSION IN ABHÄNGIGKEIT VON DER OBERFLÄCHE .....	23
6.3	EMISSIONSVERMÖGEN .....	24
6.4	IR-STRAHLUNGS-SENSOR .....	24
6.5	ERWÄRMUNG EINES THERMOELEMENTES IN ABHÄNGIGKEIT VOM UMGEBENDEN MEDIUM .....	25
6.6	STRAHLUNGSINTENSITÄT .....	27
6.7	ABSORPTION VON IR-STRAHLUNG DURCH CO <sub>2</sub> .....	29
6.8	TEMPERATURANSTIEG IN CO <sub>2</sub> DURCH ABSORBIERTE STRAHLUNG .....	30
<b>7</b>	<b>EXPERIMENTE ZUM KOHLENSTOFF .....</b>	<b>31</b>
7.1	VORBEMERKUNGEN .....	31
7.2	SACHINFORMATIONEN DIOXID .....	31
7.3	DIDAKTISCHE INFORMATIONEN .....	32
7.4	EXPERIMENTE .....	33
7.4.1	<i>Oxidation von Kohlenstoff (Darstellung von Kohlenstoffdioxid aus den Elementen)</i> .....	33
7.4.2	<i>Oxidation von Kohlenstoff (Darstellung von Kohlenstoffdioxid aus den Elementen)</i> .....	34
7.4.3	<i>Untersuchung von Ein- und Ausatemluft</i> .....	35
7.4.4	<i>Untersuchung von Ausatemluft</i> .....	36
7.4.5	<i>Verbrennung von Erdgas, Benzin und Zucker</i> .....	37
7.4.6	<i>Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser</i> .....	38
7.4.7	<i>Kohlenstoffdioxid absorbiert Wärmestrahlung</i> .....	40
7.4.8	<i>Wärmeabsorption von Kohlenstoffdioxid in Abhängigkeit von seiner Konzentration</i> .....	41

# 1 Temperatur

Die Temperatur beschreibt den thermischen Zustand eines Körpers, der durch die kinetische Energie seiner Teilchen bestimmt wird.

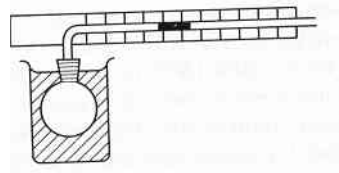
Bestimmte Eigenschaften von Körpern ändern sich mit der Temperatur: Unter anderem ist die Längen- bzw. Volumenänderung temperaturabhängig. Damit kann die Temperaturmessung auf die Messung der Länge bzw. des Volumens eines Stoffes zurück-geführt werden. Feste Körper sind wegen ihrer geringen thermischen Ausdehnung eher ungeeignet.

Die Volumenzunahme flüssiger Stoffe ist bedeutend größer und lässt sich leicht messen. Damit erhält man ein

## 1.1 Flüssigkeitsthermometer

Ein Vorratsgefäß enthält eine Flüssigkeit, die sich bei Erwärmung in eine aufgesetzte Kapillare ausdehnt. Der Rand des Flüssigkeitsfadens verschiebt sich schon bei kleinen Volumenänderungen beträchtlich. Beispiele sind das Quecksilber- und Alkoholthermometer.

## 1.2 Gasthermometer



Viel besser sind Gase als Thermometerfüllung geeignet. Ein ideales Gas wird durch die Zustandsgleichung beschrieben

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

mit

p	Druck,
V	Volumen,
n	Zahl der Mole,
R	Gaskonstante und
T	absolute Temperatur

Die absolute Temperatur T wird gemessen in Kelvin. Es besteht folgender Zusammenhang mit der Temperatur t in °C:  $T = t + 273$

Aus der Zustandsgleichung  $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$  folgt ein

### 1.3 Gesetz von Gay-Lussac:

$$V(T) = c \cdot T \Rightarrow V_0 = c \cdot 273 \Leftrightarrow c = \frac{V_0}{273}, \quad \text{wobei } V_0 \text{ das Volumen bei } T = 273 \text{ K bzw. } t = 0^\circ \text{C ist.}$$

Wegen  $T = t + 273$  folgt aus  $V(T) = c \cdot T$ :

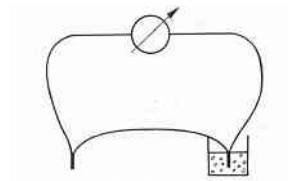
$$V(t) = c \cdot (t + 273) = \frac{V_0}{273} \cdot (t + 273) = V_0 \cdot \left(\frac{t + 273}{273}\right) = V_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{273}t\right)$$

$$V_t = V_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{273}t\right)$$

in Worten: Das Volumen eines idealen Gases vergrößert sich bei Erwärmung um  $1^\circ\text{C}$  um  $\frac{1}{273}$  seines Volumens bei  $0^\circ\text{C}$ .

### 1.4 Thermoelement

Bei der Berührung zweier Metalle entsteht zwischen ihnen eine Spannung, die Kontaktspannung.



Ein Thermoelement besteht aus zwei verschiedenen Metalldrähten, deren beide Enden miteinander verlötet sind. Sofern beide Berührungsstellen (Lötstellen) dieselbe Temperatur besitzen, tritt in dem Kreis keine Spannung auf (die beiden entgegengesetzten Kontaktspannung heben sich auf). Wenn jedoch zwischen den Lötstellen ein Temperaturunterschied besteht, sind die Berührungsspannungen verschieden und als Folge der resultierenden Spannung fließt ein Strom. Diese Stromstärke ist ein Maß für die gemessene Temperaturdifferenz.

#### Data-Logger zur Messwertaufnahme

Die nebenstehende Abbildung zeigt das für die Temperaturmessungen benutzte Data-Logger Thermometer 306 mit einem Thermoelement. Es können zwei K-Typ-Temperatur Sensoren angeschlossen werden. Das Gerät zeigt die gemessenen Temperaturen und ihre Differenz an. Die Daten können über eine serielle RS232-Schnittstelle an einen PC übertragen und dort verwaltet werden.

Das kleinste Abtastintervall beträgt 2s.

Im Messbereich  $-200^\circ\text{C}$  bis  $+200^\circ\text{C}$  beträgt die Messgenauigkeit  $\pm (0,2\% \text{ der Ablesung} + 1^\circ\text{C})$  bei einer Auflösung von  $0,1^\circ\text{C}$ .

## 2 Newton'sches Abkühlungsgesetz

### 2.1 Mathematische Herleitung

Ein Körper der Temperatur  $\vartheta$ , die höher als die Umgebungstemperatur  $\vartheta_r$  ist, kühlt sich durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion ab. Dabei ist nach Newton die Temperaturänderung mit der Zeit  $\frac{d\vartheta}{dt}$  proportional zur Differenz der Temperatur  $\vartheta$  des Körpers und der Umgebungstemperatur  $\vartheta_r$ .

Wegen der Temperaturabnahme ist der Term negativ (Minuszeichen).

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -k \cdot (\vartheta - \vartheta_r)$$

Folgende Umformungen werden ausgeführt:

Separation der Variablen  $\frac{d\vartheta}{\vartheta - \vartheta_r} = -k \cdot dt$

Integration in korrespondierenden Grenzen

( $\vartheta_a$  = Anfangstemperatur zur Zeit  $t = 0$ ,  $\vartheta = \vartheta(t)$  = Temperatur zur Zeit  $t$ )

$$\ln(\vartheta - \vartheta_r) \Big|_{\vartheta_a}^{\vartheta} = -kt \Big|_0^t$$

Einsetzen der Grenzen  $\ln(\vartheta - \vartheta_r) - \ln(\vartheta_a - \vartheta_r) = -kt$

Weitere Umformungen  $\ln \frac{\vartheta - \vartheta_r}{\vartheta_a - \vartheta_r} = -kt$

$$\frac{\vartheta - \vartheta_r}{\vartheta_a - \vartheta_r} = e^{-kt}$$

$$\vartheta - \vartheta_r = (\vartheta_a - \vartheta_r) \cdot e^{-kt}$$

liefern das

**Newton'sche Abkühlungsgesetz**  $\vartheta = (\vartheta_a - \vartheta_r) \cdot e^{-kt} + \vartheta_r$

## 2.2 Experimentelle Bestätigung des Newton'schen Abkühlungsgesetzes

In ein Becherglas wird heißes Wasser gefüllt. Die Temperatur des Wassers wird in Abständen von einer Minute gemessen.

Messbeispiel:

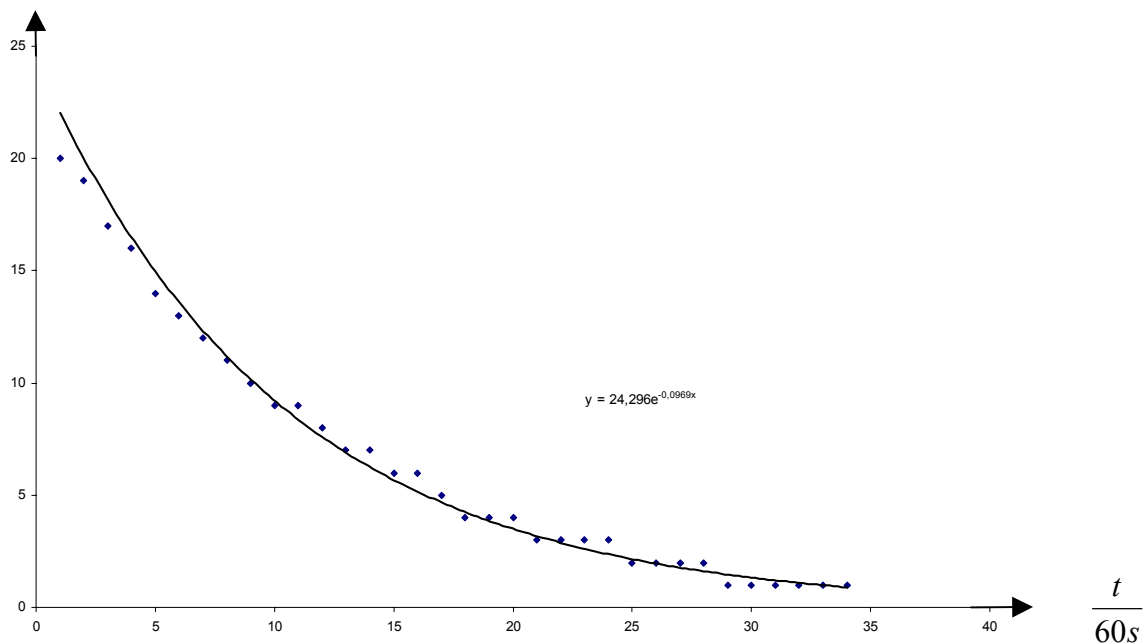
Zeit in Minuten	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Temperatur T in °C	44	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Differenz zur Außentemperatur T-T <sub>0</sub>	21	19	18	18	18	18	18	18	18	18	18	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17

In einem Koordinatensystem wird die Differenztemperatur  $T - T_0$  gegen die Zeit  $t$  aufgetragen.

Bei der Auswertung mit Excel erhält man das folgende Diagramm (Punkt XY).

Im Menu Diagramm wurde Trendlinie hinzufügen (exponentiell) und unter Optionen Formel im Diagramm darstellen gewählt.

$$\frac{T - T_0}{^{\circ}\text{C}}$$



## 3 Wärme

Die gesamte Energie eines thermodynamischen Systems, die allein durch dessen inneren Zustand bestimmt ist, bezeichnet man als innere Energie. Sie setzt sich zusammen aus der kinetischen Energie der Wärmebewegung, der Wechselwirkungsenergie zwischen den Molekülen sowie aus innermolekularen Anteilen (z.B. Schwingungsenergie).

Wärme ist die Energie der ungeordneten Bewegung der kleinsten Teilchen der Körper. Sie ist eine Form der Änderung der inneren Energie.

Im Sonderfall des einatomigen Gases ohne Wechselwirkung zwischen den Atomen gilt: Die innere Energie ist gleich der mittleren kinetischen Energie der Atome mit

$$U = N \cdot \frac{1}{2} m \overline{v^2} = N \cdot \frac{3}{2} kT ,$$

wobei

N	die Zahl der Atome,
m	die Masse,
$\overline{v^2}$	das mittlere Geschwindigkeitsquadrat der Atome,
k	die Boltzmann'sche Konstante ist und
T	die absolute Temperatur ist.

### 3.1 Wärmetransport

ist die Wärmeübertragung zwischen zwei Körpern unterschiedlicher Temperatur durch

- **Wärmeleitung**

Energieaustausch durch ungeordnete Molekülbewegungen in ruhenden Medien

- **Wärmekonvektion**

Mitführung von Wärme durch Bewegung kleinster Gas- oder Flüssigkeitsteilchen

- **Wärmestrahlung**

Elektromagnetische Strahlung, deren Emission auf der thermischen Anregung der Strahlungsquelle beruht.

Die Wärmestrahlung von Festkörpern kommt dadurch zustande, dass Elektronen thermisch in angeregte Zustände gehoben werden und dann unter Emission eines Photons in energetisch tiefere Zustände übergehen.

Auch bei Energieänderungen eines Moleküls von einem Zustand höherer Energie  $E'$  in einen solchen niedrigerer Energie  $E''$  kommt es zur Emission von Strahlung, wobei die Energie des ausgesandten Photons  $h\nu$  gleich der Energiedifferenz der beiden Zustände ist:  $h\nu = E' - E''$ .

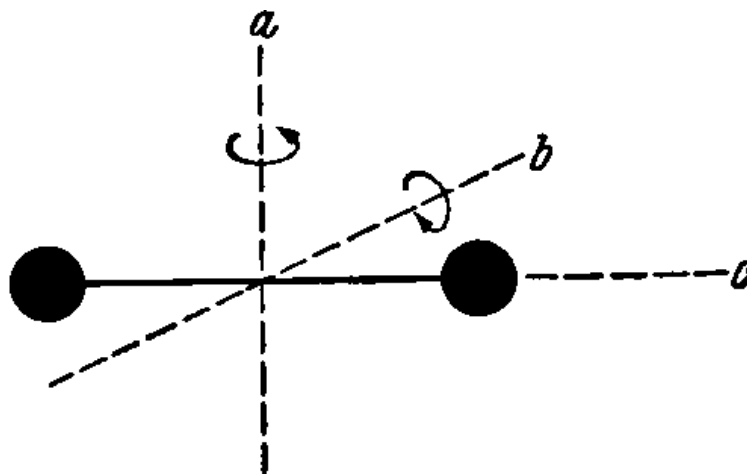
Die Energie eines Moleküls setzt sich aus drei Bestandteilen zusammen,



der Rotationsenergie  $W_{\text{rot}}$  (Rotation der Kerne um ihren Schwerpunkt), der Schwingungsenergie  $W_s$  (Schwingung der Kerne gegeneinander unter Veränderung ihres normalen Abstandes) und der Energie der Elektronenbewegung  $W_{\text{el}}$  (entsprechend der Energie des um den Kern kreisenden Elektrons im Atom).

Infolge der sehr zahlreichen möglichen Energieübergänge im Molekül ist das Molekülspektrum sehr kompliziert aufgebaut. Der von der Rotation stammende Anteil der Energieänderungen ist klein gegenüber der Schwingungsenergie und dieser wiederum klein gegenüber der Energie der Elektronenbewegung. Ändert sich nur der Zustand der Rotationsenergie, so wird Strahlung im langwelligen Ultrarot emittiert. Diesen Teil des Bandenspektrums bezeichnet man daher als Rotationspektrum.

Zur Erklärung der Rotationsenergie dient als Modell für ein zweiatomiges Molekül das "Hantelmodell", das aus zwei starr miteinander verbundenen Kugeln (=Atome) besteht.



Legt man durch den Schwerpunkt des Modells in der gezeichneten Weise ein rechtwinkliges Koordinatensystem, so lassen sich alle Drehbewegungen des Modells zerlegen in solche um die 3 Achsen, von denen praktisch nur die eingezeichneten beiden Rotationstypen vorkommen. Für die Rotationsenergie sind nur ganz bestimmte, durch eine Quantenbedingung festgelegte Werte möglich. Beim Übergang des Moleküls von einem Rotationszustand in einen anderen erfolgt die Aussendung eines Photons entsprechend der Energiedifferenz der beiden Zustände.

### 3.2 CCD - Kamera als Indikator von Temperaturstrahlung



Mit dem oben abgebildeten CCD Kamera-Modul s/w IR der Firma Conrad (Bestell-Nr. 116785-45 / 68,93 €) lässt sich die Temperaturstrahlung heißer Körper mit einer Temperatur  $T \geq 200 \text{ °C}$  erfassen. Zusätzlich ist ein Gehäuse (10,31 €), die Spannungsversorgung (9 - 15 V-) und ein Fernseher, PC oder Beamer mit Video-Eingang zur Darstellung der Bilder erforderlich.

Das Kamera-Modul ist mit sechs Infrarot LEDs bestückt und wird z.B. zu Überwachungszwecken (etwa in einer Tür-Sprechanlage) eingesetzt. Soll aktive Temperaturstrahlung registriert werden, müssen die Leuchtdioden abgedeckt werden. Im verdunkelten Raum entwirft die Kamera von einem Glühdraht ein deutliches Bild, bevor der Draht im sichtbaren Bereich strahlt, also glüht.



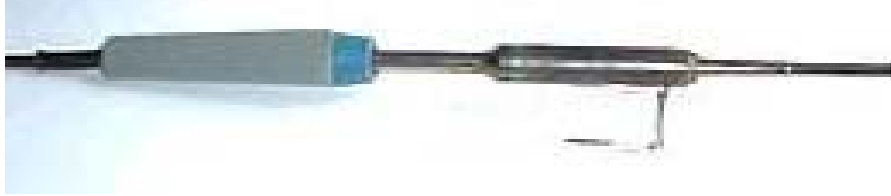
CrNi-Draht 0,2mm  $\varnothing$  ;  $U = 12V$ ,  $I = 1A$   
 Aufnahme mit Video – Kamera  
 Tageslicht



CrNi-Draht 0,2mm  $\varnothing$  ;  $U = 12V$ ,  $I = 1A$   
 Aufnahme mit Video – Kamera  
 keine Beleuchtung

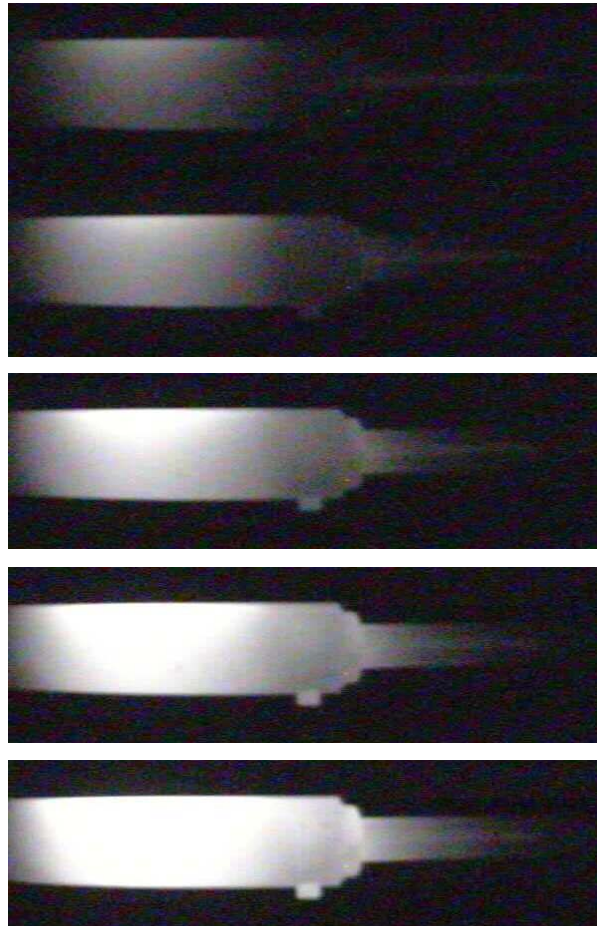
### 3.3 Wärmeleitung

Im folgenden Versuch wird die Wärmeleitung am Beispiel eines Lötkolbens untersucht:



Die Infrarot-Strahlung heißer Körper kann mit einer CCD-Kamera registriert werden. Die Helligkeit der Bilder ist ein Maß für die Temperatur.

Die folgenden Aufnahmen zeigen die zunehmende Temperaturausbreitung durch Wärmeleitung ausgehend von der Heizpatrone im linken Bildbereich.

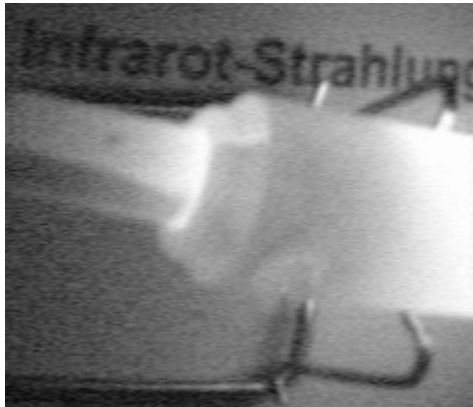


### 3.4 Wärmestrahlung

Mit der gleichen Versuchsanordnung kann die Wärmestrahlung gezeigt werden.



Die Infrarot-Strahlung, die von dem aufgeheizten LötKolben ausgeht, „beleuchtet“ das untergelegte Papier. Da die schwarze Schrift die Strahlung absorbiert, erscheint sie auf dem reflektierenden weißen Papier dunkel und der Schriftzug „Infrarot-Strahlung“ wird sichtbar.



# 4 Eigenschaften von CO<sub>2</sub>

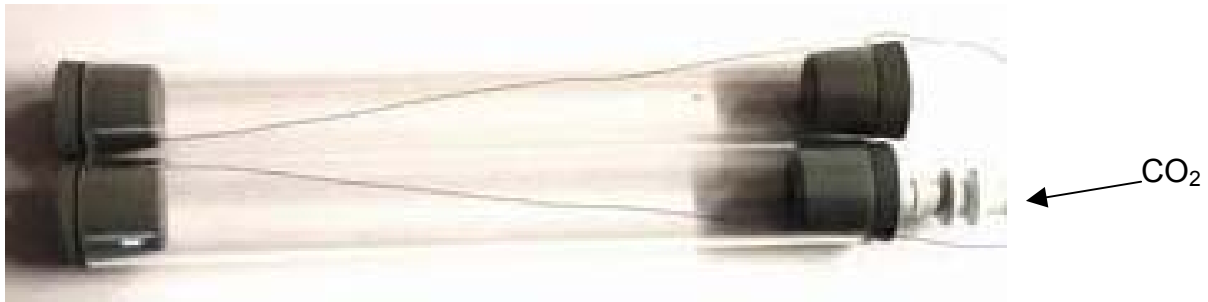
## 4.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit von CO<sub>2</sub> beträgt nur etwa das 0,6-fache der Wärmeleitfähigkeit von Luft:

Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in  $Wm^{-1}K^{-1}$

4.1.1.1.1	Luft	0,0002416
	CO <sub>2</sub>	0,0001457

Die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit lässt sich mit folgendem Experiment zeigen:



Ein Metalldraht (CrNi, 0,4mm Ø) wird durch zwei Glasrohre gezogen. Das obere ist mit Luft gefüllt, in das untere lässt man CO<sub>2</sub> einströmen.

Legt man nun an die Enden des Drahtes eine wachsende Spannung an, so glüht er zunächst nur in dem mit CO<sub>2</sub> gefüllten Rohr, da die durch die Wärmewirkung des elektrischen Stromes erzeugte Hitze in dem mit Luft gefüllten Rohr besser abgeleitet wird.



im oberen Rohr  
(Luftfüllung) glüht der  
Draht noch nicht

im unteren Rohr  
(CO<sub>2</sub> Füllung)  
glüht der Draht

Die Stromstärke (und  
damit die im Draht  
erzeugte Wärme) ist in

beiden Drahtabschnitten gleich. Nur durch die geringere Kühlung in der CO<sub>2</sub>-Atmosphäre erwärmt sich der Draht im unteren Rohr stärker.

## 4.2 Dichte

Kohlendioxid ist schwerer als Luft. Seine Dichte beträgt  $1,98 \text{ kg/m}^3$ .  
Zum Vergleich: Die Dichte von Luft beträgt nur  $1,29 \text{ kg/m}^3$ .



Leitet man  $\text{CO}_2$  in ein oben offenes Gefäß, dann sinkt es nach unten und füllt das Gefäß vom Boden her auf. Kerzen, die in unterschiedlicher Höhe aufgestellt sind, verlöschen nacheinander von unten nach oben, da ihre Flammen von dem einfließenden  $\text{CO}_2$  erstickt werden.

In einem weiteren Versuch kann man das Kohlendioxid aus dem gefüllten Gefäß (evtl. nach mehrmaligem Umschütten) wie Wasser über eine brennende Kerze „gießen“: Auch diese Kerzenflamme erlischt.

## 5 Temperaturstrahlungsgesetze

Das spektrale Emissionsvermögen  $E(\nu, T)$  eines Körpers ist die Strahlungsleistung (Strahlungsenergie pro Sekunde), die von der Flächeneinheit seiner Oberfläche im Raumwinkel  $\Omega = 1\text{sr}$  (1 Steradian) in Richtung der Flächennormalen bei der Temperatur  $T$  im Spektralbereich  $\nu + \Delta\nu$  (mit  $\Delta\nu = 1\text{ s}^{-1}$ ) als Temperaturstrahlung abgestrahlt wird.

- **Gesetz von RAYLEIGH JEANS**

$$E(\nu, T) = \frac{2h\nu^5}{c^3} \cdot \frac{1}{kT}$$

- **WIEN'sches Strahlungsgesetz**

$$E(\nu, T) = \frac{2h\nu^5}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}}$$

Die Gesetze von Wien und Rayleigh-Jeans entstanden auf der Grundlage klassischer Vorstellungen. Ausgehend von der Wellennatur des Lichtes suchte man die Erreger dieser Wellen in schwingungsfähigen Systemen von Atomen, Molekülen oder Ionen der Stoffe, die die Strahlung aussenden. Nach klassischen Vorstellungen sollte ein schwingungsfähiges System mit jedem beliebigen Energiebetrag zu seiner Eigenschwingung angeregt werden können. Alle Versuche jedoch, eine allgemeingültige Strahlungsformel auf dieser Grundlage herzuleiten, schlugen fehl. Man stieß immer wieder auf Widersprüche und Abweichungen von den Messwerten, die nicht durch Messungenauigkeit zu erklären waren.

MAX PLANCK gelang es, das WIEN'sche und das RAYLEIGH-JEANS'sche Gesetz zu vereinigen. Seinem Strahlungsgesetz lag die Annahme zugrunde, Energie könne nicht stetig unterteilt werden sondern sei gequantelt.

- **PLANCK'sches Strahlungsgesetz:**

$$E(\nu, T) = \frac{2h\nu^5}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Das PLANCK'sche Strahlungsgesetz enthält die Gesetze von Wien und Rayleigh-Jeans als Grenzfälle:

niedrige Temperatur, hohe Frequenzen

$$\frac{T}{\nu} \ll \frac{h}{k} \Leftrightarrow kT \ll h\nu \Leftrightarrow \frac{h\nu}{kT} \gg 1$$

Unter dieser Voraussetzung gilt  $e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \approx e^{\frac{h\nu}{kT}}$ , womit das PLANCK'sche Strahlungsgesetz in das WIEN'sche Strahlungsgesetz übergeht.

hohe Temperatur, niedrige Frequenzen

$$\frac{T}{\nu} \gg \frac{h}{k} \Leftrightarrow kT \gg h\nu \Leftrightarrow \frac{h\nu}{kT} \ll 1$$

Die Taylorentwicklung für  $e^x$  lautet:  $e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$

Unter der obigen Voraussetzung ist  $e^{\frac{h\nu}{kT}} \approx 1 + \frac{h\nu}{kT}$ , womit das PLANCK'sche Strahlungsgesetz in das RAYLEIGH-JEANS'sche Strahlungsgesetz übergeht.

- **STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz:**

Die Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers ist proportional zu der 4. Potenz seiner absoluten Temperatur  $T$

$$E(T) = \sigma \cdot T^4$$



- **WIEN'sches Verschiebungsgesetz:**

Die Wellenlänge  $\lambda_{\max}$ , bei der die Strahlungsleistung eines Schwarzen Strahlers ein Maximum besitzt, ist umgekehrt proportional zu dessen absoluter Temperatur.

$$\lambda_{\max} \sim \frac{1}{T}$$

- **KIRCHHOFF'sches Strahlungsgesetz:**

Das Verhältnis des spektralen Emissionsvermögens  $E(\nu, T)$  zum Spektralen Absorptionsvermögen  $A(\nu, T)$  ist eine für alle Körper gleiche Funktion  $f(\nu, T)$  der Frequenz  $\nu$  und der Temperatur  $T$ . Da das Absorptionsvermögen eines Schwarzen Körpers  $A_s(\nu, T)=1$  ist, gilt  $f(\nu, T) = E_s(\nu, T)$ .

$$\frac{E(\nu, T)}{A(\nu, T)} = f(\nu, T) = E_s(\nu, T)$$

### 5.1 Stefan-Boltzmann-Gesetz

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz besagt dass die gesamte abgestrahlte Leistung eines Schwarzen Körpers proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur  $T$  zunimmt. Genauer ist die spezifische Ausstrahlung  $M$ , also die gesamte auf die strahlende Fläche bezogene, auf einer Seite der Fläche abgestrahlte Leistung, gegeben durch

$$M = \sigma T^4,$$

wobei  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$  die Stefan-Boltzmann-Konstante ist.

Der Schwarze Körper absorbiert zugleich Strahlung aus der Umgebung. Gemessen wird daher nicht die gesamte abgestrahlte Leistung, sondern die dem Schwarzen Körper durch Strahlung entzogene Leistung  $M_e$ . Die aus der Umgebung zugestrahlte Leistung ist  $M_o = \sigma T_o^4$ . Daher gilt für die gemessene Leistung

$$M_e = \sigma (T^4 - T_o^4).$$

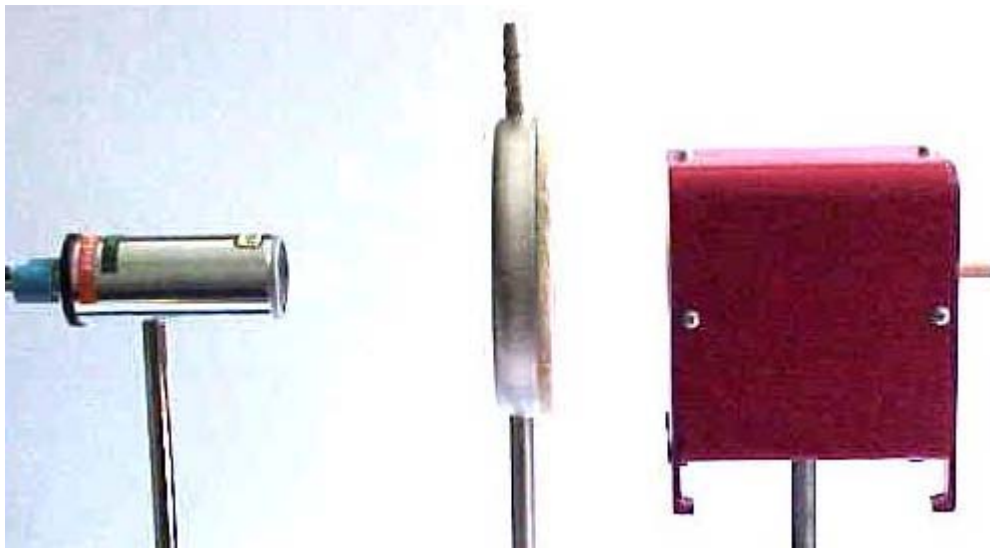
Im Versuch wird als Schwarzer Körper ein einseitig geschlossener brüniertes Messingzylinder benutzt, der in einem Rohrofen aufgeheizt wird. Die Temperatur des Messingzylinders wird an dessen Rückseite mit einem Thermoelement gemessen.



Die Wärmestrahlung des Messingzylinders wird mit einer Thermosäule nach Moll gemessen. Die Thermosäule erlaubt die Messung sehr geringer Strahlungsleistungen. Ihre Detektorfläche besteht aus hintereinandergeschalteten Thermoelementen, die sich in der Mitte ihres zylindrischen Gehäuses befinden.

Die Messstellen an der Detektorfläche absorbieren die auftreffende Strahlung fast vollständig, wogegen ihre Vergleichsstellen auf Umgebungstemperatur gehalten werden. Die Ausgangsspannung  $U$  der Thermosäule ist daher ein relatives Maß für die Strahlungsintensität  $M_e$ .

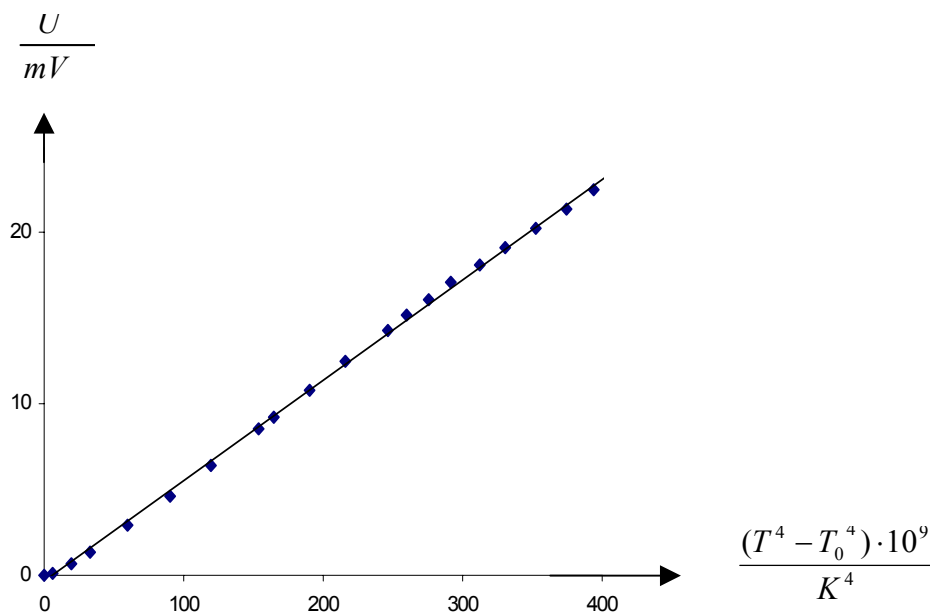
Zwischen Rohrofen und Thermosäule befindet sich eine wassergekühlte Blende, die die Strahlung des Rohrofens abschirmt.



Thermosäule

wassergekühlte  
BlendeRohrofen mit  
schwarzem Strahler

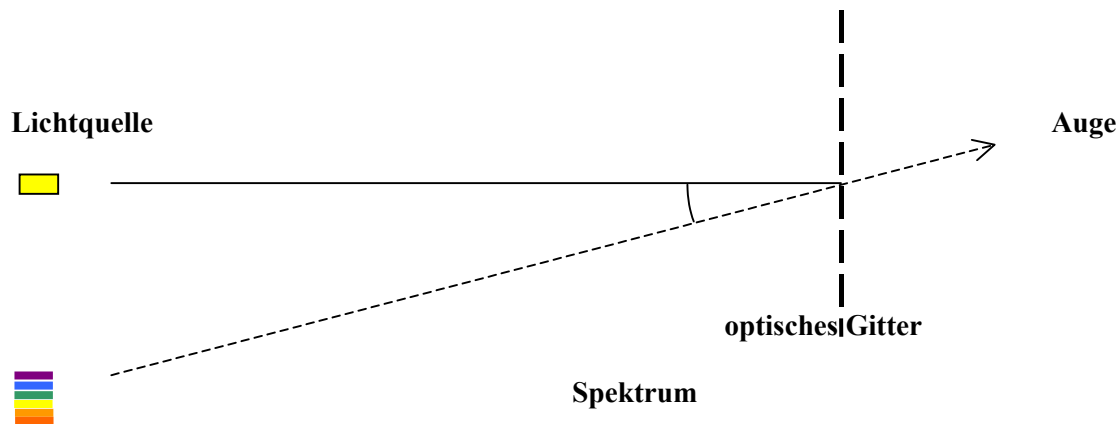
Im folgenden Diagramm ist die an der Thermosäule gemessene Spannung gegen  $T^4 - T_0^4$  aufgetragen.



Die Messwerte liegen in guter Näherung auf einer Geraden. Damit ist die Proportionalität, die im STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz zum Ausdruck kommt, bestätigt.

## 5.2 Subjektive Beobachtung optischer Spektren

Durch Beugung werden die Strahlen einer spaltförmigen Lichtquelle in ihre Spektral-farben zerlegt:



Als optisches Gitter kann eine Azetatfolie (Din A 4) dienen, in die 527,5 Furchen/mm eingeprägt sind. Sie wird von Pörschke GmbH, 64739 Höchst/Odw., Tel. 06163/912130 angeboten.

Kleine Streifen der Folie können als Dia gerahmt wie in der folgenden Abbildung als Beugungsgitter benutzt werden. Der Versuch kann freihändig von beliebig vielen Teilnehmern durchgeführt werden. Dazu schaut man durch das Beugungsgitter auf die Lichtquelle und erkennt rechts und links davon symmetrisch die Spektren  $\pm 1$ . Ordnung und je nach Intensität auch die höherer Ordnungen.

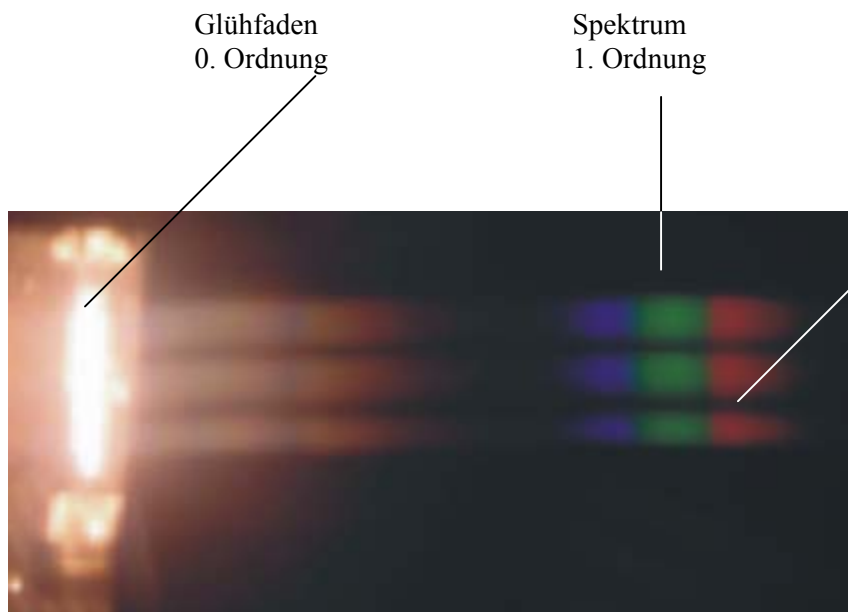


### 5.3 WIEN'sches Verschiebungsgesetz

Mit steigender Temperatur erhöht sich die Strahlung mit der vierten Potenz (Stefan Boltzmann). Dabei verschiebt sich das Maximum des Spektrums zu kürzeren Wellenlängen ins Blaue.

Dieses Phänomen kann an dem Glühdraht eines Halogenstrahlers (230 V, 100 W) beobachtet werden. Dazu wird der Halogenstrahler mit veränderlicher Spannung betrieben. Die Temperatur des Glühfadens steigt mit wachsender Stromstärke, seine Farbe ändert sich von Dunkelrot über Hellrot und Gelb zu Weiß.

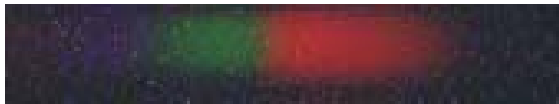
Das emittierte Licht kann mit einem optischen Gitter spektral zerlegt werden. Bei der subjektiven Betrachtung blickt der Beobachter durch das Gitter auf die spaltförmige Lichtquelle (der Reflektor ist geschwärzt). Rechts und links erscheint die Beugungsfigur  $\pm 1$ . Ordnung.



Die dunklen horizontalen Streifen, die das Spektrum unterteilen, rühren von der Abstützung des Glühdrahtes her, die den Draht durch Wärmeleitung so stark kühlen, dass er an diesen Stellen nicht mehr leuchtet.

#### 5.1.1.1.1 Beugungsfigur eines senkrechten Glühdrahtes

Die folgenden Bilder wurden mit einer Digitalkamera aufgenommen, vor deren Objektiv die Gitterfolie befestigt war. Von oben nach unten nimmt die Temperatur des Glühdrahtes zu. Sowohl die Zunahme der Intensität als auch die Verschiebung des Maximums der Strahlung nach kürzeren Wellenlängen kann gut verfolgt werden.



(Das Experiment kann auch als Schülerversuch mit einem Konstantendraht ( $\varnothing = 0,4\text{mm}$ ) durchgeführt werden, an den je nach Länge eine veränderliche Spannung  $U \leq 10\text{V}$  angelegt wird.)



Eine sehr anschauliche Darstellung der Spektralen Energiedichte in Abhängigkeit von der Wellenlänge findet man unter

<http://www.uni-leipzig.de/~stann/java/planck2.html>

## 6 Absorptions- und Emissionsvermögen

Das Absorptionsvermögen  $A$  eines Körpers ist der Bruchteil, der auf den Körper auftreffenden Strahlung, der nicht reflektiert sondern im Körper vollständig absorbiert wird.

Das spektrale Emissionsvermögen  $E_\nu$  ist definiert durch den Energiebetrag  $E_\nu d\nu$ , der von der Flächeneinheit der Oberfläche im Frequenzbereich  $d\nu$  in einer Sekunde ausgestrahlt wird.

Für einen beliebigen Körper ist bei reiner Temperaturstrahlung das Emissionsvermögen  $E_K$  gleich dem Produkt aus dem Emissionsvermögen  $E_S$  des schwarzen Körpers und dem Absorptionsvermögen  $A_K$  des Körpers:

$$E_K = E_S \cdot A_K$$

oder anders ausgedrückt:

$$E_K \sim A_K$$

### 6.1 Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz

Der Quotient

- aus dem Emissionsvermögen  $E(\nu)$  der von  $1 \text{ cm}^2$  der Oberfläche eines strahlenden Körpers in senkrechter Richtung während 1 s ausgesandten Strahlung der Frequenz  $\nu$ ,
- dividiert durch das Absorptionsvermögen  $A(\nu)$  des Körpers bei der gleichen Frequenz (Bruchteil der absorbierten Energie bezogen auf die einfallende)

ist unabhängig vom Material eine Funktion  $e(\nu, T)$  nur von Temperatur und Frequenz:

$$\frac{E(\nu, T)}{A(\nu, T)} = e(\nu, T)$$

Für den „schwarzen Körper“ gilt  $A(\nu, T)=1$ . Daraus folgt, dass  $e(\nu, T)$  das Emissionsvermögen des schwarzen Körper ist.

Aus dem Kirchhoff'schen Strahlungsgesetz folgt, dass ein Körper eine bestimmte Frequenz um so besser emittiert, je besser er die gleiche Frequenz absorbiert.

Im folgenden Versuch wird diese Eigenschaft gezeigt:

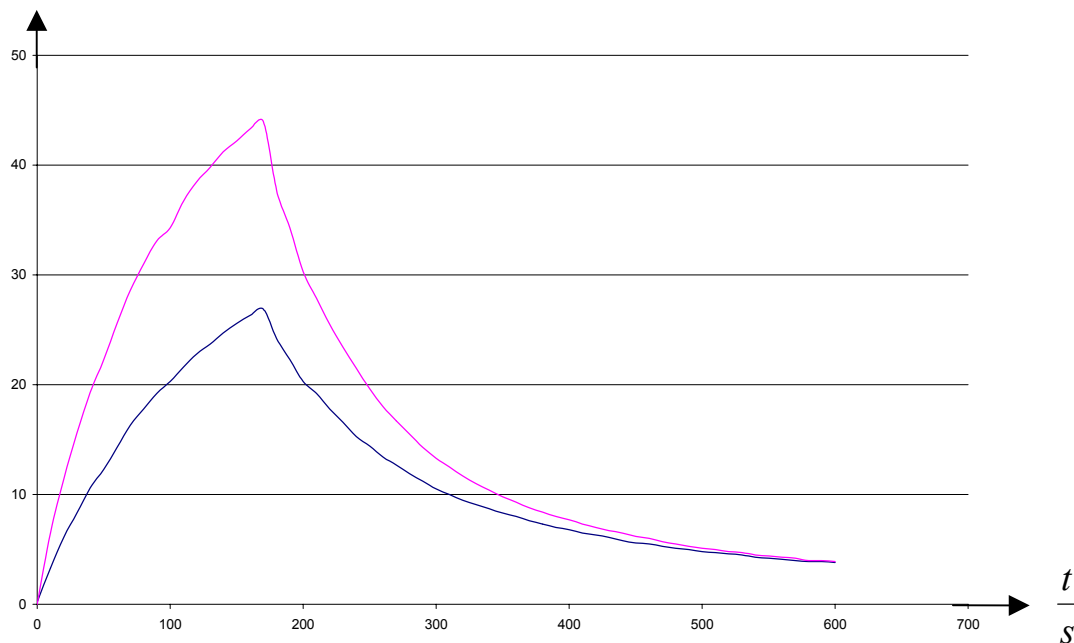
## 6.2 Absorption und Emission in Abhängigkeit von der Oberfläche



Von zwei Kupferplatten ist die im Bild linke graphitiert, die rechte verchromt. Auf der Rückseite der Platten ist je ein Thermoelement befestigt, das deren Temperatur misst. Die beiden Oberflächen werden mit einem Infrarot-Strahler angestrahlt.

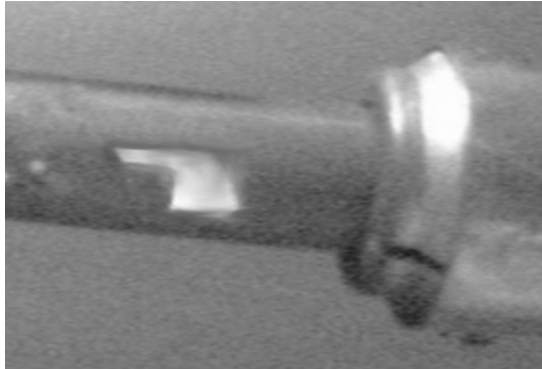
Ihre Erwärmung und - nach Abschalten der Strahlungsquelle - Abkühlung ist im folgenden Diagramm dargestellt:

$$\frac{T - T_0}{^{\circ}\text{C}}$$

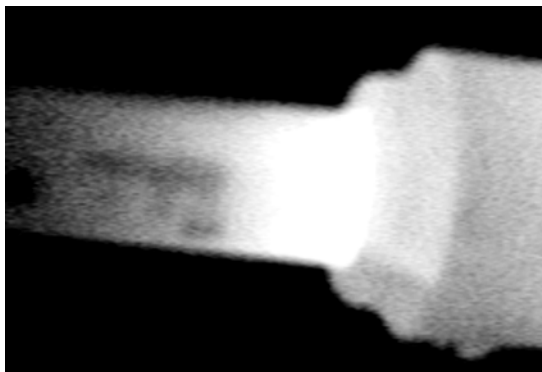


### 6.3 Emissionsvermögen

Mit dem aufgeheizten LötKolben lässt sich auch die Abhängigkeit des Emissionsvermögens von der Oberfläche zeigen. Dazu wird das an Stelle der Lötspitze eingesetzte verchromte Kupferrohr graphitiert. In den matt-schwarzen Überzug wird ein Muster eingeritzt.



Beim Aufheizen strahlt die schwarze Umgebung stärker und das Muster erscheint dunkler auf hellem Hintergrund.



### 6.4 IR-Strahlungs-Sensor

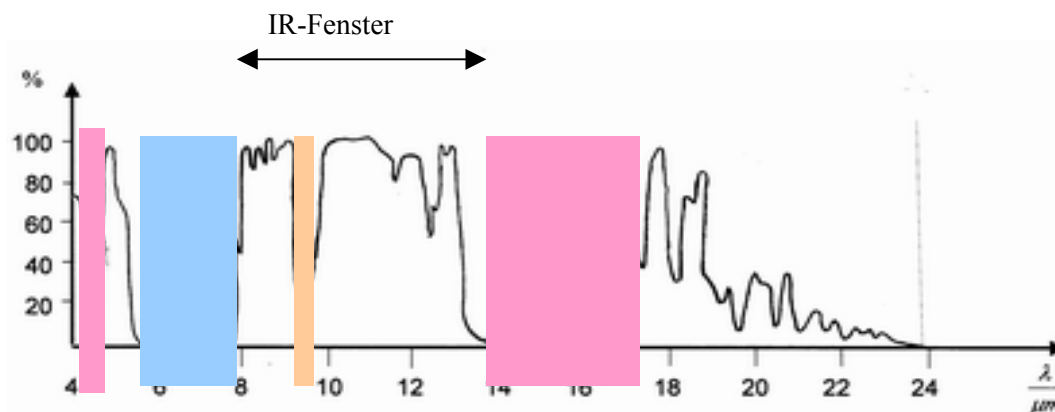




IR-CO<sub>2</sub>-Sensor mit Lux-UV-IR-Handmessgerät

Der IR-CO<sub>2</sub>-Sensor dient in Verbindung mit dem Lux-UV-IR-Meter zur Messung von IR-Strahlung im Messbereich von 4100 nm bis 4300 nm.

Viele Gase absorbieren bei bestimmten Wellenlängen Strahlung und wandeln diese in Rotations- und Schwingungsenergie um. CO<sub>2</sub> hat unter anderem in dem Messbereich des IR-CO<sub>2</sub>-Sensors eine Absorptionsbande. Daher lässt sich mit diesem Sensor die Schwächung von IR-Strahlung beim Durchgang durch ein mit CO<sub>2</sub> angereichertes Medium nachweisen.



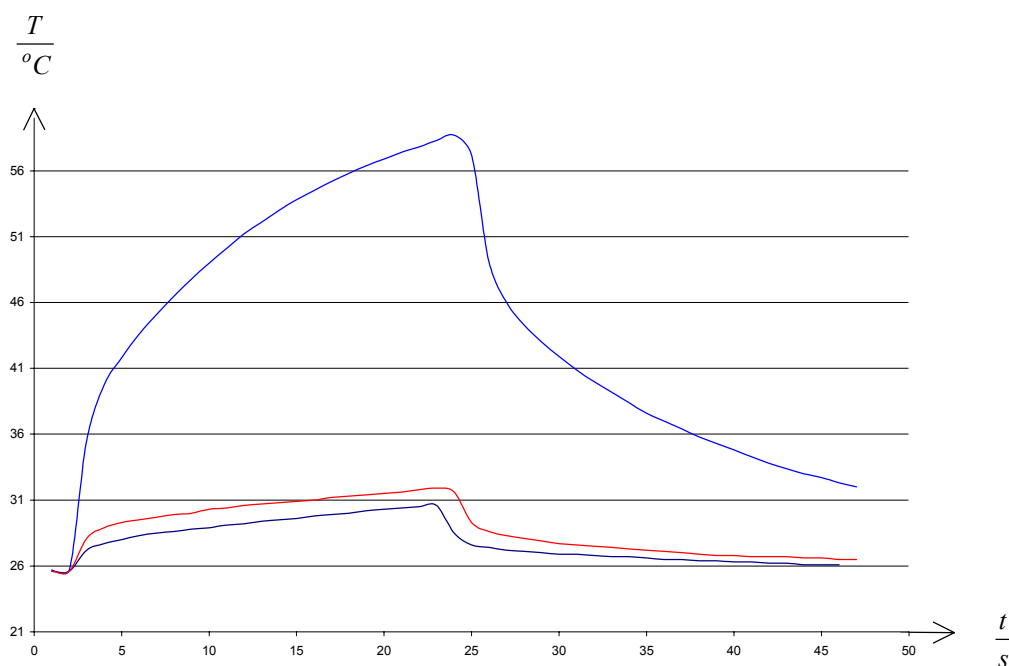
Absorption der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Wellenlänge

Tatsächlich strahlt die Erde vorzugsweise im Bereich zwischen 8  $\mu\text{m}$  und 14  $\mu\text{m}$  ab. In diesem infraroten Fenster lässt die Atmosphäre die infrarote Strahlung ins Weltall entweichen. Zwischen 14  $\mu\text{m}$  und 18  $\mu\text{m}$  absorbiert Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) sehr stark

### 6.5 Erwärmung eines Thermoelementes in Abhängigkeit vom umgebenden Medium



Als Strahlungsquelle wird ein Glühdraht benutzt, der durch einen innen verspiegelten Reflektor aus Glas in einen kleinen Winkelbereich abstrahlt.  
Die Infrarot-Strahlung erwärmt ein Thermoelement, dessen Temperatur  $T$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  dargestellt ist.



Der Versuch wurde unter dem Rezipienten einer Vakuum-Pumpe durchgeführt und zwar

schwarz: in Luft  
 rot: in  $\text{CO}_2$   
 blau: in Luft unter vermindertem Druck (3 mbar)

Der Versuch belegt, dass bei der Erwärmung eines Körpers durch auftreffende Strahlung die gleichzeitige Wärmeabgabe an die Umgebung berücksichtigt werden muss. Auch die Wärmekapazität des angrenzenden Mediums darf nicht vernachlässigt werden.

Im vorliegenden Experiment ist die Erwärmung bei stark vermindertem Druck am größten. Unterschiede bei der Versuchsdurchführung mit Luft bzw. CO<sub>2</sub> sind u.a. durch die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit dieser Gase begründet.

Allerdings variiert wegen der unterschiedlichen Kühlung in der unterschiedlichen Umgebung auch die Leistung des Strahlers, der mit konstanter Stromstärke betrieben wurde.

### 6.6 Strahlungsintensität



Mit dem Strahlungssensor wird die Strahlungsintensität  $I$  in Abhängigkeit vom Abstand  $r$  von der Strahlungsquelle gemessen. Dabei ergeben sich folgende Messwerte:

Abstand $r$ in cm	$1/r^2$	Intensität $I-I_0$ in W/m <sup>2</sup>
3	0,111	1,650
4	0,063	1,150
5	0,040	0,650
6	0,028	0,360
7	0,020	0,280
8	0,016	0,210
9	0,012	0,160
10	0,010	0,130
11	0,008	0,100
12	0,007	0,060
13	0,006	0,050
14	0,005	0,040
19,3	0,003	0,000

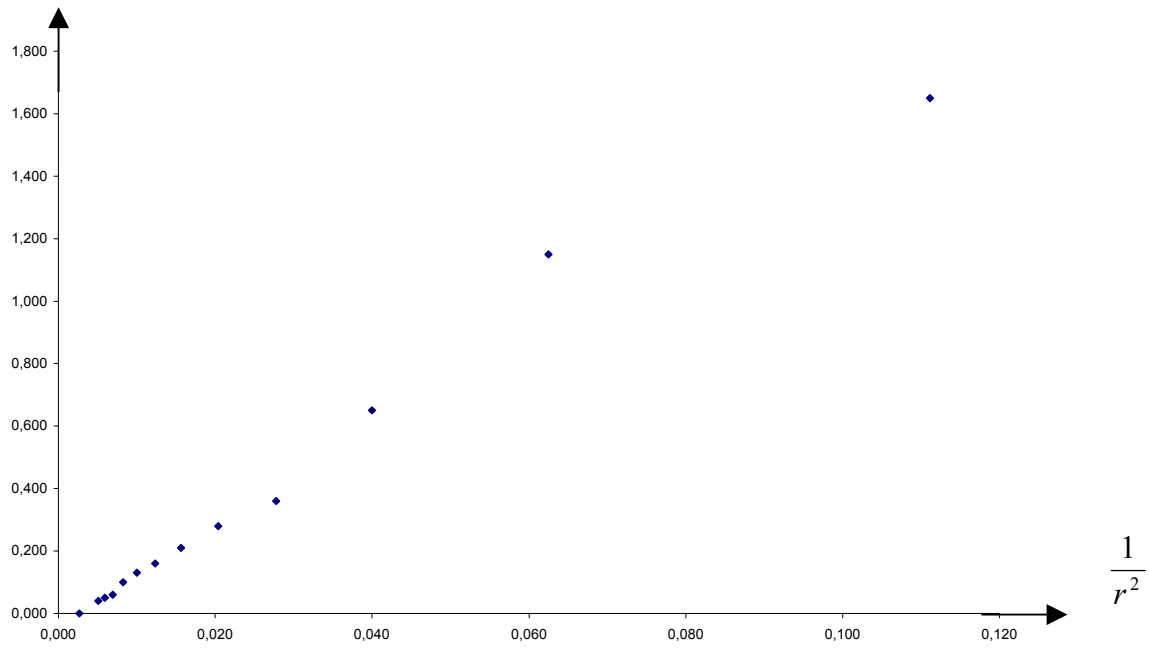
Nach dem **Photometrischen Entfernungsgesetz** gilt:

Der von einer punktförmigen Lichtquelle senkrecht auf ein Flächenelement auftreffende Lichtstrom erzeugt dort die Intensität  $I$ , die mit dem Quadrat der Entfernung  $r$  von der Lichtquelle abnimmt:

$$I \sim \frac{1}{r^2}.$$

Trägt man die Strahlungsintensität  $I$  gegen  $1/r^2$  auf, so ergibt sich wegen der Proportionalität angenähert eine Gerade:

I



### 6.7 Absorption von IR-Strahlung durch CO<sub>2</sub>

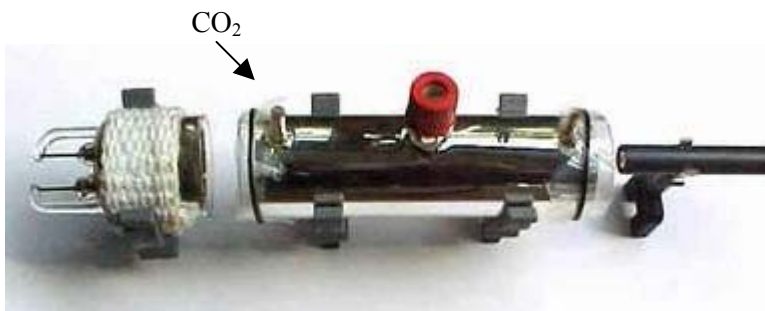
Durch eine innen verspiegelte Kuvette im Strahlengang kann die IR-Strahlung gebündelt werden. Die Abstände bleiben bei den folgenden Versuchen gleich.



Bei beidseitig offener Kuvette misst man  $0,73 \text{ W/m}^2$ , wogegen ohne die Bündelung wegen des relativ großen Abstandes Strahler - Sensor kein Einfluss des Strahlers gegenüber der Umgebungsstrahlung messbar ist.



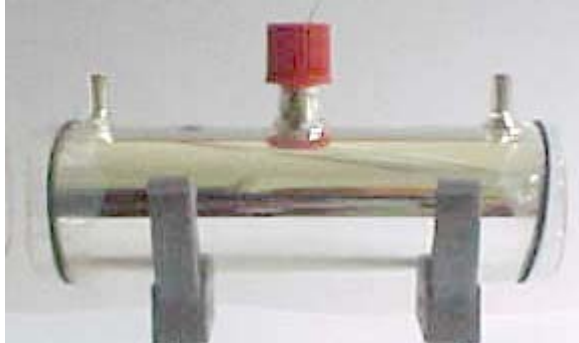
Verschließt man die Kuvette beidseitig mit PE-Folie, so geht die gemessene Strahlungsintensität wegen der Absorption in der Folie auf  $0,57 \text{ W/m}^2$  zurück.



Reichert man die Luft in der beidseitig mit PE-Folie verschlossenen Kuvette mit CO<sub>2</sub> an, so geht die transmittierte Strahlung weiter zurück auf  $0,50 \text{ W/m}^2$ . Dabei scheint es unerheblich, ob man CO<sub>2</sub> aus der Druckflasche einfüllt oder einfach Atemluft in die Kuvette einbläst.

Das eingefüllte CO<sub>2</sub> absorbiert also einen Teil der IR-Strahlung.

### 6.8 Temperaturanstieg in CO<sub>2</sub> durch absorbierte Strahlung



Das 15cm lange Rohr hat einen Durchmesser von 4 cm. Das ergibt die Querschnittsfläche  $A = \pi \cdot 4 \text{ cm}^2 \approx 12,5 \text{ cm}^2$  und das Volumen  $V \approx 187,5 \text{ cm}^3$ .

In der mit CO<sub>2</sub> gefüllten Küvette wird ein Teil der einfallenden IR-Strahlung absorbiert. Messungen

ergaben eine Verringerung der Strahlungsleistung um  $0,07 \frac{W}{m^2} = 7 \cdot 10^{-2} \frac{J}{sm^2}$ .  
 Bei einer Querschnittsfläche von ungefähr 12,5 cm<sup>2</sup> wird daher in einer Sekunde die Energie

$$\Delta Q = 8,75 \cdot 10^{-5} \text{ J} = 8,75 \cdot 10^{-8} \text{ kJ} \text{ absorbiert.}$$

Die Masse des eingeschlossenen CO<sub>2</sub> berechnet sich als

$$m = \rho \cdot V = 1,85 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \cdot 187,5 \text{ cm}^3 \approx 347 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$$

Aus der Gleichung

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{m \cdot c_p}$$

lässt sich nun der Temperaturanstieg pro Sekunde berechnen:

$$\frac{\Delta T}{s} = \frac{8,75 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kJ}}{s}}{347 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot 0,842 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}} \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ K}$$

Das eingeschlossene CO<sub>2</sub> erwärmt sich also um weniger als 0,2 Grad in 10 Minuten.

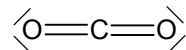
# 7 Experimente zum Kohlenstoff

## 7.1 Vorbemerkungen

Dieses Kapitel beschreibt Experimente, die in verschiedenen Phasen der Unterrichtseinheit zum Kohlenstoffdioxidkreislauf und Treibhauseffekt als Schülerübungen oder als Lehrerdemonstrationsexperiment eingesetzt werden können. Die Experimente zum Kohlenstoffdioxid dienen dazu, den Stoff mit seinen chemischen und physikalischen Eigenschaften zu erschließen. Es ist anzunehmen, dass dieses Thema und damit auch ein Großteil der Experimente im vorangegangenen Unterricht bereits behandelt wurden. Da sie jedoch als notwendige Voraussetzung für die Unterrichtseinheit anzusehen sind, werden sie zum Zwecke der Vollständigkeit mit aufgeführt werden.

## 7.2 Sachinformationen Dioxid

Kohlenstoffdioxid (Summenformel  $\text{CO}_2$ ) ist neben Kohlenstoffmonoxid ( $\text{CO}$ ) das zweite Oxid des Kohlenstoffs. Es ist ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas, nicht brennbar und unterhält die Verbrennung nicht. Die Dichte ist mit  $\rho=1,977 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$  größer als die der Luft. Kohlenstoffdioxid ist in Wasser löslich (bei Raumtemperatur und Atmosphärendruck sind es pro Liter Wasser ca. 0,9 Liter Kohlenstoffdioxid) und bildet dabei zu ca. 1 % mit Wasser Kohlensäure (Summenformel  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Der Rest liegt physikalisch gelöst vor. Die Löslichkeit nimmt wie bei allen Gasen mit steigender Temperatur und abnehmendem Druck ab (bei  $0^\circ\text{C}$  lösen sich beispielsweise 1,7 Liter Kohlenstoffdioxid in einem Liter Wasser). Das Molekül ist linear aufgebaut (Abbildung 1).

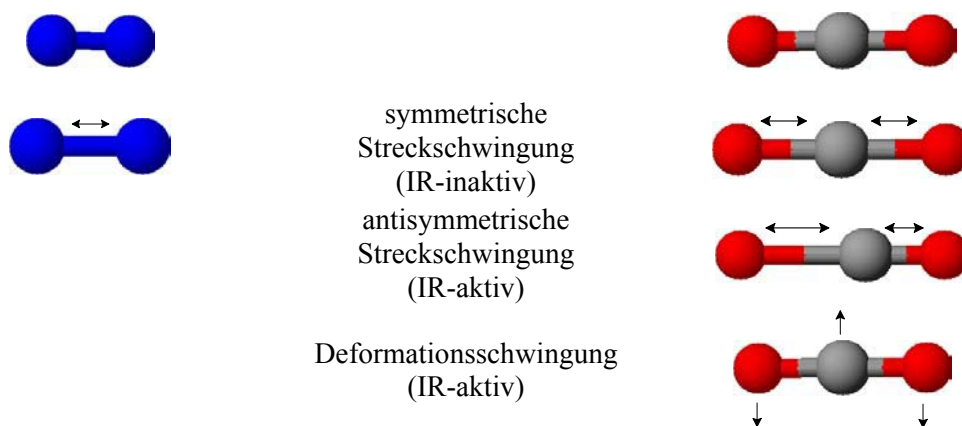


**Abbildung 1:** Struktur eines  $\text{CO}_2$ -Moleküls

Der Aufbau des Kohlenstoffdioxidmoleküls bewirkt, dass es neben der symmetrischen auch eine asymmetrische Streckschwingung sowie eine Deformationsschwingung ausführen kann. Die beiden letztgenannten Schwingungen führen zu einer Veränderung der Ladungsverteilung und somit zu Veränderung des Dipolmomentes. Die Moleküle sind IR-aktiv und können Strahlen dieser Wellenlänge absorbieren. Dadurch erklärt sich die Fähigkeit, im Vergleich zu den Hauptbestandteilen der Luft, Sauerstoff und Stickstoff, mehr Wärmestrahlung zu absorbieren. Die Moleküle des Sauerstoffs und Stickstoff können lediglich symmetrische Streckschwingungen ausüben (siehe Abbildung 2).

$\text{N}_2$

$\text{CO}_2$



**Abbildung 2:** Mögliche Streck- und Deformationsschwingungen von Stickstoff- und Kohlenstoffdioxid-Molekülen (Zum Zwecke der Übersichtlichkeit wurde auf eine Darstellung der Doppel- und Dreifachbindungen verzichtet)

Kohlenstoffdioxid entsteht in der Natur als Produkt der pflanzlichen und tierischen Atmung. Weitere Kohlenstoffdioxidquellen sind die alkoholische Gärung und die normale Verbrennung kohlenstoff- und kohlenwasserstoffhaltiger Brennstoffe wie Koks, Holz, Heizöl oder andere Destillate des Schweröls. Kohlenstoffdioxid lässt sich bei Einleiten des Gase in eine Calciumhydroxid-Lösung (Kalkwasser) als weißer Calciumcarbonat-Niederschlag durch Trübung der Flüssigkeit nachweisen (Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Nettoreaktionsschema der Calciumcarbonatbildung bei Einleitung von Kohlenstoffdioxid in eine wässrige Calciumhydroxid-Lösung.

### 7.3 Didaktische Informationen

Die Erkenntnis, dass Kohlenstoffdioxid ein Bestandteil der Luft ist, erfordert zum Verständnis eine korrekte Erarbeitung des Begriffes Gasgemisch bzw. Luft: Die Bestandteile der Luft machen bereits das aus, was wir als Luft bezeichnen. Zwischen den einzelnen Luftteilchen existiert nichts. Als eine mögliche Fehlvorstellungen der Lernenden gilt, dass die Luftbestandteile als Teilchen angesehen werden, die in „Luft“ eingebettet sind.

In vergleichbarer Weise können Schwierigkeiten bei der Behandlung der Löslichkeit von Gasen in Wasser auftreten. Hier ist eine Unterscheidung von gelöstem Gas und den sichtbaren Gasblasen in einer Flüssigkeit notwendig.

#### Literatur:

Huhn, B., Koch, R., Schmidt, V. & Schwarze, H., „Fächerverbindendes Arbeiten im Naturwissenschaftlichen Unterricht. Luft und Klima“. Landesinstitut Schleswig-Holstein für Praxis und Theorie der Schule, Kronshagen 1997.

Nick, S., Parchmann, I., Demuth, R., „Chemisches Feuerwerk“, Aulis Verlag Deubner, Köln 2001.

Parchmann, I., Jansen, W., „Der ‚Treibhauseffekt‘ als Folge der Wärmeabsorption von Gasen“, CHEMKON 3(1), 1996, 6-11.

Parchmann, I., Kaminski, B., Jansen, W., „Die Wärmeabsorption von Gasen – Voraussetzung für den Treibhauseffekt“, CHEMKON 2(1), 1995, 17-25.



## 7.4 Experimente

### 7.4.1 Oxidation von Kohlenstoff (Darstellung von Kohlenstoffdioxid aus den Elementen)

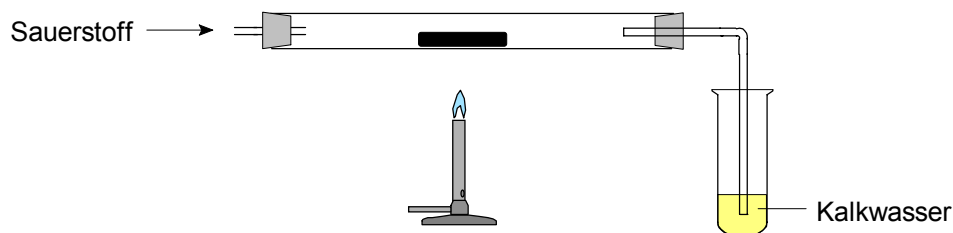
Lehrerdemonstrationsversuch

#### Geräte und Chemikalien

Reaktionsrohr mit zwei durchbohrten Stopfen, Gasableitungsrohr, Reagenzglas, Gasbrenner, Stativmaterial.

Holzkohle, Sauerstoff, Calciumhydroxid-Lösung (Kalkwasser).

#### Aufbau



#### Durchführung

Das Reaktionsrohr mit Sauerstoff spülen, bevor das Gasableitungsrohr in das Kalkwasser getaucht wird. Die Holzkohle mit der Brennerflamme erhitzen, bis sie zu glühen anfängt. Anschließend wird die Brennerflamme gelöscht und die Glut durch die Sauerstoffzufuhr geregelt.

#### Beobachtung

Die Holzkohle glüht nach der Erhitzung selbstständig weiter. Das Kalkwasser wird trübe.

#### Deutung

Kohlenstoff reagiert mit Sauerstoff in exothermer Reaktion zu einem farblosen Gas, das in Kalkwasser eine Trübung hervorruft. Das Gas heißt Kohlenstoffdioxid.

### 7.4.2 Oxidation von Kohlenstoff (Darstellung von Kohlenstoffdioxid aus den Elementen)

Schülerübung

#### Geräte und Chemikalien

Laborglasflasche nach Schumacher oder Orangensaftflasche, Tiegelzange, Gasbrenner. Holzkohle, Sauerstoff, Calciumhydroxid-Lösung (Kalkwasser).

#### Durchführung

1. Die Luft aus der Flasche durch Einleiten von Sauerstoff verdrängen, Flasche mit Deckel verschließen.
2. Ein Stückchen Holzkohle mit Hilfe der Brennerflamme zum Glühen bringen.
3. Die Flasche kurz öffnen, das glühende Holzstückchen hineinwerfen und den Deckel wieder aufsetzen
4. Die Flasche kräftig vor dem Bauch schütteln
5. Nachdem das Holzkohlestückchen erloschen sind, etwas Calciumhydroxid-Lösung (Kalkwasser) in die Flasche geben.

#### Hinweise

Holzkohle lässt sich durch Erhitzen von Buchenholzstückchen (Dübelholz,  $\varnothing$  8 mm) im Reagenzglas oder im bedeckten Eisentiegel herstellen. Die entweichenden Gase sind brennbar.

Der Deckel des Reaktionsgefäßes (Laborglasflasche nach Schumacher oder Orangensaftflasche) wird am besten mit Aluminium- oder Kupferfolie ausgelegt, um ihn vor Hitze zu schützen.

Die verglühende Holzkohle in der Laborflasche muss kräftig bewegt werden, um lokale Überhitzung und damit ein Springen des Glases zu vermeiden.

Vorsichtshalber im Stehen arbeiten lassen!

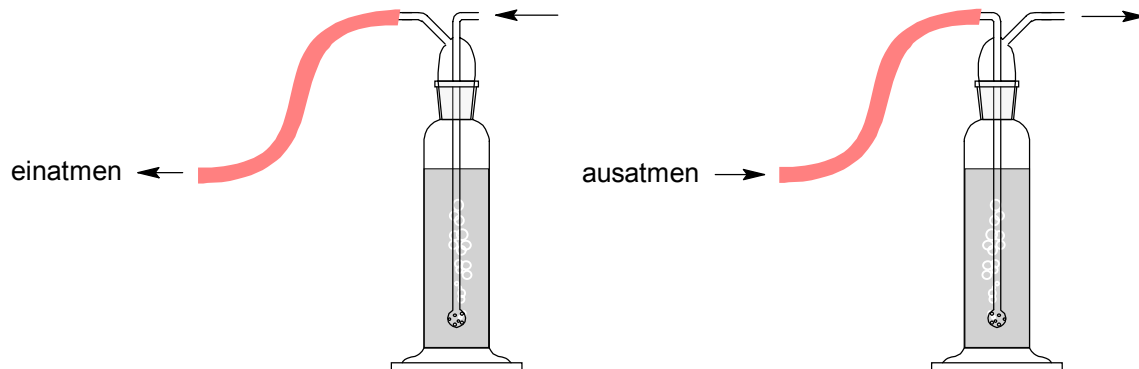
### 7.4.3 Untersuchung von Ein- und Ausatemluft

Schülerübung

#### Geräte und Chemikalien

2 Gaswaschflaschen mit kurzem Schlauch und Glasrohr, 2 Stative mit Universalklemmen.  
Frisch bereitete gesättigte Calciumhydroxid-Lösung (Kalkwasser), Ethanol.

#### Aufbau



Die Gaswaschflaschen werden jeweils mit einem Schlauch und mit einem durch Ethanol entkeimten Glasrohr versehen und an jeweils einem Stativ befestigt. Anschließend werden sie ca. 3 cm hoch mit der Calciumhydroxid-Lösung gefüllt. (Die unterschiedliche Anordnung der Gaswaschflaschen beachten!)

#### Durchführung

Ein Schüler atmet zweimal durch eine der Gaswaschflaschen aus und zweimal durch die andere Gaswaschflasche ein. (Vorsicht! Ätzende Lösungen!)

#### Beobachtung

In der Gaswaschflasche bildet sich ein weißer, milchiger Niederschlag, in der zweiten dagegen nur eine schwache weiße Trübung.

#### Deutung

Eine Calciumhydroxid-Lösung ist ein Reagenz auf Kohlenstoffdioxid, indem es mit dem Gas zu weißen Calciumcarbonat reagiert. Der Mensch gibt mehr Kohlenstoffdioxid ab als er aus der Luft aufnimmt.

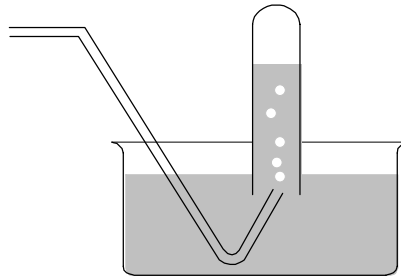
### 7.4.4 Untersuchung von Ausatemluft

Schülerübung

#### Geräte und Chemikalien

Großes Reagenzglas (200 x 30) mit Stopfen, großes Becherglas oder Wanne, Trinkhalm oder gebogenes Glasrohr.

#### Aufbau



#### Durchführung

1. Ein großes Reagenzglas wird randvoll mit Wasser gefüllt.
2. Das Gefäß wird mit einem Stopfen verschlossen, umgekehrt in eine Wasserwanne gestellt und unter der Wasseroberfläche geöffnet.
3. Das Reagenzglas wird wie folgt mit Ausatemluft gefüllt: Tief einatmen, die Luft solange wie möglich anhalten und dann den Atem durch einen Trinkhalm oder ein Glasrohr langsam in das Reagenzglas blasen.
4. Das mit Gas gefüllte Reagenzglas wird unter Wasser verschlossen, herausgenommen und mit einem brennenden Span geprüft.

#### Beobachtung

Die Flamme am Span erlischt im Reagenzglas.

#### Deutung

Die Ausatemluft enthält zu wenig Sauerstoff um die Verbrennung des Glimmspans weiter zu unterstützen. Der Luft wird im menschlichen Körper der Sauerstoff entzogen.

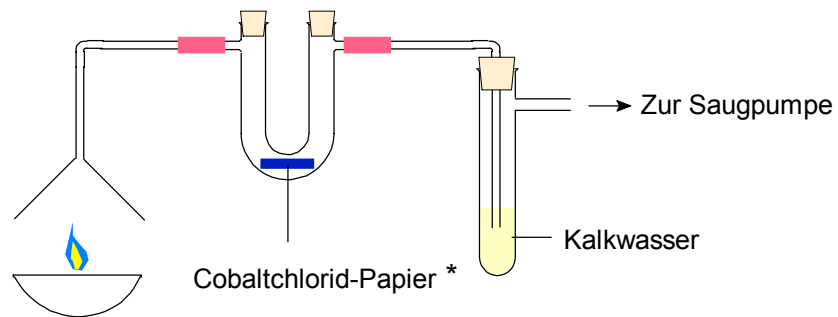
### 7.4.5 Verbrennung von Erdgas, Benzin und Zucker

Lehrerdemonstrationsversuch

#### Geräte und Chemikalien

Gasbrenner, Porzellanschale, Trichter, Gasableitungsrohr, Stativmaterial, Waschflasche, Saugpumpe, Erdgas, Benzin, Würfelzucker, Zigarettenasche, Calciumhydroxid-Lösung (Kalkwasser).

#### Aufbau



#### Durchführung

Erdgas wird aus einem Brenner, Benzin bzw. Zucker in einer Porzellanschale an der Luft verbrannt. Zucker muss mit Zigarettenasche als Katalysator eingerieben werden. Die Abgase werden mit Hilfe der Saugpumpe durch eine mit Kalkwasser versehene Waschflasche gesaugt.

#### Beobachtung

Die Calciumhydroxidlösung wird trübe.

#### Deutung

Bei der Verbrennung von Benzin (Erdgas und Zucker) entsteht Kohlenstoffdioxid (und Wasser).

#### Hinweis

\* Soll auch das entstehende Wasser nachgewiesen werden, kann zwischen Trichter und Waschflasche noch ein U-Rohr mit blauen Cobaltchloridpapier angebracht werden. (Rosafärbung als Wassernachweis.)

### 7.4.6 Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser

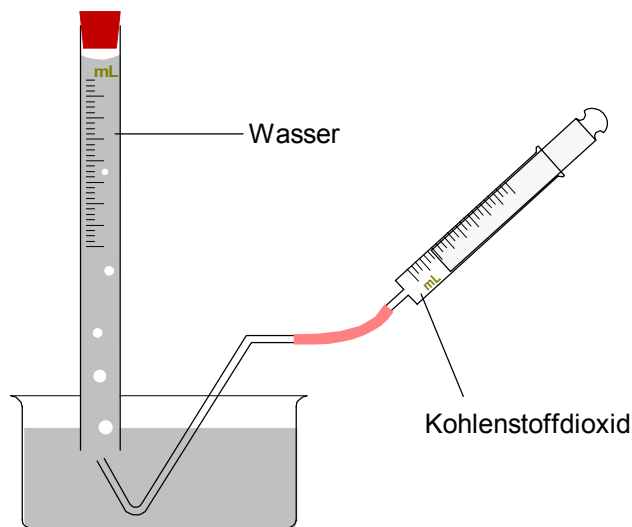
Lehrerdemonstrationsversuch

#### Geräte und Chemikalien

Glasrohr mit ml-Skala (Höhe: 1,80 m;  $\varnothing = 2,6$  cm), zwei Kolbenprober, Schlauch mit gebogenem Glasrohr, zwei Stopfen, Kunststoffschüssel.

Leitungswasser (je nach Wasserhärte gegebenenfalls destilliertes Wasser), Kohlenstoffdioxid, Luft, gegebenenfalls Sauerstoff oder Stickstoff.

#### Aufbau



#### Durchführung

Ein Glasrohr, das unten mit einem Stopfen verschlossen ist, wird randvoll mit kaltem Leitungswasser gefüllt. Anschließend wird das Glasrohr so weit abgesenkt, bis die untere Öffnung in die wassergefüllte Kunststoffschüssel eintaucht. Das obere Ende des Glasrohres wird ebenfalls mit einem Stopfen verschlossen. Der untere Stopfen kann nun vorsichtig entfernt werden. Mit Hilfe eines Kolbenprobers, an dessen Ende sich ein Schlauchstück mit gebogenen Glasrohr befindet, werden 100 ml Kohlenstoffdioxid (bzw. Luft oder ein anderes Gas) langsam durch die untere Öffnung des Glasrohres gegeben. Die aufsteigenden Gasblasen werden beobachtet und das Restvolumen an der am Glasrohr angebrachten ml-Skala abgelesen.

#### Beobachtung

Die Kohlenstoffdioxidblasen, die durch das Rohr nach oben steigen, werden im Laufe ihres Weges durch das Wasser immer kleiner. Mit der am Glasrohr angebrachten ml-Skala kann festgestellt werden, wie viel Kohlenstoffdioxid sich im Wasser gelöst hat: Von 100 ml Kohlenstoffdioxid bleibt durchschnittlich ein Restvolumen von 10 ml übrig.

Werden Luft, Stickstoff oder Sauerstoff durch das Glasrohr eingeleitet, so bleibt die Größe der Gasblasen konstant. Nach Eingabe von 100 ml Luft oder Stickstoff beträgt das Endvolumen etwa 120 ml, es ist sogar eine Volumenzunahme festzustellen.

#### Deutung

Bei Zugabe von 100 ml Kohlenstoffdioxid werden 90 ml des Gases im Wasser gelöst. Dies demonstriert qualitativ die gute Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid-Gas in Wasser. Wird das Wasser vor Versuchsbeginn mit Universalindikator gefärbt, so ist beim Durchleiten von Kohlenstoffdioxid ein Farbumschlag entsprechend einer sauren Lösung zu beobachten, da sich Kohlensäure bildet.

Die auf den ersten Blick erstaunliche Volumenzunahme bei der Zugabe von Stickstoff oder Sauerstoff wird durch die Gewichtskraft der Wassersäule verursacht, die einen Unterdruck im Gasraum bewirkt.

**Hinweis**

Die Skala des Glasrohrs kann vor Versuchsbeginn durch Zugabe von jeweils 10 ml Wasser in das unten mit dem Stopfen verschlossene, umgedrehte Rohr bis zur Markierung von 150 ml erstellt werden.

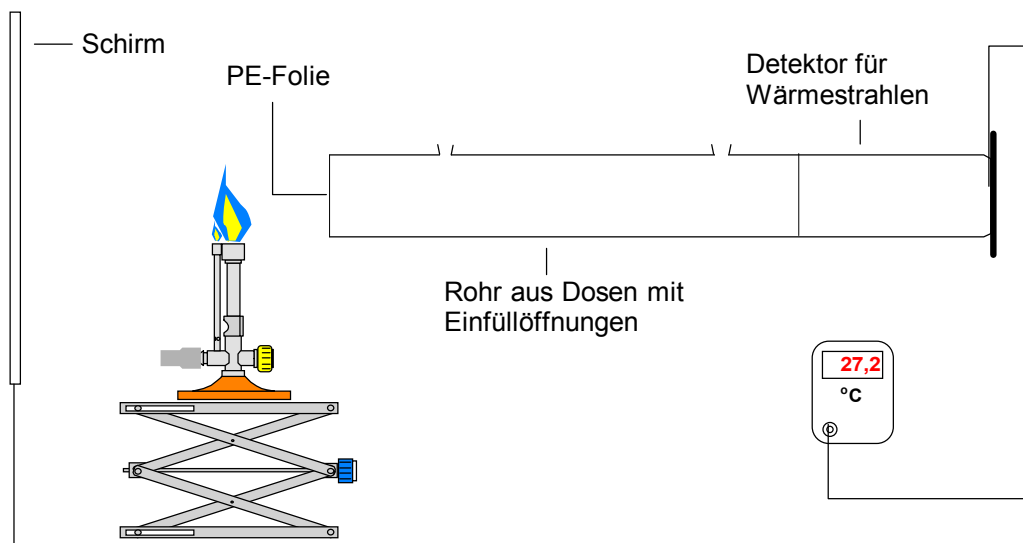
### 7.4.7 Kohlenstoffdioxid absorbiert Wärmestrahlung

Lehrerdemonstrationsversuch

#### Geräte und Chemikalien

Gasbrenner, Temperaturfühler mit Anzeigegerät, schwarze Pappe, Aluminiumfolie, Messrohr aus Dosen, PE-Haushaltsfolie ( $d < 0,1$  mm), Knetgummi zum Abdichten der Einfüllöffnung. Stickstoff, Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid aus Stahlflaschen.

#### Aufbau



#### Durchführung

Die Apparatur wird nach Abbildung aufgebaut. Als Wärmequelle dient die entleuchtete Flamme eines Bunsenbrenners, hinter der ein mit Aluminiumfolie beklebter Pappschild als Reflektor angebracht ist, um die Strahlung möglichst vollständig in das Messrohr zu leiten. Das Messrohr besteht aus einer Weißblechdose (z. B. Würstchendose, Länge ca. 22 cm, Durchmesser ca. 8 cm), die mit zwei Einfüllöffnungen versehen ist. Boden und Deckel ist herausgeschnitten und durch dünne PE-Haushaltsfolie ersetzt worden, die der Wärmestrahlung praktisch keinen Widerstand entgegengesetzt. Der Detektor besteht aus einer kleinen Dose gleichen Durchmessers. Der Deckel ist herausgeschnitten, der Boden ist durch eine schwarze Pappscheibe ersetzt worden, auf der der Thermofühler mit Tesaband befestigt wurde. Die Rückseite der Pappscheibe wurde mit Aluminiumfolie beklebt, um den Einfluss der Umgebungsstrahlung zu minimieren.

Nach dem Entzünden des Brenners wird die höchste am Detektor erreichte Temperatur notiert. Die Luft im Messrohr wird nacheinander durch Sauerstoff, Stickstoff und schließlich Kohlenstoffdioxid ersetzt und jeweils die höchste Temperatur am Detektor festgestellt.

#### Beobachtung

Während die Temperaturerhöhungen nach Entzünden des Brenners bei Füllung des Dosenrohres mit Luft, Stickstoff und Sauerstoff ungefähr gleiche Werte aufweisen, ist die Temperaturerhöhung bei Füllung mit Kohlenstoffdioxid deutlich geringer.

#### Deutung

Die Ergebnisse zeigen, dass Kohlenstoffdioxid isolierend wirkt, d.h. Wärmestrahlung absorbiert.



### 7.4.8 Wärmeabsorption von Kohlenstoffdioxid in Abhängigkeit von seiner Konzentration

Lehrerdemonstrationsversuch

#### Geräte und Chemikalien

Siehe Versuch Kohlenstoffdioxid absorbiert Wärmestrahlung

#### Aufbau

Siehe Versuch Kohlenstoffdioxid absorbiert Wärmestrahlung

#### Durchführung

In das Messrohr wird nach der Messung mit reinem Stickstoff zunächst 10 ml und anschließend weiteres Kohlenstoffdioxid mittels eines Kolbenprobers eingefüllt, so dass sich während der Messungen erst 10 ml, dann 20 ml, 50 ml, 100 ml und 200 ml Kohlenstoffdioxid im Messrohr befinden.

Alle Messungen werden mit einem Bunsenbrenner als Strahlungsquelle durchgeführt.

#### Beobachtung

Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Absorption von Wärmestrahlung im Verhältnis zur CO<sub>2</sub>-Konzentration

CO <sub>2</sub> in ml	CO <sub>2</sub> -Konzentration in Vol%	$\Delta v$ in °C gegen Raumtemperatur
0	0	18,4
10	0,88	15,4
20	1,77	14,5
50	4,42	13,2
100	8,84	12,0
200	17,68	11,4
voll	100	9,4

#### Deutung

Der Zusammenhang zwischen Wärmeabsorption und Konzentration scheint nicht linear sondern logarithmisch zu sein. Eine Erklärung liegt darin, dass die Zahl der von den Quellen ausgesandten Strahlungsquanten begrenzt ist. Durch Wechselwirkung mit den Kohlenstoffdioxid-Molekülen wird ein großer Teil absorbiert. Bei einer Verdopplung der Kohlenstoffdioxidkonzentration wird nur noch ein Teil der ursprünglichen Strahlung auf die zusätzlichen Kohlenstoffdioxid-Moleküle treffen.

Wenn man annimmt, dass bei einer Konzentration von 1% Kohlenstoffdioxid die Hälfte der Strahlung absorbiert wird, so wird durch die Verdopplung der Konzentration auf 2% zusätzlich die Hälfte der Hälfte, also eine weiteres Viertel, absorbiert werden, insgesamt also  $\frac{3}{4}$  der ursprünglichen Strahlung. Die nochmalige Verdopplung der Konzentration auf 4% bringt ein zusätzliches achtel der Absorption der ursprünglichen Absorption. Insgesamt werden nun  $\frac{7}{8}$  der ursprünglichen Strahlung absorbiert. Es ist unschwer zu erkennen, dass der Zusammenhang logarithmisch sein muss. Dieser Zusammenhang besteht auch in der Atmosphäre bezüglich Kohlenstoffdioxidgehalt und Wärmeabsorption, obwohl hier noch zahlreiche andere Wechselwirkungen auftreten. Eine Verdopplung des Kohlenstoffdioxidgehalts wird also nicht eine Verdopplung des auf dieses Gas zurückzuführenden Temperaturanstiegs bewirken.