

Ist die Luft zu schlecht zum Lernen?

Nichtdispersive IR-CO₂-Gassensoren im Physikunterricht

Bianca Watzka*, Raimund Girwidz⁺

*PH Ludwigsburg, Reuteallee 46, 71634 Ludwigsburg, watzka@ph-ludwigsburg.de;

⁺Ludwig-Maximilians-Universität München, Theresienstraße 37, 80333 München, girwidz@lmu.de

(Eingegangen: 02.02.2011; Angenommen: 28.07.2011)

Kurzfassung

Mit dem Einsatz von Sensoren im Physikunterricht können Lernende Erfahrungen mit physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Prinzipien in konkreten Anwendungen sammeln. Grundsätzlich können den Sensoren dabei zwei Funktionen zukommen. Erstens können sie als Messgerät eingesetzt werden. In dieser Funktion ermöglichen sie auch das Einbringen von authentischen Problemstellungen und Modellierungsaufgaben in den Unterricht. Zweitens können sie der Lerngegenstand im Unterricht sein. Im Vordergrund stehen dann der Aufbau und das Funktionsprinzip des Sensors.

Der Fokus dieses Beitrags ist auf den Einsatz von NDIR-CO₂-Gassensoren (NDIR = Nichtdispersive Infrarotsensoren) im Physikunterricht der Sekundarstufe I gerichtet. Dazu wird ein kontextorientiertes Unterrichtskonzept vorgestellt, das beide Funktionen berücksichtigt. Dem Unterrichtskonzept liegen Aspekte des situierten Lernens, vor allem des ‚Anchored-Instruction‘-Ansatzes sowie des Lernens mit Texten und Bildern zu Grunde.

Als Messgerät wird der Sensor zum Thema ‚Luftqualität von Innenräumen‘ eingesetzt. In dieser Funktion verhilft er zur Entwicklung eines Modells, das den Anstieg der CO₂-Konzentration in einer Schulstunde vorhersagt. Außerdem werden einige weitere Einsatzmöglichkeiten des Sensors als Messgerät in anderen Kontexten vorgestellt und auf entsprechende Literatur verwiesen.

Der Einsatz des Sensors als Lerngegenstand schließt sowohl Betrachtungen zu den wesentlichen Bauteilen des Sensors, wie beispielsweise IR-Detektoren, als auch die Erarbeitung des Funktionsprinzips ein. Dabei kann auf grundlegende physikalische Sachverhalte eingegangen werden (angefangen von elektromagnetischen Spektren bis hin zum Lambert-Beer'schen Gesetz).

1. Einführung

NDIR-CO₂-Gassensoren werden unter anderem zur Überwachung der Raumluftqualität eingesetzt. Im Blickpunkt stehen dabei die Leistungsfähigkeit und das Wohlbefinden der anwesenden Personen sowie eine effiziente und bedarfsgerechte Heizungs- und Lüftungstechnik. Dazu werden in der Regel neben der Messung der CO₂-Konzentration auch die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur erfasst und ausgewertet. Die Messung dieser Größen wird hier allerdings nicht betrachtet. Im Elektronikfachhandel gibt es einfache NDIR-CO₂-Gassensor-Module mit analogem und digitalem Ausgang für ca. 60 € (siehe Abb. 1). Damit sind die Geräte auch für Schulen finanzierbar. Die Messbereiche dieser Module liegen wahlweise zwischen Konzentrationen von 0 – 2000 ppm und 0 – 5000 ppm. Neben diesen preisgünstigen Modulen, existieren noch speziell für den Schulgebrauch entwickelte NDIR-CO₂-Gassensoren und dazu passende Interface-Systeme. Beispiele hierfür sind die CO₂-Gassensoren von Vernier, Pasco und Leybold-Didactic sowie die jeweiligen Interface-Systeme LoggerPro bzw. LoggerLite (Vernier), DataStudio (Pasco) und Cassy (Leybold-

Didactic). Die Messbereiche der für die Schule angefertigten Sensoren unterscheiden sich stark und liegen im Fall des Vernier-Sensors wahlweise zwischen 0 – 10 000 ppm und 0 – 100 000 ppm.



Abb. 1: NDIR-CO₂-Gassensor-Modul. Das linke Teilbild zeigt im Vordergrund die Messelektronik und im Hintergrund die Gasmesszelle. Im rechten Teilbild ist die Gasmesszelle entfernt worden, so dass die Strahlungsquelle (rechts) und der Detektor (links) sichtbar sind.

Abgesehen vom Messbereich, unterscheiden sich die verschiedenen Sensoren hinsichtlich der Anschaffungskosten, des Aufbaus und des verwendeten Detektors.

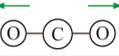
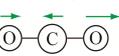
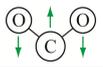
Zunächst werden das Messprinzip, der Aufbau und das Funktionsprinzip von NDIR-CO₂-Gassensoren

erläutert. Speziell wird auf die beiden gebräuchlichsten Detektoren eingegangen, die Thermosäule („Thermopile“) und den pyroelektrischen Detektor. Anschließend folgen Vorschläge für authentische Anwendungen und Modellierungsaufgaben für einen kontextorientierten Einsatz von NDIR-CO₂-Gassensoren im Physikunterricht. Danach werden verschiedene Experimente für die Erarbeitung der grundlegenden Funktionsweise dieser Geräte in der Unterrichtspraxis vorgestellt. Zuletzt folgen Erläuterungen zur Elementarisierung und die Darstellung einer vierstündigen Unterrichtseinheit zum Aufbau, zur Funktionsweise und zur Anwendung von NDIR-CO₂-Gassensoren.

2. Das Messverfahren im Überblick

2.1. Physikalische Grundlagen

Die physikalische Grundlage für die Messung der CO₂-Konzentration mit NDIR-Gassensoren ist die Absorption von Infrarotstrahlung durch Moleküle. Diese haben im Gegensatz zu Atomen innere Freiheitsgrade und können zu Schwingungen angeregt werden. So kann das lineare dreiatomige CO₂-Molekül vier verschiedene Grundschwingungen ausführen. Diese unterscheiden sich unter anderem nach Valenz- und Deformationsschwingungen, je nachdem, ob sich die Bindungslänge oder der Bindungswinkel verändern. Die folgende Tabelle (siehe Tab. 1) zeigt die Grundschwingungen des CO₂-Moleküls sowie ihre Frequenzen und Wellenlängen (Banwell & McCash, 1999).

Schwingungsform	Frequenz f Wellenlänge λ
1 Sym. Valenzschwingung: keine Dipoländerung; IR-inaktiv 	$f = 3,987 \cdot 10^{13}$ Hz $\lambda = 7,519$ μm
2 Antisym. Valenzschwingung: Dipoländerung; IR-aktiv; Parallelbande 	$f = 6,622 \cdot 10^{13}$ Hz $\lambda = 4,257$ μm
3 Deformationsschwingung: Dipoländerung; IR-aktiv; Senkrechtbande 	$f = 2,000 \cdot 10^{13}$ Hz $\lambda = 14,986$ μm
4 Deformationsschwingung: Dipoländerung; IR-aktiv; Senkrechtbande 	$f = 2,000 \cdot 10^{13}$ Hz $\lambda = 14,986$ μm

Tab. 1: Grundschwingungen des CO₂-Moleküls (nach Banwell & McCash, 1999)

Allerdings eignen sich nicht alle vier Schwingungsformen für die Konzentrationsmessung mittels NDIR-Gassensoren. Für die Absorption elektromagnetischer Strahlung sind nur Schwingungen relevant, die mit einer Änderung des elektrischen Dipolmo-

ments verbunden sind. Nur dann ist eine Wechselwirkung der elektromagnetischen Wellen mit den Molekülen möglich. Die symmetrische Valenzschwingung stellt ein Beispiel für eine Schwingungsform dar, bei der keine Änderung des elektrischen Dipolmoments und folglich keine Absorption stattfindet. Aus diesem Grund wird sie auch als IR-inaktiv¹ bezeichnet. Die anderen drei Schwingungsformen werden im Gegensatz dazu als IR-aktiv bezeichnet (Haken & Wolf, 2003).

Für die Gasdetektion von CO₂ wird die antisymmetrische Valenzschwingung bei einer Wellenlänge von $\lambda = 4,257$ μm bevorzugt (Budzier & Gerlach, 2010). Absorbiert ein CO₂-Molekül Infrarotstrahlung dieser Wellenlänge, nimmt es einen Energiebeitrag von $\Delta E = h f$ auf und geht in ein höherliegendes Schwingungsenergieniveau über. Neben diesem Schwingungsübergang erfolgt aufgrund der Kopplung zwischen Schwingung und Rotation auch ein Rotationsübergang. Dabei entsteht ein für CO₂-Moleküle charakteristisches Rotations-Schwingungs-Spektrum.² In diesem sind die Übergänge von den Rotationsenergieniveaus eines bestimmten Schwingungsenergieniveaus zu den Rotationsenergieniveaus eines anderen Schwingungsenergieniveaus enthalten.

Spektrallinien in Molekülspektren beschreiben die Übergänge zwischen jeweils zwei Energiezuständen. Allgemein gilt:

$$\Delta E = h f = \Delta E_{\text{el}} + \Delta E_{\text{vib}} + \Delta E_{\text{rot}} \quad \{1\}$$

wobei ΔE_{el} für Übergänge zwischen Elektronenzuständen, ΔE_{vib} für Übergänge zwischen Schwingungszuständen und ΔE_{rot} für Übergänge zwischen Rotationszuständen steht. Bei der Entstehung eines Rotations-Schwingungs-Spektrums ändern sich nur die Schwingungs- und Rotationsterme, d. h. die Übergänge zwischen den Rotationsniveaus eines bestimmten Schwingungsniveaus zu den Rotationsniveaus eines anderen Schwingungsniveaus erfolgen im gleichen Elektronenzustand. Es gilt also:

$$\Delta E = h f = \Delta E_{\text{vib}} + \Delta E_{\text{rot}} \quad \{2\}$$

Die Gesamtheit der Rotationsübergänge, die zu einem Schwingungsübergang gehören, bilden die Rotations-Schwingungs-Bande.

Weitere Informationen und ausführliche quantitative Beschreibungen zu Schwingungs- und Rotationsübergängen sind unter anderem bei Banwell & McCash (1999), Haken & Wolf (2003) und Demtröder (2003) zu finden.

¹ Von den atmosphärischen Gasen sind beispielsweise Stickstoff- und Sauerstoffmoleküle IR-inaktiv.

² Die Moleküle anderer atmosphärischer Gase haben im Vergleich zum CO₂-Molekül andere Symmetrieeigenschaften, Bindungslängen, Bindungswinkel, Kraftkonstanten usw. Folgen davon sind z. B. Unterschiede in den Schwingungsfrequenzen und den Rotations-Schwingungs-Spektren.

2.2. Das Messprinzip

Zusammenfassend und vereinfacht dargestellt nutzen NDIR-CO₂-Gassensoren die Tatsache, dass CO₂-Moleküle Infrarotstrahlung bestimmter Wellenlänge absorbieren. Der Einsatz geeigneter IR-Quellen, Filter und IR-Detektoren ermöglicht es, speziell Strahlung dieser Wellenlängenbereiche für die Gasdetektion zu nutzen. Ziel der Analyse ist es, die Stärke der IR-Absorption durch die Moleküle zu bestimmen. Die CO₂-Konzentration wird über das Lambert-Beer'sche Gesetz quantitativ ermittelt. Es beschreibt, wie die Strahlungsintensität mit der Gaskonzentration c und der Messstrecke d abnimmt.

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot c \cdot d} \quad \{3\}$$

α ist der Absorptionskoeffizient und für das jeweilige Molekül charakteristisch.

In der Spektroskopie verwendet man jedoch üblicherweise die Extinktion E (Absorbanz) und den Extinktionskoeffizienten³ ε_λ der absorbierenden Substanz. Letzterer ist ebenfalls eine molekülspezifische Größe und von der Wellenlänge der absorbierten Strahlung abhängig. Die Extinktion ist proportional zur Konzentration und deshalb besonders für eine quantitative Analyse geeignet.

$$\log \frac{I_0}{I} = \varepsilon_\lambda \cdot c \cdot d = E \quad \{4\}$$

Bei der Konstruktion von Messküvetten ist es wichtig, bei kleinen Extinktionskoeffizienten für ausreichend lange Strahlenwege zu sorgen. Schwach absorbierende Substanzen benötigen längere Strahlenwege. Diese können über eine größere Küvette oder über eine optische Verlängerung des Strahlenwegs durch Reflektion realisiert werden. Aus diesem Grund sind Messküvetten häufig mit einer reflektierenden Goldschicht versehen, so dass der Strahl die absorbierende Substanz mehrfach durchläuft (Sieber & Nüssen, 2001).

3. Aufbau und Funktionsweise des Sensors

3.1. Die Grundstruktur

Die grundlegenden Bauteile von NDIR-CO₂-Gassensoren sind eine IR-Strahlungsquelle, eine Messküvette für das Gasgemisch, ein oder mehrere schmalbandige(r) Interferenzfilter und ein bzw. mehrere IR-Detektor(en).

Als IR-Strahlungsquelle wird meistens eine Mikroglühlampe mit einem breitbandigen Spektrum eingesetzt. Sie wird in der Regel im Brennpunkt eines Parabolspiegels positioniert, der in die Messküvette eingelassen ist. Unter Annahme einer punktförmigen Lichtquelle wird dann näherungsweise ein paralleles Strahlenbündel erzeugt (siehe Abb. 2).



Abb. 2: Grafik zum Aufbau des NDIR-CO₂-Gassensormoduls: Die IR-Strahlungsquelle befindet sich im Brennpunkt eines Parabolspiegels (rechts) und wird über einen weiteren Spiegel auf den Detektor gelenkt (links).

Allerdings sind dem Einsatz von Mikroglühlampen in NDIR-Gassensoren Grenzen gesetzt. Die charakteristischen Absorptionseigenschaften des Glases verhindern die Emission von infraroter Strahlung, deren Wellenlänge $\lambda = 5 \mu\text{m}$ übersteigt.

Messküvetten sind größtenteils geradlinig aufgebaut. Bei der einfachsten Bauvariante befinden sich die IR-Strahlungsquelle und der IR-Detektor einander direkt gegenüber, und die IR-Strahlungsquelle ist direkt auf den IR-Detektor ausgerichtet (siehe Abb. 3).

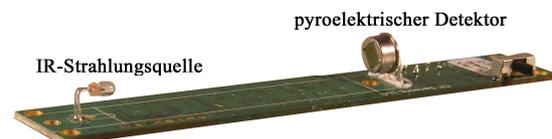


Abb. 3: Aufbau des NDIR-CO₂-Gassensors von Vernier mit IR-Strahlungsquelle (links) und pyroelektrischem Detektor (rechts): Die IR-Strahlung trifft direkt auf den Detektor auf.

Gebogene Messküvetten oder solche, bei denen sich die IR-Strahlungsquelle und der IR-Detektor nicht direkt gegenüber liegen, enthalten verspiegelte Flächen und fokussierende optische Elemente, um die Strahlung auf den IR-Detektor zu lenken (siehe Abb. 1 und 2).

Als IR-Detektoren kommen überwiegend sogenannte thermische Detektoren zum Einsatz. Dabei werden hauptsächlich Detektoren angewendet, deren Wirkungsweise entweder auf dem thermoelektrischen oder dem pyroelektrischen Effekt beruht (siehe Abschnitt 3.3).

3.2. Interferenzfilter

Direkt vor oder auf den Detektoren befinden sich ein bzw. zwei schmalbandige(r) Interferenzfilter. Die maximale Transmission des jeweiligen Filters liegt bei der sogenannten zentralen Wellenlänge (CWL; ‚central wavelength‘). Für die CO₂-Detektion liegt sie bei $4,265 \mu\text{m}$. Die Bandbreite eines Filters ist durch die Halbwertsbreite (HBW; ‚half bandwidth‘) gekennzeichnet. Sie gibt den durchgelassenen Spektralbereich an, bei dem weniger als die Hälfte der Intensität absorbiert wird.

³ Häufig wird er auch molarer Absorptionskoeffizient genannt (Haken & Wolf, 2003).

Gas	Kanal	Filter	
		CWL	HBW
CO ₂	TP1	4,265 μm	0,110 μm
Referenz	TP2	4,000 μm	0,080 μm

Tab. 2: Interferenzfilter des Dual-Thermopile-Detektors (nach Micro-Hybrid). Angegeben sind die zentrale Wellenlänge (CWL) und die Halbwertsbreite (HBW) der beiden Filter.

Damit absolute Messwertangaben möglich sind, muss das Signal mit einem Referenzwert verglichen werden. Zu diesem Zweck wird ein Dualsensor mit zwei Messkanälen und zwei Interferenzfiltern verwendet. Das Referenzsignal wird durch die CO₂-Konzentration nicht beeinflusst, erfasst aber die ggf. wechselnde Ausgangsintensität der Lichtquelle. Bei dem Dualsensor nach Tab. 2 hat das Referenzsignal eine Wellenlänge von 4,000 μm.

3.3. Thermische Detektoren

Bolometer, Thermoelemente und pyroelektrische Detektoren gehören zu den thermischen Detektoren. Allen gemeinsam sind die Absorption der eintreffenden IR-Strahlung und die daraus resultierende Erwärmung des Materials. Allerdings unterscheiden sie sich in der Art, wie sie eine Erwärmung bzw. einen Temperaturwert in ein elektrisches Signal umsetzen. Bolometer reagieren mit einer Widerstandsänderung, Thermoelemente mit der Änderung der Thermospannung und pyroelektrische Detektoren mit einer Änderung der elektrischen Dipolmomente im Material (Meixner & Mader, 1990).

In der Messtechnik sind für thermische Detektoren vor allem zwei Kenngrößen relevant: ihre Wärmekapazität und die Höhe der thermischen Verluste. Sie bestimmen maßgeblich die Temperaturempfindlichkeit und das Ansprechverhalten des Sensors. Dies ist insbesondere dann relevant, wenn die abgestrahlte Leistung der IR-Strahlungsquelle klein ist.

3.3.1. Messtechnische Kenngrößen

Der Zusammenhang zwischen der Temperatur T des thermischen Detektors und der Strahlungsleistung des Messobjektes lässt sich über eine Leistungsbilanzrechnung ermitteln. Berücksichtigt werden dabei der absorbierte Anteil η der einfallenden Strahlungsleistung $\Phi(t)$, die Wärmekapazität C und die thermischen Verluste $G \Delta T$ des Detektors:

$$\eta \cdot \Phi(t) = C \frac{d\Delta T}{dt} + G \cdot \Delta T. \quad \{5\}$$

ΔT ist die Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur des Detektors T und der Umgebungstemperatur T_0 . Setzt man eine konstante Strahlungsleistung Φ an,⁴ erhält man für ΔT :

$$\Delta T = \frac{\eta \cdot \Phi}{G} (1 - e^{-\frac{G}{C} t}). \quad \{6\}$$

Die Temperatur des thermischen Detektors T beträgt damit:

$$T = T_0 + \frac{\eta \cdot \Phi}{G} (1 - e^{-\frac{G}{C} t}). \quad \{7\}$$

Die Abhängigkeit der thermischen Zeitkonstanten

$$\tau = \frac{C}{G} \quad \{8\}$$

von der Höhe der thermischen Verluste verdeutlicht die Auswirkung einer guten Wärmeisolierung. Eine verbesserte Wärmeisolierung führt zwar zu geringeren Wärmeverlusten, aber auch dazu, dass der Abklingkoeffizient τ größer und damit der Detektor „langsamer“ wird (Demtröder, 2007).

Abklingkoeffizienten von ‚Thin-Film-Thermopile‘-Detektoren liegen zwischen 0,1 und 0,2 s (Ricolfi & Scholz, 1990), die von pyroelektrischen Detektoren zwischen 10^{-3} und 10^{-4} s und die von Fotodioden zwischen 10^{-4} und 10^{-6} s (Demtröder, 2007). In der Praxis werden kurze thermische Zeitkonstanten bevorzugt. Dazu ist meist ein Kompromiss aus einer guten thermischen Isolierung und einer geringen Dicke des Sensorelements und damit einer kleinen Wärmekapazität notwendig.

Die am häufigsten verwendeten Detektoren basieren auf dem thermoelektrischen oder pyroelektrischen Effekt. Das Funktionsprinzip beider Detektorarten wird im nächsten Abschnitt kurz erläutert.

3.3.2. Thermoelektrische Detektoren

Thermoelektrische Detektoren kommen in der NDIR-Gassensorik überwiegend als ‚Dual-Thermopile‘-Detektoren vor. Sie bestehen aus zwei Thermosäulen (‚Thermopiles‘), die wiederum aus mehreren in Reihe geschalteten Thermoelementen aufgebaut sind. In Abb. 4 ist zu sehen, wie beide ‚Thermopile‘-Detektoren in ein TO39-Gehäuse eingebaut sind. Ergänzend dazu befindet sich noch ein temperaturabhängiger Widerstand (NTC oder PTC) im Gehäuse; dieser dient zur Referenzmessung.

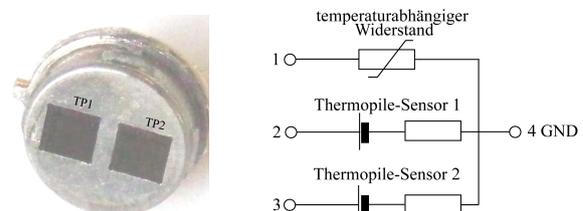


Abb. 4: ‚Dual-Thermopile‘-Detektor mit zwei Interferenzfiltern (nach Perkin Elmer). In dem linken Teilbild sind die beiden Interferenzfilter zu sehen (vgl. auch Tab. 2). Das rechte Teilbild zeigt die Schaltskizze.

Ein Thermopile-Detektor / eine Thermosäule besteht aus mehreren in Reihe geschalteten Thermoelementen. Diese stehen auf der einen Seite in thermischem

⁴ Betrachtungen mit modulierter und pulsierender Strahlungsleistung sind bei InfraTec (2010) zu finden.

Kontakt mit der Absorptionsfläche, auf der anderen mit dem TO39-Gehäuse des Detektors (siehe Abb. 5).

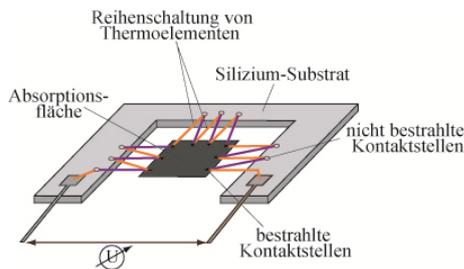


Abb. 5: Grafik zum Aufbau eines ‚Thermopile‘-Detektors, der auf ‚Thin-Film‘-Technologie basiert (nach Budzier & Gerlach, 2010).

Abhängig von der auftretenden Strahlungsintensität erwärmt sich die Absorptionsfläche und damit auch die Messstellen der Thermoelemente. Die Temperaturdifferenz zwischen den Mess- und Vergleichsmessstellen der Thermoelemente verursacht eine Thermospannung. Sie hängt sowohl von der Temperaturdifferenz als auch von den materialspezifischen Seebeck-Koeffizienten Q_A und Q_B ab (Pelster *et al.*, 2005).⁵

$$U = (Q_B - Q_A) \cdot (T_2 - T_1) \quad \{9\}$$

3.3.3. Pyroelektrische Detektoren

Pyroelektrische Detektoren reagieren im Gegensatz zu thermoelektrischen Detektoren nur auf Temperaturänderungen. Sie basieren auf dem pyroelektrischen Effekt und bestehen aus Materialien, die im mikroskopischen Bereich permanente elektrische Dipolmomente besitzen. Entscheidend für die Funktionsweise von pyroelektrischen Detektoren sind die elektrische Polarisierung des Materials und das daraus resultierende elektrische Feld. Die elektrische Polarisierung hängt sowohl von der Temperatur des Materials als auch von äußeren elektrischen Feldern ab. Auf der Oberfläche des Materials wird durch die elektrische Polarisierung eine Ladungsdichte erzeugt, die im Allgemeinen das innere Feld nach außen hin neutralisiert. Eine Temperaturänderung des Materials hat eine Veränderung der elektrischen Polarisierung zur Folge. Die dabei auftretenden elektrischen Spannungen bewirken eine Änderung der Oberflächenladungen, wodurch ein pyroelektrischer Strom erzeugt wird (Porter, 1981; Whatmore, 1986). Pyroelektrische Detektoren können zum einen im Spannungs- oder Strombetrieb, zum anderen thermisch kompensiert oder unkompensiert genutzt werden. Der einkanalige pyroelektrische Detektor des Vernier-Sensors ist thermisch kompensiert und wird im Spannungsbetrieb eingesetzt (siehe Abb. 6).

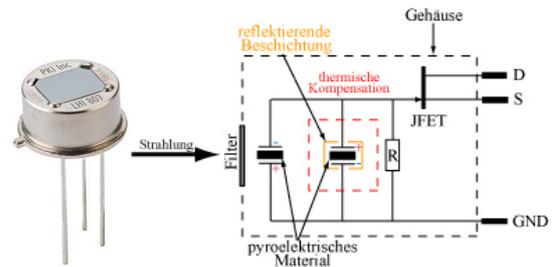


Abb. 6: Pyroelektrischer Detektor im Spannungsbetrieb (Perkin Elmer)

Im Spannungsbetrieb lädt der pyroelektrische Strom den Kondensator auf. Die dadurch erzeugte Spannung wird mit einem ‚Source-Follower‘⁶ abgegriffen.

Eine quantitative Beschreibung des pyroelektrischen Effekts ist unter anderem bei Porter (1981), Whatmore (1986) und Meixner & Mader (1990) zu finden.

4. Authentische Anwendungskontexte und Modellierungsaufgaben

Für den Einsatz von CO₂-Gassensoren im Unterricht sind viele authentische Anwendungskontexte und interessante Modellierungsaufgaben geeignet. Hierbei sind die nachfolgenden Anwendungsbeispiele allesamt aus dem Bereich der thematischen Kontexte. Andere Aspekte des Kontextbegriffs werden nicht angesprochen. Ein Überblick zur Kontextorientierung ist beispielsweise bei Duit & Mikelskis-Seifert (2007) zu finden.

Von Lehrmittelfirmen wie Vernier, Leybold-Didactic und Pasco existieren bereits einige Experimentieranschläge für den Einsatz des Sensors. Speziell Experimente zu den Themenbereichen Treibhauseffekt und Photosynthese sind dort beschrieben. Darüber hinaus gibt es zu diesen Themen auch passende Unterrichtsvorschläge.⁷ Der Kontext Raumluft wurde bislang kaum als Thema im Unterricht beachtet. Ideen dazu werden in den Abschnitten 4.1 und 4.5 vorgestellt.

4.1. Kontrolle der Qualität der Raumluft

Ein authentischer Anwendungskontext für CO₂-Gassensoren ist die Kontrolle der Raumluft. Unzureichende Lüftung ist in Klassenzimmern keineswegs selten. Verschiedene nationale und internationale Studien (beispielsweise Myhrvold *et al.*, 1996; NLGA, 2004; LGL, 2006a und 2006b; Coley *et al.*, 2007) haben gezeigt, dass der Richtwert von 1500 ppm bzw. 1000 ppm für CO₂ in Klassenzimmern nur selten eingehalten wird. Weiterhin konnten Myhrvold *et al.* (1996) und Coley *et al.* (2007) zeigen, dass erhöhte CO₂-Konzentrationen in Klas-

⁵ Eine ausführliche Betrachtung zur Entstehung der Thermospannung ist unter anderem bei Pelster *et al.* (2005) zu finden.

⁶ Der Sinn eines ‚Source-Follower‘ ist die Impedanzwandlung. Dazu wird der JFET in einer ‚Drain‘-schaltung eingesetzt.

⁷ Ein Unterrichtskonzept zur Modellierung des Treibhauseffekts ist z. B. bei Bell & Walter (2009) zu finden.

senräumen einen relevanten Einfluss auf das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit⁸ von Schülerinnen und Schülern haben. Vor diesem Hintergrund kann die Frage nach der Höhe der aktuellen CO₂-Konzentration im Klassenzimmer zu interessanten Diskussionen anregen. Die Messung kann mit dem eingangs erwähnten Modul oder einer sogenannten CO₂-Ampel durchgeführt werden. Letztere zeigt nur das Überschreiten bestimmter Grenzwerte an und ist im Vergleich zu dem vorgestellten Sensormodul verhältnismäßig teuer. Eine CO₂-Ampel ist ab 149 € (www.mb-systemtechnik.de) erhältlich. (Die Messungen können ebenfalls mit den teureren Geräten der bekannten Lehrmittelfirmen realisiert werden.)

4.2. Automatische Lüftungssteuerung

Weitere interessante Anwendungen für Diskussionen zu CO₂-Gassensoren sind automatische Lüftungsregler in privaten und öffentlichen Gebäuden (Brauns, 2007) sowie in Fahrzeugen (Robert Bosch GmbH, 2008). Dabei wird die CO₂-Konzentration über Sensoren erfasst, die wiederum elektrische Öffner für Fenster oder Lüftungsklappen steuern.

4.3. Photosynthese und Atmung von Pflanzen

Neben den eher technischen Anwendungsbeispielen zur Raumluftkontrolle und automatischen Lüftungsregelung können CO₂-Gassensoren auch zur quantitativen Untersuchung der Photosynthese und Atmung von Pflanzen genutzt werden. Geeignet ist beispielsweise Kresse, die in ein kleines verschließbares Gefäß gegeben wird. Die CO₂-Konzentration in dem Gefäß wird zunächst bei Tageslicht, bei Kunstlicht und anschließend im Dunkeln gemessen und verglichen. Für die quantitative Untersuchung der Atmung von Pflanzen und der Photosynthese eignen sich vor allem CO₂-Gassensoren, die sich an ein Computer-Messwerterfassungssystem anschließen lassen. Dann können die Messwerte einfach und schnell graphisch dargestellt und direkt miteinander verglichen werden. Eine Experimentieranleitung hierzu ist unter anderem bei Eilers *et al.* (2009) zu finden.

4.4. Untersuchung und Vergleich der CO₂-Freisetzung von Alltagsstoffen

Viele Alltagsstoffe, wie beispielsweise Brausetabletten, Gebissreiniger-Tabs, Hefe, Zäpfchen gegen Verstopfung oder Düngestäbchen setzen bei ihrer Verwendung CO₂ frei. Die Stoffe unterscheiden sich allerdings deutlich in ihrer CO₂-Freisetzungsrate. So setzen die Zäpfchen gegen Verstopfung das CO₂ mit einer Rate von ca. 4,5 ppm/s nur langsam frei. Im

Gegensatz dazu erfolgt die CO₂-Freisetzung der Gebissreiniger-Tabs, unter gleichen Versuchsbedingungen (bei gleicher Temperatur, gleicher Probenmenge und gleichem Lösungsmittel), mit einer Rate von ca. 180 ppm/s sehr schnell. Mit Hilfe eines CO₂-Gassensors können einfach und schnell Messkurven aufgenommen, ausgewertet und im Hinblick auf die Verwendung der Stoffe interpretiert werden.

4.5. Modellierungsaufgaben

In der Funktion als Messinstrument liefert der Sensor experimentell ermittelte Daten, die die Entwicklung eines einfachen Vorhersagemodells für CO₂-Konzentrationen in Innenräumen ermöglichen.

a) Anstieg der CO₂-Konzentration in einer Schulstunde

Ausgehend von einer Messung der aktuellen CO₂-Konzentration der Raumluft stellt sich die Frage, auf welchen Wert sie im Verlauf einer Unterrichtsstunde ansteigt. Dazu lässt sich eine interessante Modellierungsaufgabe entwickeln. Mit einem CO₂-Gassensor, einem Messwerterfassungssystem und einer Gefriertüte kann der Anstieg des CO₂-Gehalts schnell und mit geringem Aufwand in einem verkleinerten Modellsystem untersucht werden.

Ausgehend vom Volumen des Klassenzimmers und der aktuell gemessenen CO₂-Konzentration bestimmen die Schüler/innen den Volumenanteil von CO₂ in Litern. Liegt beispielsweise die CO₂-Konzentration in einem 210 m³ großen Klassenzimmer bei 600 ppm (= 0,06%) sind von den 210 000 Litern Luft des Klassenzimmers 126 Liter CO₂.

Danach messen die Lernenden, wie hoch die CO₂-Konzentration von ausgeatmeter Luft im Fall der Ruheatmung ist. In Ruhe atmet ein Mensch ca. 0,5 Liter Atemluft aus. Um die Messung nicht unnötig in die Länge zu ziehen, empfiehlt es sich, ein Modellsystem mit einem kleinen Volumen von 1 Liter zu wählen. Für die Messung wird der Sensor in einen leeren, glattgestrichenen 1-Liter-Gefrierbeutel gesteckt und die Messung gestartet. Nach zweimaligem Ausatmen, luftdichtem Verschließen und Abwarten, bis sich ein konstanter Wert eingestellt hat,⁹ lässt sich festhalten, dass die CO₂-Konzentration von ausgeatmeter Luft ca. 5% beträgt.¹⁰

Im Anschluss daran erfolgt die Ermittlung der durchschnittlichen Atemfrequenz der Schüler/innen. Sie ist altersabhängig und liegt im Fall der Ruheatmung zwischen 10 und 25 Atemzügen pro Minute. Bei einer durchschnittlichen Atemfrequenz von $f = 15/\text{min}$ und unter Berücksichtigung des vorherigen Ergebnisses atmet jede(r) Schüler/in in einer 45-minütigen Schulstunde ca. $V_{\text{CO}_2, \text{S}} = 17$ Liter CO₂

⁸ Die Atemfrequenz und das Atemzugvolumen werden im Wesentlichen durch die Höhe der CO₂-Konzentration im Blut reguliert. Dabei führen schon geringe Erhöhungen der CO₂-Konzentration zu einem Anstieg der Atemfrequenz und des Atemzugvolumens sowie einem Abfall des pH-Wertes. Daraus folgen Gefühle des Unwohlseins und letztlich eine Absenkung der physiologischen Leistungsfähigkeit.

⁹ Diffusionsprozesse laufen verhältnismäßig langsam ab. So können bis zu sechs Minuten vergehen, bis ein konstanter Wert angezeigt wird.

¹⁰ Der Literaturwerte für die CO₂-Konzentration ausgeatmeter Luft liegt bei 4% (Friedrich, 2007).

aus. In einer 30 Personen umfassenden Klasse nimmt demnach in einer Schulstunde das CO₂-Volumen im Schnitt um ca. $V_{\text{CO}_2, \text{K}} = 506$ Liter (0,24% = 2400 ppm) zu.

Im Anschluss an die rechnerischen Betrachtungen sollten immer Kontrollmessungen in verschiedenen Klassenzimmern erfolgen. Treten Abweichungen zwischen den modellierten und den real gemessenen Werten auf, müssen Korrekturen in die Überlegungen eingebracht werden.

Einen möglichen Diskussionspunkt liefert beispielsweise die Berücksichtigung der Luftwechselrate von geschlossenen Fenstern und Türen. Sie gibt an, wie viel der in einem Raum vorhandenen Luft innerhalb einer Stunde ausgetauscht wird. Die Luftwechselrate in Räumen mit einfachen und schlecht isolierten Fenstern liegt zwischen 0,5 und 0,8 1/h. In diesem Fall werden in einer Stunde zwischen 50 und 80% der vorhandenen Raumluft ausgetauscht. Im Gegensatz dazu liegt die Luftwechselrate von gut isolierten Fenstern zwischen 0,2 und 0,4 1/h (NLGA, 2003).

Ebenfalls interessant ist der Vergleich unterschiedlicher Jahrgangsstufen. Hier kann der CO₂-Anstieg im Klassenzimmer für Schülerinnen und Schüler der 5. Jahrgangsstufe mit denen der 10. Jahrgangsstufe verglichen werden.

b) Anstieg der CO₂-Konzentration und Größe des Klassenzimmers

Wie groß muss ein Klassenzimmer mindestens sein, damit der CO₂-Grenzwert von 1500 ppm innerhalb einer Schulstunde nicht überschritten wird? Auch hier wird, wie im vorherigen Beispiel, die CO₂-Konzentration der ausgeatmeten Luft mit Hilfe eines CO₂-Gassensors, eines Messwerterfassungssystems und einer Gefriertüte gemessen und anschließend die Zunahme der CO₂-Konzentration im Klassenzimmer modelliert. Das Ergebnis lässt sich leicht auf verschiedene Raumvolumina umrechnen, um daraus die Mindestgröße für ein Klassenzimmer bestimmen zu können.

c) CO₂-Konzentration und Einfluss der Personenzahl

Wie viele Personen dürfen sich höchstens im Klassenzimmer befinden, um innerhalb einer Schulstunde unterhalb des CO₂-Grenzwertes von 1500 ppm zu bleiben? Ergänzend zu den vorherigen Modellierungsaufgaben kann darüber hinaus nach der höchstens zulässigen Personenzahl in einem gegebenen Klassenzimmer gefragt werden. Im Gegensatz zur vorherigen Aufgabe wird nach der Bestimmung des CO₂-Anstiegs im Klassenzimmer nicht auf verschiedene Raumvolumina, sondern auf verschiedene Personenzahlen umgerechnet.

5. Experimente zur Funktionsweise des NDIR-CO₂-Gassensors

Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Experimente vorgestellt, mit denen die Funktionsweise der Sensoren deutlich wird. Die Experimente werden mit dem NDIR-CO₂-Modul (CO2 SEN S 100 2) durchgeführt, das in Abschnitt 1 vorgestellt wurde.

5.1. Überprüfung der Grundfunktion

Das eingangs vorgestellte CO₂-Gassensor-Modul wird an eine Spannungsquelle angeschlossen (20 V Gleichstrom) und es wird mit einem Voltmeter die Ausgangsspannung gemessen. Nach einer Aufwärmphase von ca. zwei Minuten kann das Modul zur Messung von CO₂-Konzentrationen genutzt werden.

Durch Einblasen von Atemluft wird die CO₂-Konzentration in der Gasmesszelle erhöht. Dadurch sinkt die Spannung am Ausgang des Moduls. Sinkt die CO₂-Konzentration in der Gasmesszelle wieder, geht auch die Spannung auf ihren ursprünglichen Wert zurück. Das Experiment zeigt, wie und mit welcher Zeitverzögerung das Ausgangssignal auf die Höhe der CO₂-Konzentration reagiert.

5.2. Experiment mit entfernter Gasmesszelle

Eine weitere Analyse zur Funktionsweise des Gassensors erfolgt durch das Entfernen der verspiegelten Gasmesszelle. Zu sehen sind dann die blinkende IR-Strahlungsquelle und der thermische Detektor mit den Filtern an der Oberfläche des Dualsensors (siehe Abb. 1). Beim Entfernen der Gasmesszelle verändert sich auch die Thermospannung, die am Ausgang des Moduls gemessen wird. Hierbei wird deutlich, dass die Höhe des Ausgangssignals von der Intensität der Infrarotstrahlung abhängig sein muss, die von der IR-Quelle zum IR-Detektor gelangt.

Die folgenden Experimente werden mit der IR-Strahlungsquelle und dem thermischen Detektor des Moduls durchgeführt. Die einzelnen Bauteile können bei den Bezugsquellen, die im Literaturverzeichnis vermerkt sind, bestellt werden.

5.3. Experimente mit dem thermischen Detektor des Moduls

Die nächsten beiden Experimente mit dem thermischen Detektor des Moduls zeigen, dass dieser aus zwei unterschiedlichen Bauteilen aufgebaut ist: aus einem NTC- oder PTC-Widerstand und zwei ‚Thermopile‘-Sensoren.

a) NTC- / PTC-Widerstand

Je nach Detektor wird als temperaturabhängiger Widerstand ein NTC oder PTC verwendet. In dem vorgestellten Modul ist ein NTC verbaut. Wird ein Multimeter mit den Anschlüssen 1 und 4 des Detektors verbunden, zeigt dieses bei Raumtemperatur (22°C) einen Widerstand von 100 kΩ an.

Wird die Temperatur des NTCs erhöht, wobei schon das Annähern einer Handfläche ausreicht, dann sinkt dessen Widerstand deutlich ab.

b) ‚Thermopile‘-Sensor

Die Temperaturabhängigkeit der Thermospannung, die an den Ausgängen der ‚Thermopile‘-Sensoren gemessen werden kann, lässt sich durch ein einfaches Experiment verdeutlichen.

Dazu werden der thermische Detektor, ein Voltmeter und warme Hände benötigt. Die Ausgänge eines ‚Thermopile‘-Sensors werden an das Voltmeter angeschlossen, und der Messbereich auf 1 mV Gleichspannung eingestellt. Anschließend wird die Handfläche in die Nähe des Detektors gehalten und die Thermospannung gemessen.

5.4. Experimente mit dem thermischen Detektor und der IR-Strahlungsquelle

Nachfolgend werden drei qualitative bzw. halb-quantitative Experimente zum Lambert-Beer'schen Gesetz vorgestellt. Sie unterscheiden sich lediglich in der systematischen Variation einer Größe. Dazu werden der Strahlenweg d , die Intensität der Infrarotstrahlung I_0 (Ausgangsleistung der IR-Strahlungsquelle) und die Gaskonzentration c schrittweise verändert. Untersucht wird jeweils die Auswirkung auf die Spannung, die an den Ausgängen des Messkanals gemessen werden kann.

Der Aufbau für die nachfolgenden drei Experimente ist identisch und wird vorab skizziert. Die Signalausgänge des Messkanals (Anschlüsse 2 und 4) werden an ein Voltmeter angeschlossen, dessen Messbereich auf 1 mV Gleichspannung eingestellt ist. Die IR-Strahlungsquelle wird an eine Spannungsquelle, die auf 4 Volt Gleichspannung eingestellt ist, angeschlossen.

a) Auswirkungen bei Änderung des Strahlengangs

Die Abhängigkeit der Ausgangsspannung vom Lichtweg lässt sich durch das folgende Experiment zeigen. Nach dem Anschließen der IR-Strahlungsquelle und des Detektors wird der Abstand zwischen beiden verändert und die Ausgangsspannung gemessen. Eine Vergrößerung des Abstands ist gleichbedeutend mit einer Verlängerung des Lichtwegs. Nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz führt dies zu einer stärkeren Abschwächung der Strahlungsintensität der Infrarotstrahlung. Fällt Infrarotstrahlung geringerer Intensität auf die Absorptionsfläche des ‚Dual-Thermopile‘-Sensors, sinkt die Spannung an dessen Ausgängen.

b) Auswirkungen der Änderung der Intensität der IR-Strahlungsquelle

Auch die Abhängigkeit der Spannung von der Intensität der IR-Strahlungsquelle lässt sich veranschaulichen. Dazu wird die Intensität der IR-Strahlungsquelle durch Erhöhen (bzw. Absenken) der angelegten Spannung gesteigert (bzw. verringert) und die Thermospannung gemessen. Trifft Infrarotstrahlung mit höherer Intensität auf die ‚Thermopile‘-

Sensoren, so steigt die Thermospannung an dessen Ausgängen an.

c) Auswirkungen der Änderung der Konzentration der absorbierenden Substanz

Um die Abhängigkeit der Spannung von der Konzentration der absorbierenden Substanz zu zeigen, wird in den Raum zwischen IR-Strahlungsquelle und thermischem Detektor geatmet und die Ausgangsspannung betrachtet. Gemäß dem Lambert-Beer'schen Gesetz führt die höhere CO_2 -Konzentration zu einer Abschwächung der Intensität der Infrarotstrahlung. Fällt Infrarotstrahlung geringerer Intensität auf den thermischen Detektor, sinkt die Spannung an dessen Ausgängen.

6. Unterricht zum CO_2 -Gassensor

Bislang existieren keine adäquaten Unterrichtsmaterialien für die Sekundarstufe I, die sowohl den Aufbau und die Funktionsweise eines NDIR- CO_2 -Gassensors als auch dessen Anwendung thematisieren. Einzelne Experimentiervorschläge, die das Funktionsprinzip eines CO_2 -Gassensors oder das Prinzip der Absorption von IR-Strahlung durch CO_2 veranschaulichen sind beispielsweise bei Nürnberger & Schanze (2004) und Höttecke *et al.* (2009) zu finden.

Im Weiteren werden zunächst Aspekte der Elementarisierung zur Technik von NDIR- CO_2 -Gassensoren diskutiert und durch Beispiele konkretisiert. Danach folgen die Zuordnung der fachlichen Inhalte zu den Bildungsstandards und die Beschreibung des zu Grunde liegenden Unterrichtskonzepts. Zuletzt werden die wesentlichen Unterrichtsschritte skizziert.

6.1. Elementarisierung

Die komplexen Sachverhalte und Zusammenhänge der NDIR- CO_2 -Gassensorik erfordern eine Elementarisierung. Dazu gehört unter anderem das Herausarbeiten der wesentlichen physikalischen Grundlagen des Themas (z. B. Girwidz, 2011). Diese sind erstens die Wechselwirkung der Infrarotstrahlung mit den CO_2 -Molekülen, zweitens die Zusammenhänge des Lambert-Beer'schen Gesetzes, drittens der Einsatz schmalbandiger Interferenzfilter und viertens die Funktionsweise des verwendeten Infrarotdetektors. Keine dieser vier Grundlagen ist für Lernende der Sek. I direkt verständlich. Zu diesem Zweck ist eine schülergerechte – aber zugleich auch sachgerechte – Vereinfachung notwendig. Mehrere Strategien sind denkbar. Speziell zum Einsatz kommen die Beschränkung auf Phänomene oder experimentelle Ergebnisse, die Fokussierung auf zielrelevante Aspekte oder qualitative und halb-quantitative Aussagen sowie der Einsatz veranschaulichender Darstellungen (z. B. Schemazeichnungen).

In der Sek. I genügen qualitative oder halb-quantitative Aussagen zum Lambert-Beer'schen Gesetz, um ein grundlegendes Verstehen der NDIR- CO_2 -Gas-

sensorik zu erreichen. Darauf aufbauend sind später auch quantitative Betrachtungen möglich.

Auch die Entstehung der Thermospannung kann von Lernenden der Sek. I nicht im Detail verstanden werden. Um diese komplexen Zusammenhänge in ihrer Schwierigkeit zu reduzieren, kommen zwei der aufgeführten Strategien zum Einsatz. Erstens beschränken sich die Betrachtungen auf experimentelle Untersuchungen von Thermoelementen und die daraus folgenden Erkenntnisse. Zweitens werden zusätzlich Schemazeichnungen zur Visualisierung eingesetzt.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt der Elementarisierung ist die Bildung von elementaren Sinneinheiten. Letztere sind bei der NDIR-CO₂-Gassensorik beispielsweise die folgenden Wissensbausteine:

- Eine IR-Strahlungsquelle sendet IR-Strahlung aus.
- Durch Gasöffnungen diffundieren CO₂-Moleküle in die Gasmesszelle hinein bzw. aus ihr heraus.
- In der Gasmesszelle absorbieren CO₂-Moleküle IR-Strahlung einer bestimmten Wellenlänge.
- Die Zusammenhänge zwischen der Intensität der Strahlung, der CO₂-Konzentration und der Messstrecke sind durch das Lambert-Beer'sche Gesetz gegeben.
- Das Interferenzfilter lässt die Wellenlängen einer IR-aktiven Rotations-Schwingungsbande durch, so dass sich ausschließlich Änderungen in diesem Spektralbereich auf das Detektorsignal auswirken.
- Ein IR-Detektor absorbiert Strahlung und reagiert mit einer Temperaturänderung. Abhängig vom Detektor wird ein entsprechendes Ausgangssignal erzeugt.

Ein weiterer Gesichtspunkt der Elementarisierung ist die Bildung elementarer Lernschritte. Dabei gilt es, auf bestehende Vorstellungen aufzubauen und, wenn möglich, Wissensbereiche miteinander zu vernetzen.

So haben Lernende am Ende der Sek. I die Erfahrung gemacht, dass Körper hoher Temperatur Wärmestrahlung aussenden. Wenngleich diese ausgesandte Strahlung für das menschliche Auge nicht sichtbar ist, kann sie dennoch über die Haut als Wärme wahrgenommen werden. Auf dieser Erfahrung aufbauend kann den Lernenden vermittelt werden, dass die IR-Strahlungsquelle wie alle Körper IR-Strahlung aussendet und Letztere in Wechselwirkung mit der Umgebung treten kann.

Darüber hinaus haben Lernende meist auch Erfahrungen gemacht, die für den Aufbau neuen Wissens hinderlich sein können. So ist Schülerinnen und Schülern der Sek. I der Verwendungszweck des Kaffeefilters bekannt. Er dient der Abtrennung des Feststoffes aus einer Flüssigkeit. Setzen die Lernenden dieses Vorwissen in Analogie zum Interferenzfilter, entstehen Fehlvorstellungen wie z. B. „das

Interferenzfilter trennt die Luftbestandteile von den CO₂-Molekülen“.

Sowohl die bestehenden Vorstellungen und Erfahrungen als auch die angewandten methodischen Konzepte beeinflussen die Abfolge der Lernschritte. Eine Möglichkeit ist, mit dem Aufbau des Sensors zu beginnen, anschließend die einzelnen Bauteile und deren Funktionsprinzip zu betrachten, und schließlich die Funktionsweise des Sensors zu analysieren. Im letzten Schritt gilt es, das in den vorherigen Lernschritten erworbene Wissen miteinander zu verknüpfen.

6.2. Bildungsstandards und Lernziele

Die fachlichen Inhalte der CO₂-Gassensorik lassen sich den vier Basiskonzepten „Materie“, „Wechselwirkung“, „System“ und „Energie“ zuordnen (KMK, 2005). Exemplarisch ist dies für die wesentlichen Inhalte in nachstehender Tabelle dargestellt (siehe Tab. 3).

Basiskonzept	Inhalt
Materie	Aufbau des CO ₂ -Moleküls, ...
Wechselwirkung	Wechselwirkung zwischen Molekülen und elektromagnetischer Strahlung, ...
System	Diffusion, Entstehung der Thermospannung, ...
Energie	Strahlung, Wechsel von Energieformen, ...

Tab. 3: Zuordnung der fachlichen Inhalte zu den Basiskonzepten

Konkret verfolgt der skizzierte Unterricht die nachstehenden Lernziele: Die Lernenden können:

- a) den Aufbau eines CO₂-Gassensors beschreiben und visualisieren,
- b) die Funktionsweise des CO₂-Gassensors, insbesondere die Zusammenhänge des Lambert-Beer'schen Gesetzes halb quantitativ beschreiben,
- c) den Aufbau eines Thermoelements beschreiben und visualisieren,
- d) auf phänomenologischer Ebene die Funktionsweise von Thermoelementen beschreiben.

Die Fähigkeiten der Lernenden in den Kompetenzbereichen Erkenntnisgewinnung und Bewertung werden unter anderem durch das Experimentieren und Modellieren gefördert. Im Anschluss an den Unterricht können die Lernenden:

- a) den CO₂-Gassensor sachgerecht in Messungen einsetzen,
- b) einfache Fragestellungen mittels eines vorstrukturierten Experiments überprüfen,
- c) experimentell gewonnene Daten im Hinblick auf die Fragestellung interpretieren,
- d) aus selbst ermittelten Daten begründete Konsequenzen ziehen.

6.3. Grundkonzeption

Die Unterrichtseinheit verbindet die Grundgedanken des ‚Anchored-Instruction-Ansatzes‘ (vgl. insbesondere CTGV, 1997) mit Ideen des integrierten Modells zum Lernen mit Texten und Bildern nach Schnotz (2005).

Die Designprinzipien des ‚Anchored-Instruction‘-Ansatzes werden entsprechend den Bedürfnissen angepasst, die ein Unterricht über moderne Alltags-technologien mit sich bringt. Der ‚Anchored-Instruction‘-Ansatz zeichnet sich wesentlich durch die Verankerung von Wissen an einen authentischen Anker aus. Solche Anker können z. B. Lernsituationen oder Lerngegenstände sein. Lernanker sind in einem Unterricht über NDIR-CO₂-Gassensoren zum einen die Erfahrungen, die die Schüler/innen in authentischen und realen Anwendungssituationen mit dem Sensor sammeln, zum anderen die Zielsetzung, die Qualität der Raumluft zu prüfen. Der Einschränkung des ‚Anchored-Instruction‘-Ansatzes auf narrative Präsentationsformate wird über die Einbindung des integrierten Modells von Schnotz (2005) entgegen gewirkt. Die Informationsvermittlung erfolgt demnach mit einem multimedialen Präsentationsformat, bestehend aus Bild-Text-Kombinationen. Zur Sicherung und zur Vertiefung des erlernten Wissens wird zusätzlich ein multimediales Format für Übungsaufgaben eingesetzt.

6.4. Unterrichtsschritte

Die vierstündige Unterrichtseinheit zum Aufbau, zur Funktionsweise und zur Anwendung von NDIR-CO₂-Gassensoren besteht aus fünf übergeordneten Unterrichtsphasen. Als Begleitmaterial steht ein Schülerarbeitsheft zur Verfügung. Es kann unter folgender Adresse kostenfrei heruntergeladen werden:

http://www.didaktikonline.physik-uni-muenchen.de/materialien/ndir_co2/index.html.

- a) 1. Phase: Einführung in den Kontext
- b) 2. Phase: Erkundung des Kontextes
- c) 3. Phase: Erarbeitung der physikalischen Grundlagen
- d) 4. Phase: Anwenden, messen, modellieren
- e) 5. Phase: Konsequenzen ziehen, Diskussion

Das *Schülerarbeitsheft* enthält neben Informationen zu den einzelnen Bauteilen, zum Aufbau und zur Funktionsweise des Sensors auch Übungsaufgaben und Experimentieranweisungen. Dabei liegen sowohl die Informationseinheiten als auch die Übungsaufgaben des Arbeitsheftes in einem multimedialen Präsentationsformat (Bild- und Textkombinationen) vor. Die Multimedialität der Informationseinheiten soll den Aufbau mehrfach kodierter Wissensrepräsentationen und die Entwicklung von Vorstellungen unterstützen. Die zu Grunde liegende Idee der Übungsaufgaben besteht darin, die Lernenden zu einer effektiven Verarbeitung der einzelnen Informationseinheiten zu führen (siehe Abb. 7).

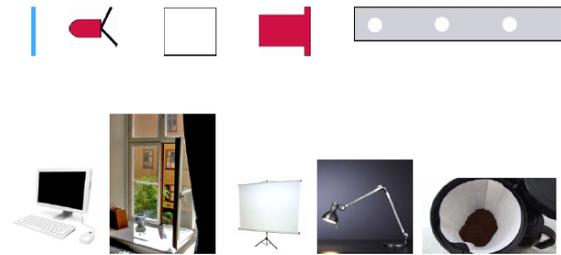


Abb. 7: Bildbasierte Übungsaufgabe, die das Bilden von Analogien zum Ziel hat. Die Aufgabe lautet: „Ordne den Bauteilen des Sensors je ein entsprechendes Bild aus dem Alltag zu.“

Der Einstieg in die *erste Unterrichtsphase* erfolgt narrativ, in Anlehnung an den ‚Anchored-Instruction‘-Ansatz. Unterstützt wird der Einstieg durch eine Abbildung (auch als Overheadfolie verfügbar), die ein Gespräch zweier Schüler über Müdigkeit im Unterricht und schlechte Luft im Klassenzimmer zeigt. Das beschriebene Gespräch führt auf die zu lösende Problemstellung. Zielsetzung der ersten Phase ist, in den Kontext einzuführen, erste Hintergrundinformationen zur Raumluft zu liefern und die zwei Hauptcharaktere vorzustellen, die im Arbeitsheft als Lernbegleiter weiter durch die Unterrichtseinheit führen.

Die *zweite Phase* findet im Unterrichtsgespräch statt. Dabei werden die Schüler/innen dazu aufgefordert, zum einen die aktuelle Höhe der CO₂-Konzentration zu schätzen, zum anderen eine Vorhersage zu treffen, auf welchen Wert diese innerhalb einer Schulstunde ansteigt. Ziele der zweiten Phase sind inhaltlich relevantes Vorwissen zu aktivieren und ein Problembewusstsein der Lernenden zu schaffen, wobei sie im optimalen Fall das Thema auch für sich persönlich als relevant ansehen.

In der *dritten Phase* erarbeiten sich die Schüler/innen in Einzel- und Gruppenarbeit mit Hilfe des Schülerarbeitsheftes und den darin enthaltenen Informationseinheiten, Übungsaufgaben und Experimenten die fachlichen Grundlagen der NDIR-CO₂-Gassensorik.

Ziele dieser Phase sind der Aufbau mehrfach kodierter Wissensrepräsentationen zum prinzipiellen Aufbau von NDIR-CO₂-Gassensoren sowie zur Funktionsweise der einzelnen Bauteile und des Sensors. Ferner zielen ein Teil der Übungsaufgaben auf die Nutzung von Analogien ab, indem sie die Lernenden dazu auffordern, die Funktionsweise der einzelnen Bauteile in Analogie zu bereits bekannten Prozessen zu erschließen.

Anschließend erfolgt in der *vierten Phase* die Anwendung des Gelernten und dessen Einbettung in den Kontext ‚Raumluftmessung‘. In diesem Unterrichtsabschnitt messen die Schüler/innen die aktuelle CO₂-Konzentration und modellieren deren Anstieg innerhalb einer Schulstunde in Gruppenarbeit (siehe Abschnitt 4.5). Ziele dieser Phase sind das Wieder-

erkennen und das Anwenden des Gelernten in einer konkreten Anwendungssituation.

In der *fünften Phase* werden die Ergebnisse der einzelnen Gruppen innerhalb der Klasse kommuniziert, interpretiert und diskutiert. Dabei präsentieren zunächst alle Gruppen ihre Messergebnisse. Auf den Messergebnissen basierend ziehen die Schüler/innen entsprechende Konsequenzen und erstellen eine für ihre Klasse individuelle Lüftungsempfehlung. Ziele dieser Phase sind eine tiefgründige Betrachtung der Messergebnisse und deren Interpretation. Darüber hinaus werden die Lernenden dazu aufgefordert, Konsequenzen zu ziehen und diese zu begründen.

7. Schlussbemerkungen und Ausblick

NDIR-CO₂-Gassensoren bieten die Möglichkeit, interessante, alltagsnahe und authentische Kontexte in den Physikunterricht zu integrieren. Als Beispiel sei hier die Untersuchung/Kontrolle der Raumluftqualität genannt. Darüber hinaus erweist sich die Notwendigkeit auch auf das zu Grunde liegende Messprinzip einzugehen nicht als Hindernis, sondern als Chance physikalische Inhalte in ihrer Anwendung direkt erfahr- und erlebbar zu präsentieren. Text- und bildbasierte Informationseinheiten, vertiefende Übungsaufgaben und attraktive Experimente ermöglichen ein intensives naturwissenschaftliches Arbeiten und Erlernen des grundlegenden Messprinzips in zwei bis vier Schulstunden.

Derzeit wird in einer empirischen Studie im Rahmen des vom Ministerium für Wissenschaft und Kunst Baden-Württembergs geförderten Dissertationsvorhabens „Kontextorientierte Ankermedien aus der Alltags- und Umweltsensorik“ untersucht, inwieweit der Kontext „Raumluft im Klassenzimmer“ und das multimedial-präsentationsformat der Informationseinheiten und Übungsaufgaben des Schülerarbeitsheftes Einfluss auf den Erwerb deklarativen Wissens, den Lerntransfer und die Motivation haben. Die Autoren haben bereits erste Ergebnisse.

8. Literatur

- [1] Banwell, C.N. & McCash, E.M. (1999). Molekülspektroskopie – Ein Grundkurs. München: Oldenbourg.
- [2] Bell, Th. & Walter, O. (2009). Schüler modellieren den Treibhauseffekt: Unterrichtskonzept und Ergebnisse einer Erprobung in der Sekundarstufe II. *PhyDid 2* (8), S. 32-48.
- [3] Brauns, M. (2007). Automatischer Fensteröffner regelt CO₂-Konzentration in Räumen. Pressemitteilung der Universität der Bundeswehr München vom 22.03.2007, <http://idw-online.de/pages/de/news201562>, 24.01.2011
- [4] Budzier, H. & Gerlach, G. (2010). Thermische Infrarotsensoren. Weinheim: Wiley-VCH.
- [5] Coley, D.A.; Greeves, R. & Saxby, B.K. (2007). The Effect of Low Ventilation Rates on the Cognitive Function of a Primary School Class. *International Journal of Ventilation*, 2 (6), S. 107-112.
- [6] CTGV (1997). *The Jasper Project: Lessons in Curriculum, Instruction, Assessment, and Professional Development*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- [7] Demtröder, W. (2003). *Molekülphysik – Theoretische Grundlagen und experimentelle Methoden*. München: Oldenbourg.
- [8] Demtröder, W. (2007). *Laserspektroskopie. Grundlagen und Techniken*. Berlin: Springer.
- [9] Duit, R. & Mikelskis-Seifert, S. (2007). Kontextorientierter Unterricht. Wie man es einbettet, so wird es gelernt. *Unterricht Physik* 98 (18), S. 4-8.
- [10] Eilers, K.; Lohse-Grimmer, B. & Wehrse, T. (2009). Der TI-84 Plus im Biologieunterricht: Atmung und Fotosynthese am Beispiel der Kresse. *TI-Nachrichten*, 1 (09), S. 18-19.
- [11] Friedrich, O. (2007). *Physiologie – GK 1*. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- [12] Girwidz, R. (2011). Elementarisierung. In M. Hopf, H. Schecker & H. Wiesner (Hrsg.), *Physikdidaktik kompakt*. Hallbergmoos: Aulis.
- [13] Haken, H. & Wolf, H. Ch. (2003). *Molekülphysik und Quantenchemie*. Berlin: Springer.
- [14] Höttecke, D.; Maiseyenko, V.; Rethfeld, J. & Mrochen, M. (2009). Den Treibhauseffekt verstehen. *Unterricht Physik*, 20 (111/112), S. 24-36.
- [15] InfraTec (2010). Application of Fast Response Dual-Colour Pyroelectric Detectors with Integrated Op Amp in a Low Power NDIR Gas Monitor. http://www.infratec.de/fileadmin/downloads/pdf/TechPaper_Fast_Response_Dualcolor_Detector_extern.pdf, 10.01.2010
- [16] LGL (2006a). Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, Luftqualität in öffentlichen Innenräumen, http://www.lgl.bayern.de/gesundheits/arbeitplatz_umwelt/projekte_a_z/ir_luftqualitaet_oeffentliche_innenraeume.htm, 11.11.2010
- [17] LGL (2006b). Frische Luft an bayrischen Schulen – Untersuchungen zur Verbesserung der Luftqualität. http://www.lgl.bayern.de/downloads/gesundheits/doc/alt/luft_ergebnisse.pdf, 11.11.2010
- [18] Meixner, H. & Mader, G. (1990). Pyroelektrische IR-Detektoren auf Polymerbasis. *Physik in unserer Zeit*, 21 (5), S. 210-218.
- [19] Micro-Hybrid (2011). Two Channel Thermopile TS2x2001. http://www.micro-hybrid.de/fileadmin/bilder/Datenblaetter/Thermopiles-MH_TS2x200X.pdf, 02.05.2011

- [20] Myhrvold, A.N.; Olsen, E. & Lauridsen, Ø. (1996). Indoor environment in schools – Pupils' health and performance in regard to CO₂ concentration. In: S. Yoshizawa; K. Kimura; K. Ikeda; S. Tanabe & T. Iwata (Hrsg.). Proceedings of Indoor Air '96. Nagoya, 7. internationale Konferenz "Indoor Air Quality and Climate", Vol. 4, S. 369-374.
- [21] NLGA (2003). Ein Modell zur Simulation der Qualität der Innenraumluft am Beispiel von CO₂.
http://www.nibis.de/~auge/seiten/themen/raumklima_pi/medien/Handbuch_CO2Modell.pdf, 04.05.2011
- [22] NLGA (2004). Niedersächsisches Schulmessenprogramm.
<http://www.nlga.niedersachsen.de/download/12013>, 11.11.2010
- [23] Nürnberger, W. & Schanze, S. (2004). Experimente zur Einheit Treibhauseffekt. Kiel, IPN.
<http://bildungsserver.hamburg.de/contentblob/2313070/data/colab-experimente.pdf>, 14.01.2011
- [24] Pelster, R.; Pieper, R. & Hüttl, I. (2005). Thermospannungen – Viel genutzt und fast immer falsch erklärt! PhyDid, 1 (4), S. 10-22.
- [25] Porter, S.G. (1981). A brief guide to pyroelectric detectors. Ferroelectrics, 33, S. 193-206.
- [26] Ricolfi, T. & Scholz, J. (1990). Thermal Sensors, Vol. 4. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH.
- [27] Robert Bosch GmbH (2008). ADAC-Innovationspreis verliehen. Gelber Engel für CO₂-Sensor von Bosch – Umweltschonende Technik ausgezeichnet. Pressemitteilung des Bosch Media Service vom 17.01.2008.
http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=3446&tk_id=108
- [28] Schnotz, W. (2005). An Integrated Model of Text and Picture Comprehension. In R.E. Mayer (Hrsg.). The Cambridge Handbook of Multimedia Learning. New York: Cambridge University Press. S. 49-69.
- [29] Sieber, I. & Nüssen, O. (2001). Modellierung eines IR-Gassensors im Hinblick auf eine Entwurfsoptimierung.
http://www.iai.fzk.de/www-extern/fileadmin/Image_Archive/automatisierung/ModSimOpt/IR_Gassensor_PDFs/paper03.pdf
- [30] Whatmore, R.W. (1986). Pyroelectric devices and materials. Reports on Progress in Physics 49 (12), S. 1335-1386.

9. Anlagen

Bezugsquellen für einen Dual-thermoelektrischen CO₂-Detektor von PERKIN ELMER

- [1] <http://www.tn-electronics.de>
(Artikel TPS2534G2/G20);
Preis pro Stück: ca. 62 €
- [2] <http://darisusgmbh.de>
(Artikel TPS2534G2/G20);
Preis pro Stück: ca. 71 €

Bezugsquelle für eine IR-Lampe

- [3] <http://www.tn-electronics.de>
(Artikel IRL715);
Preis pro Stück: ca. 3 €

Bezugsquelle für ein NDIR-CO₂-Gassensor-Modul

- [4] <http://www.mb-systemtechnik.de>
(Artikel CO2 SEN S 100 2);
Preis pro Stück: ca. 60 €