

Einfache Sensoren für Spurengasmessungen im Schulunterricht

Wissenschaftliche Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung
für das Lehramt an Gymnasien im Fach Physik, eingereicht bei der
Hessischen Lehrkräfteakademie, Prüfungsstelle Frankfurt

verfasst von

Jonas Sebastian Tybussek

geb. am 7. April 2002 in Offenbach

Erstgutachter: Prof. Dr. Thomas Wilhelm

Zweitgutachterin: Prof. Dr. Tanja Schuck

Abgabe der Arbeit am 12.05.2026

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht am Beispiel der CO₂-Messung, wie Spurengasmessungen im Physikunterricht der Sekundarstufe I eingesetzt werden können. Dazu wird ein Arduino-basiertes NDIR-Messsystem aufgebaut, das zur Erfassung des CO₂-Mischungsverhältnisses einen Senseair-K30-Sensor verwendet.

Ausgehend von den Grundlagen zur Spurengasmessung und zum NDIR-Messprinzip werden didaktische und curriculare Anknüpfungspunkte für den Physikunterricht herausgearbeitet. Dabei zeigt sich, dass CO₂-Messungen fachliche Inhalte mit alltagsbezogenen Fragestellungen, digitaler Messwerterfassung sowie der Darstellung und Auswertung von Messdaten verbinden können.

Das Messsystem wird hinsichtlich Aufbau, Verschaltung und Programmierung beschrieben. Ergänzend fließen Erfahrungen aus einer ersten Erprobung mit zwei Schülern im Rahmen eines Schülerpraktikums ein. Für den Unterricht werden didaktische Reduktionen, Lernziele und mögliche Schwerpunktsetzungen herausgearbeitet. Diese betreffen insbesondere die Einführung der Komponenten des Messsystems, das grundlegende Verständnis des NDIR-Messprinzips, den experimentellen Einsatz sowie die Darstellung und Auswertung der Messwerte. Für die digitale Messwerterfassung wird zudem ein Dashboard im Excel Data Streamer erstellt, das eine fortlaufende Erfassung, Visualisierung und Auswertung der CO₂-Messwerte ermöglicht.

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass CO₂-Messungen mit einfachen Sensorsystemen sinnvoll in den Physikunterricht der Sekundarstufe I eingebunden werden können. Das entwickelte Messsystem bietet vor allem durch seinen vergleichsweise geringen Preis, seine flexible Einsetzbarkeit und den Einblick in Aufbau und Funktionsweise zentrale Potenziale für den Unterricht. Gleichzeitig ist der Einsatz mit einem erhöhten technischen und zeitlichen Vorbereitungsaufwand verbunden. Der unterrichtliche Mehrwert ergibt sich daher insbesondere dann, wenn neben der Messwertaufnahme auch die technische Umsetzung, Erweiterbarkeit oder digitale Auswertung der Messdaten didaktisch genutzt werden sollen.

Danksagung

Zunächst möchte ich mich herzlich bei Prof. Dr. Tanja Schuck und Prof. Dr. Thomas Wilhelm dafür bedanken, dass ich diese Arbeit zu einem spannenden Thema anfertigen durfte, das inhaltlich an meine Bachelorarbeit anknüpft. Vielen Dank für die sehr gute Betreuung sowie die Unterstützung bei fachlichen und organisatorischen Fragen während der gesamten Arbeitsphase.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Tanja Schuck, die mich bereits während meiner Bachelorarbeit betreut hat und mir auch bei dieser Arbeit mit hilfreichen Anregungen, konstruktivem Feedback und großem Engagement zur Seite stand.

Darüber hinaus danke ich Prof. Dr. Andreas Engel und den weiteren Mitgliedern seiner Arbeitsgruppe für ihre Unterstützung und Bereitschaft, bei Fragen jederzeit weiterzuhelfen. Außerdem danke ich für die Bereitstellung der technischen Ausstattung sowie eines eigenen Büroarbeitsplatzes.

Ebenso danke ich Timo Keber für das Löten der Sensoren und die Übernahme der Materialbestellungen.

Abschließend danke ich meiner Familie und meinen Freunden für ihre Unterstützung während meines gesamten Studiums, besonders in anspruchsvollen Phasen. Meinen Eltern danke ich von Herzen für ihren Rückhalt und dafür, dass sie mich darin bestärkt haben, mit dem Lehramtsstudium eine neue Richtung einzuschlagen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Danksagung	II
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis.....	VIII
1. Einleitung und Zielsetzung	1
2. Fachwissenschaftlicher Hintergrund	3
2.1 Spurengase in der Atmosphäre	3
2.2 Bedeutung der Spurengase	4
2.3 NDIR-Messprinzip	7
3. Spurengasmessungen im Physikunterricht	10
3.1 Experimentelle Zugänge im Physikunterricht	10
3.2 Spurengase als Gegenstand des Physikunterrichts	11
3.3 Curriculare Einordnung	12
3.4 Digitale Messwerterfassung.....	14
3.5 Bisherige Ansätze	16
4. CO₂-Messsystem	22
4.1 CO ₂ -Sensor	22
4.2 Weitere Komponenten	24
4.3 Verschaltung und Programmierung	26
5. Erprobung des Messsystems	29
5.1 Zielsetzung und Rahmenbedingungen.....	29
5.2 Durchführung der Erprobung	29
5.3 Beobachtungen und Schlussfolgerungen.....	31
6. Das CO₂-Messsystem im Physikunterricht	34
6.1 Didaktische Reduktion und Lernziele	34
6.2 Einführung des Messsystems in den Unterricht	37

6.3 Experimenteller Einsatz.....	47
6.4 Messwertdarstellung und Auswertung.....	50
7. Diskussion.....	58
8. Fazit und Ausblick	62
Literaturverzeichnis	64
Abkürzungsverzeichnis	71
Anhang.....	72
A.1 Ergänzende Abbildungen	72
A.2 Sketch des CO ₂ -Messsystems.....	74
A.3 Sketch Lückentext.....	78
A.4 Material zur Erprobung des Messsystems	86
Eigenständigkeitserklärung	90

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung des atmosphärischen CO ₂ -Mischungsverhältnisses (Keeling-Kurve) basierend auf Messungen am Mauna-Loa-Observatorium. Quelle: NOAA (2026).	5
Abbildung 2: Zuordnung der Schadstoffkonzentrationen zu den Indexklassen des Luftqualitätsindex (LQI). Quelle: UBA, 2026a.	6
Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer NDIR-Messzelle mit gefaltetem optischen Strahlengang. Quelle: Wiegleb (2022, S. 394).	9
Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines NDIR-Sensors mit Mess- und Referenzdetektor. Quelle: Wiegleb (2022, S. 394).	9
Abbildung 5: Der in Watzka & Girwidz (2011), verwendete Sensor von MB Systemtechnik (CO ₂ SEN S 100 2) zur Veranschaulichung der Funktionsweise des NDIR-Messprinzips. Links mit entfernter Gasmesszelle. Quelle: LDP (2026).	17
Abbildung 6: Vernier-NDIR-Sensor zur CO ₂ -Messung links sowie beispielhafter Messaufbau im Glasgefäß rechts. Quellen: links Böttcher Datentechnik GmbH (2026), rechts Independence Science (2026.).	18
Abbildung 7: Microcontrollerbasierte senseBox CO ₂ -Ampel. Quelle: senseBox Docs (2024).	19
Abbildung 8: Versuchsaufbau des Arduino-basierten Messsystems zur Untersuchung des Treibhauseffekts. Quelle: Science on Stage (2026)...	20
Abbildung 9: Links: App-Ansicht mit graphischer Darstellung von CO ₂ -Gehalt, Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Messverlauf. Oben rechts: Bausatz mit Lasercut-Gehäuse. Unten rechts: Bausatz mit 3D-Druck-Gehäuse. Quelle: phyphox (2026).	21
Abbildung 10: Senseair K30 FR 2Hz (ABC=OFF).	22
Abbildung 11: Übersicht der Leiterplatte des K30-Sensormoduls mit beschrifteten Anschlüssen und Schnittstellen. Quelle: (Paramair GmbH, 2025b, S.5).	23
Abbildung 12: Mikrocontrollerboard vom Typ Elegoo Uno R3 (rechts) und Mini-Breadboard (links).	25

Abbildung 13: LCD-Display mit I ² C-Schnittstelle.	25
Abbildung 14: Übersicht der Anschlüsse des Elegoo Uno R3. Quelle: (ELEGOO, 2026, S.2).	25
Abbildung 15: Vollständig aufgebautes und verschaltetes CO ₂ -Messsystem mit K30-Sensormodul, Mikrocontrollerboard, LCD-Display und Mini- Breadboard.	27
Abbildung 16: Messaufbau der Erprobung, bestehend aus einem Arduino- kompatiblen Mikrocontrollerboard mit Data-Logging-Shield sowie einem Senseair-K30-Sensor und einem BME280-Sensor.	30
Abbildung 17: Beschriftbare Darstellung des Elegoo Uno R3-Boards zur Zuordnung zentraler Bauteile und Anschlüsse.	40
Abbildung 18: Vorgehen zur Einstellung des LCD-Kontrasts durch Verstellen des Potentiometers auf der Rückseite des Displays.	42
Abbildung 19: Schematische Darstellung der Verkabelung des in Kapitel 4 vorgestellten Messsystems.	44
Abbildung 20: Übersicht der für den Brauseversuch verwendeten Materialien: Wassergefüllter Kunststoffbehälter, Kunststoffbehälter mit K30-Sensor, leere Klopapierrolle, Küchenrolle, drei Zip-Beutel mit Volumina von 2,5 l, 4,5 l und 6 l, Löffel sowie Brausepackungen.	48
Abbildung 21: Zeigt den exemplarischen Versuchsaufbau des Brauseversuchs mit einem 4,5l Volumen.	49
Abbildung 22: Arbeitsmappeneinstellungen des Excel Data Streamers für das CO ₂ -Messsystem.	52
Abbildung 23: Registerkarte des Excel Data Streamers in Microsoft Excel. ...	52
Abbildung 24: CO ₂ -Dashboard zur Darstellung und Auswertung der Messwerte in Excel am Beispiel des in Abschnitt 6.3.2 beschriebenen Brauseversuchs mit 2 g Brausepulver.	53
Abbildung 25: Statusanzeige zur Luftqualitätsbewertung im CO ₂ -Dashboard bei unterschiedlichen CO ₂ -Mischungsverhältnissen.	55
Abbildung 26: Screenshot der graphische Programmieroberfläche namens senseBox Blockly. Quelle: senseBox Blockly (2026).	72

Abbildung 27: Belegung der digitalen Ein- und Ausgänge sowie des I ² C-Anschlusses des Mikrocontrollerboards.....	72
Abbildung 28: Belegung der Versorgungsanschlüsse des Mikrocontrollerboards.....	73
Abbildung 29: Anschlussverkabelung des LCD-Displays mit I ² C-Schnittstelle.	73
Abbildung 30: Verteilung der 5-V-Versorgung über das Breadboard.....	73
Abbildung 31: Übersicht der Leiterplatte (PCB) des K30-Sensormoduls mit beschrifteten Anschlüssen und Schnittstellen (oben) sowie schematische Darstellung des Sensoraufbaus mit Position der optischen Baugruppe (OBA) (unten). Paramair GmbH (2025a, S.5).	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Elektrische Verschaltung des K30-Sensors mit dem Mikrocontrollerboard.	26
Tabelle 2: Elektrische Verschaltung des LCD-Displays mit dem Mikrocontrollerboard.	26
Tabelle 3: Elektrische Verschaltung des zu erprobenden Messsystems. Quelle: (Tybussek, 2026, S. 12).....	30
Tabelle 4: Bauteile des Arduino-Boards und ihre Funktion.	41

1. Einleitung und Zielsetzung

Ein Piepton ertönt im Klassenraum. Die CO₂-Ampel springt auf Rot, woraufhin Schülerinnen und Schüler die Fenster öffnen. Besonders während der COVID-19-Pandemie wurden solche Situationen an vielen Schulen Teil des Unterrichtsalltags. Ein unsichtbares Gas wurde durch ein einfaches Messgerät sichtbar und löste unmittelbares Handeln aus. Auch Nachrichten über Methanemissionen aus der Landwirtschaft, Diskussionen über Stickoxide an stark befahrenen Straßen oder Warnungen vor erhöhten Ozonwerten an heißen Sommertagen verweisen auf Spurengase, mit denen Schülerinnen und Schüler in unterschiedlichen Zusammenhängen zumindest indirekt in Berührung kommen können.

Diese Beispiele stehen für Umwelt-, Klima- und Gesundheitsfragen, die eine hohe gesellschaftliche Bedeutung besitzen, zugleich aber mit anderen Krisen und Problemlagen um Aufmerksamkeit konkurrieren.

Die Umweltbewusstseinsstudie 2024 zeigt, dass Umwelt- und Klimaschutz in Deutschland weiterhin stark im Bewusstsein verankert sind: 54 % der Befragten schätzen sie als sehr wichtig ein, weitere 34 % als eher wichtig. Zwar ist der Anteil derjenigen, die Umwelt- und Klimaschutz als sehr wichtig bewerten, gegenüber früheren Jahren zurückgegangen, dennoch wird Umwelt- und Klimaschutz weiterhin mit Lebensqualität verbunden. So zählt aus Sicht der Befragten unter anderem die Verringerung der Luftverschmutzung zu den Aspekten, die zu einer Verbesserung der Lebensqualität beitragen können (Umweltbundesamt, 2025). Auch bei Jugendlichen bleiben Umwelt- und Klimafragen relevant: In der Shell-Jugendstudie 2024 gaben 64 % der Jugendlichen an, sich wegen Umweltverschmutzung zu sorgen, 63 % nannten den Klimawandel als Sorge (Shell Deutschland GmbH, 2024).

Zugleich verweist die BARMER/SINUS-Jugendstudie 2025/26 darauf, dass der Klimawandel für viele Jugendliche auch mit gesundheitlichen Sorgen verbunden ist: 31 % der Jugendlichen gaben an, große Angst vor dem Klimawandel zu haben, was den Stufen 8 bis 10 auf einer zehnstufigen Skala entspricht. Zudem rechnet mit 53 % eine Mehrheit der Jugendlichen mit negativen Folgen des Klimawandels für die Gesundheit (Barmer, 2026).

Für den Physikunterricht ergibt sich hieraus eine besondere Herausforderung. Spurengase sind wie gezeigt mit gesellschaftlich relevanten Themen verbunden, bleiben für Schülerinnen und Schüler jedoch häufig schwer greifbar. Sie lassen sich im Alltag meist nicht direkt sehen, riechen oder fühlen. Ihre Bedeutung erschließt sich daher häufig erst über Messwerte, Grenzwerte und deren fachliche Deutung. Zwischen globalen Umweltfragen und konkretem Unterrichtsgeschehen eröffnet sich damit ein didaktisch interessanter Zugang: die Messung von Spurengasen mit einfachen Sensoren.

An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an. Sie untersucht am Beispiel der CO₂-Messung, wie Spurengasmessungen im Physikunterricht der Sekundarstufe I eingesetzt werden können. Im Mittelpunkt steht dabei ein Arduino-basiertes CO₂-Messsystem mit NDIR-Sensor. Neben den fachlichen Grundlagen der Spurengasmessung werden Fragen der digitalen Messwerterfassung, der didaktischen Reduktion und der praktischen Umsetzung im Unterricht aufgegriffen. Ergänzend fließen Erfahrungen aus einer ersten Erprobung mit zwei Schülern ein, um mögliche Schwierigkeiten sowie daraus entstehenden Unterstützungsbedarf zu berücksichtigen.

2. Fachwissenschaftlicher Hintergrund

2.1 Spurengase in der Atmosphäre

Die Atmosphäre der Erde besteht aus einem Gasgemisch mit den Hauptbestandteilen Stickstoff (N_2), Sauerstoff (O_2), Argon (Ar) und Wasserdampf (H_2O). Da der Anteil des Wasserdampfes in der Atmosphäre räumlich und zeitlich stark variiert, wird im Folgenden die Zusammensetzung trockener Luft (wasserdampffreie Luft) betrachtet (Kraus, 2004).

Den größten Volumenanteil der trockenen Luft stellt Stickstoff mit etwa 78 %, gefolgt von Sauerstoff (21 %) und Argon (0,9 %) (Klose, 2016).

Neben diesen Hauptbestandteilen, die 99,9 % der Luft ausmachen, enthält die Atmosphäre eine Vielzahl weiterer Gase, die nur in sehr geringen Anteilen vorkommen: Die Spurengase. Diese geringen Anteile lassen sich als molare Mischungsverhältnisse ausdrücken. Dabei wird der Anteil eines Spurengases relativ zur Gesamtanzahl der Moleküle innerhalb einer Luftprobe angegeben. Gängige Einheiten der Mischungsverhältnisse sind „parts per million“ (ppm) sowie „parts per billion“ (ppb), die den Anteil von Molekülen eines Spurengases pro eine Million (10^{-6}) beziehungsweise eine Milliarde (10^{-9}) Luftmoleküle bezeichnen. Noch geringere Mischungsverhältnisse werden im Bereich von „parts per trillion“ (ppt) angegeben (Klose, 2016).

Zu den Spurengasen zählen unter anderem Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O), Kohlenmonoxid (CO) sowie Ozon (O_3). Weitere Spurengase wie Stickoxide (NO und NO_2), flüchtige organische Verbindungen (VOCs) oder Schwefeldioxid (SO_2) kommen in noch geringeren Mischungsverhältnissen vor (DWD, 2026).

Verschiedene Prozesse beeinflussen die Mischungsverhältnisse von Spurengasen in der Atmosphäre. Dazu zählen insbesondere natürliche und anthropogene Emissionen, chemische Umwandlungsprozesse, Deposition und atmosphärische Transportprozesse. Aufgrund der geographischen Verteilung von Quellen und Senken sowie aus zeitlichen Veränderungen, beispielsweise im Tages- und Jahresgang, weisen Spurengase sowohl räumliche als auch zeitliche Variabilität auf (Roedel & Wagner, 2018; Spektrum der Wissenschaft, 2002).

2.2 Bedeutung der Spurengase

Trotz ihrer geringen Mischungsverhältnisse haben Spurengase einen entscheidenden Einfluss auf zahlreiche Prozesse in der Atmosphäre. Sie beeinflussen maßgeblich den Strahlungshaushalt der Erde und damit das Klimasystem, sind für die Luftqualität von Bedeutung und an zahlreichen chemischen Reaktionen beteiligt. Zudem schützt stratosphärisches Ozon das Leben vor schädlicher UV-Strahlung (DWD, 2026; Roedel & Wagner, 2018).

2.2.1 Strahlungshaushalt

Der Strahlungshaushalt der Erde ergibt sich aus dem Zusammenspiel von einfallender kurzwelliger solarer Strahlung und der von der Erde abgegebenen langwelligen terrestrischen Strahlung (Kraus, 2004). Während die kurzwellige Strahlung die Atmosphäre weitgehend ungehindert durchdringt und die Erdoberfläche erwärmt, wird ein Teil der von der Erde ausgehenden langwellige Infrarotstrahlung von bestimmten atmosphärischen Gasen absorbiert und anschließend anteilig in Richtung der Erdoberfläche reemittiert (Klose, 2016). Diese Gase werden als Treibhausgase bezeichnet. Sie absorbieren dabei die infrarote Strahlung nicht über das gesamte Spektrum hinweg, sondern in für die jeweiligen Gase charakteristischen Wellenlängenbereichen.

Dieser Prozess wird als Treibhauseffekt bezeichnet und führt dazu, dass sich die untere Atmosphäre zusätzlich erwärmt. Ohne diesen natürlichen Effekt würde sich im globalen Mittel eine Temperatur von etwa -18 °C einstellen, während die tatsächliche mittlere Temperatur der Erdoberfläche bei etwa $+15\text{ °C}$ liegt. Der natürliche Treibhauseffekt beruht dabei vor allem auf Wasserdampf als kurzlebigen Treibhausgas (Kraus, 2004).

Seit Beginn der Industrialisierung um 1850 verstärkt der Mensch den natürlichen Treibhauseffekt, indem er die Mischungsverhältnisse von Treibhausgasen, insbesondere durch die Verbrennung fossiler Energieträger, erhöht und zusätzlich vom Menschen entwickelte langlebige Treibhausgase, wie Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), in die Atmosphäre emittiert. Dieser zusätzliche Einfluss wird als anthropogener Treibhauseffekt bezeichnet (Roedel & Wagner, 2018). Zu den wichtigsten anthropogenen Treibhausgasen zählen CO_2 , CH_4 und N_2O (DWD, 2026).

Am Beispiel von CO_2 als mengenmäßig bedeutendstem anthropogenen Treibhausgas lässt sich dieser Anstieg veranschaulichen. Das vorindustrielle CO_2 -Mischungsverhältnis lag bei etwa 280 ppm, seitdem ist zunächst ein langsamer, später jedoch deutlich beschleunigter Anstieg zu beobachten (Roedel & Wagner, 2018).

Messungen am Mauna-Loa-Observatorium zeigen, dass das globale Jahresmittel von 315,98 ppm im Jahr 1959 auf 427,35 ppm im Jahr 2025 angestiegen ist. Diese Messreihe stellt die längste kontinuierliche Direktaufzeichnung des atmosphärischen CO_2 -Mischungsverhältnisses dar (NOAA, 2026). Die Entwicklung ist in Abbildung 1 gezeigt.

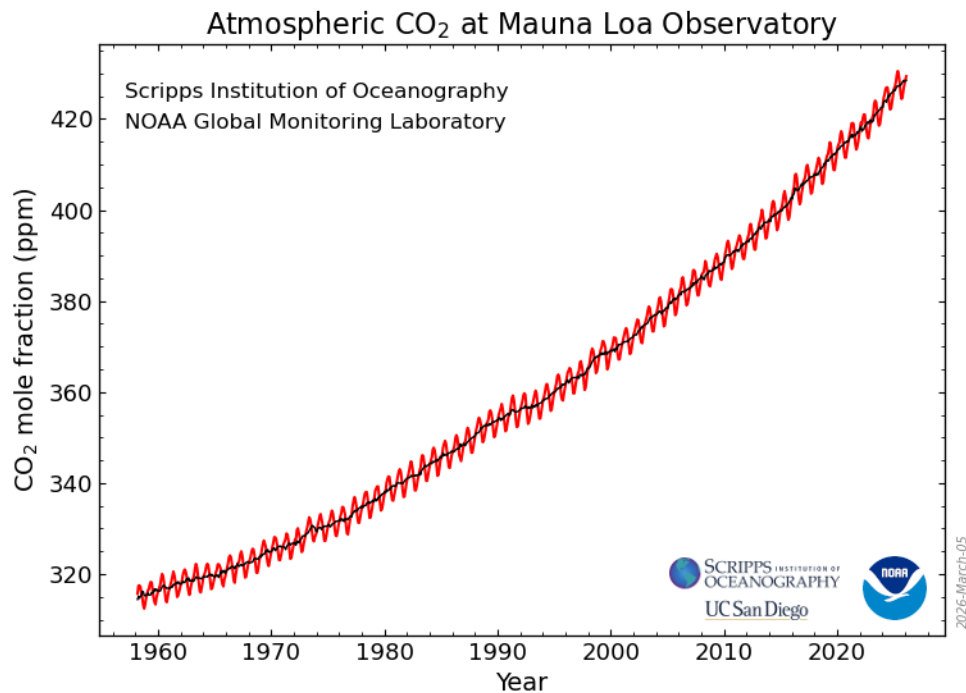


Abbildung 1: Entwicklung des atmosphärischen CO_2 -Mischungsverhältnisses (Keeling-Kurve) basierend auf Messungen am Mauna-Loa-Observatorium. Quelle: NOAA (2026).

2.2.3 Luftqualität

Einige Spurengase haben darüber hinaus einen direkten Einfluss auf die Luftqualität. Zur Bewertung der Luftqualität wird in Deutschland unter anderem der Luftqualitätsindex (LQI) des Umweltbundesamtes (UBA) herangezogen. Dieser basiert neben Feinstaub (PM₁₀ und PM_{2,5}) auf den Messwerten der Spurengase Ozon (O₃), Stickstoffdioxid (NO₂) und Schwefeldioxid (SO₂). Die stündlich erfassten Messwerte werden anhand festgelegter Schwellenwerte in fünf Indexklassen von „sehr gut“ bis „sehr schlecht“ eingeteilt und durch Hinweise sowie Verhaltensempfehlungen für die Bevölkerung ergänzt. Besonders erhöhte Belastungen treten dabei vor allem in Ballungsräumen und entlang stark befahrener Verkehrswege auf (UBA, 2026a). Eine Übersicht des LQI ist in Abbildung 2 dargestellt.

LQI-Klasse	PM ₁₀ [*]	PM _{2,5} [*]	O ₃ [*]	NO ₂ [*]	SO ₂ [*]
Sehr schlecht	über 90	über 50	über 240	über 100	über 100
Schlecht	55-90	31-50	145-240	61-100	61-100
Mäßig	28-54	16-30	73-144	31-60	31-60
Gut	10-27	6-15	25-72	11-30	11-30
Sehr gut	0-9	0-5	0-24	0-10	0-10

^{*} Stundensmittel in µg/m³

Abbildung 2: Zuordnung der Schadstoffkonzentrationen zu den Indexklassen des Luftqualitätsindex (LQI). Quelle: UBA, 2026a.

Während stratosphärisches Ozon eine wichtige Schutzfunktion gegenüber ultravioletter Strahlung besitzt, wirkt bodennahes Ozon als Luftschadstoff und kann gesundheitsschädlich sein (Seinfeld & Pandis, 2006).

Nach der Deutsche(n) Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin (DGP) können Spurengase reizend auf die Atemwege wirken und gesundheitliche Beeinträchtigungen wie Atemwegsbeschwerden, entzündliche Reaktionen sowie eine Verschlechterung bestehender Atemwegserkrankungen verursachen. Darüber hinaus stehen sie im Zusammenhang mit negativen Auswirkungen auf das Herz-Kreislauf-System und können langfristig zu einer erhöhten Sterblichkeit beitragen (DGP, 2018).

Gleichzeitig können Spurengase auch Auswirkungen auf Ökosysteme haben, beispielsweise durch Schädigung der Vegetation sowie durch Versauerung von Böden und Gewässern (UBA, 2026b).

Vor dem Hintergrund, dass Menschen einen Großteil ihrer Zeit in Innenräumen verbringen, kommt der Innenraumluftqualität eine besondere Bedeutung zu. Dies gilt insbesondere für Schulräume, da sich dort regelmäßig viele Personen über längere Zeit in einem begrenzten Raum aufhalten und verschiedene Untersuchungen Defizite in der Innenraumluftqualität aufgezeigt haben. Ein zentraler Indikator für die Bewertung der Luftqualität in Innenräumen ist das CO₂-Mischungsverhältnis, das bereits seit über 150 Jahren als Maß für die Luftqualität herangezogen wird (UBA, 2008).

Der CO₂-Gehalt eignet sich insbesondere deshalb als Indikator, da er eng mit der Menge ausgeatmeter Luft im Raum zusammenhängt und somit sowohl durch die Anzahl der anwesenden Personen, die Aufenthaltsdauer als auch durch den Luftwechsel beeinflusst wird. Dadurch ermöglicht der CO₂-Gehalt zugleich eine Abschätzung des relativen Infektionsrisikos durch luftgetragene Krankheitserreger. Diese Bedeutung wurde insbesondere im Kontext der COVID-19-Pandemie deutlich (Hartmann et al., 2024).

Nach dem Robert Koch-Institut werden erhöhte CO₂-Werte mit verschiedenen gesundheitlichen Beeinträchtigungen in Verbindung gebracht. Dazu zählen unter anderem Kopfschmerzen, Reizungen der Schleimhäute sowie eine verminderte Leistungs- und Konzentrationsfähigkeit (Hartmann et al., 2024).

Zur Bewertung der Innenraumluftqualität werden Richtwerte herangezogen. Nach Angaben des Umweltbundesamtes gelten CO₂-Mischungsverhältnisse unter 1000 ppm als hygienisch unbedenklich, Werte zwischen 1000 und 2000 ppm als auffällig und Werte über 2000 ppm als hygienisch inakzeptabel (UBA, 2008).

2.3 NDIR-Messprinzip

Zur Überwachung der Mischungsverhältnisse verschiedener infrarotaktiver Spurengase werden häufig nichtdispersive Infrarotsensoren (NDIR) eingesetzt. Aufgrund ihrer vergleichsweise einfachen und kostengünstigen Bauweise finden sie auch in der Messung von CO₂ in Innenräumen Anwendung.

Im Wesentlichen besteht ein NDIR-System aus einer Infrarotstrahlungsquelle, einer gasdurchströmten Messzelle mit definierter optischer Weglänge, einem spektralselektiven Element sowie einem Infrarotdetektor mit nachgeschalteter Auswertelektronik (Wiegleb, 2022). Das zugrunde liegende Messprinzip basiert auf der wellenlängenspezifischen Absorption von Infrarotstrahlung durch Gasmoleküle (Chen & Markham, 2020). Befindet sich das zu untersuchende Gas in der Messzelle, werden entlang des optischen Weges Photonen der von der Infrarotquelle emittierten Strahlung absorbiert. Mit zunehmendem Mischungsverhältnis des Gases nimmt die Anzahl der absorbierten Photonen zu, sodass die am Detektor gemessene Strahlungsintensität abnimmt. Die Abschwächung der Strahlungsintensität hängt neben dem Mischungsverhältnis des Gases auch von der effektiven optischen Weglänge ab und kann näherungsweise durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben werden:

$$I = I_0 \cdot \exp(-kcl) \quad (1)$$

Dabei bezeichnet I_0 die einfallende Strahlungsintensität, I die am Detektor gemessene Intensität, k den wellenlängenabhängigen Extinktionskoeffizienten des Gases, der die Stärke der Absorption beschreibt, c das Mischungsverhältnis des Zielgases und l die effektive optische Weglänge durch die Messzelle (Wiegleb, 2022).

Die Selektivität des Sensors gegenüber einem bestimmten Gas wird durch den Einsatz spektralselektiver Elemente, beispielsweise Interferenzfilter, erreicht. Alternativ können auch die Infrarotstrahlungsquelle oder der Detektor so ausgelegt sein, dass überwiegend der relevante Wellenlängenbereich des Gases erfasst wird. Für die Messung von Kohlendioxid wird dabei typischerweise ein Wellenlängenbereich von 4,26 μm genutzt.

Da die Empfindlichkeit eines NDIR-Sensors gemäß dem Lambert-Beer'schen Gesetz (Gleichung 1) maßgeblich von der effektiven optischen Weglänge abhängt, werden häufig gefaltete optische Strahlengänge eingesetzt (Abbildung 3). Hierbei wird die Infrarotstrahlung mithilfe von Spiegeln mehrfach durch die Messzelle geführt, wodurch sich die effektive optische Weglänge erhöht und gleichzeitig kompakte Bauformen realisieren lassen.

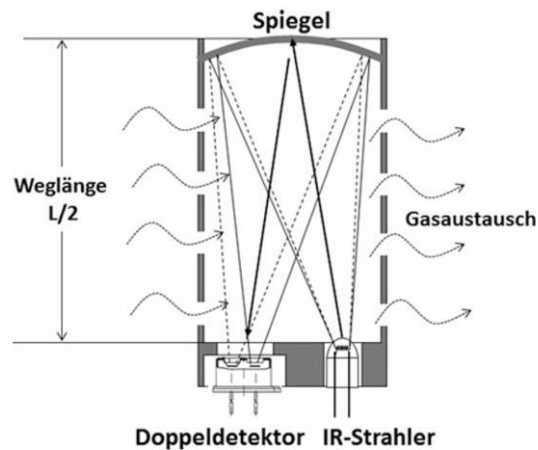


Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer NDIR-Messzelle mit gefaltetem optischen Strahlengang.
Quelle: Wiegleb (2022, S. 394).

Zur Verbesserung der Messstabilität verfügen viele NDIR-Systeme zusätzlich über einen Referenzkanal, der den gleichen spektralen Bereich ohne relevante Absorption erfasst. Durch den Vergleich von Mess- und Referenzsignal lassen sich Störeinflüsse wie Intensitätsschwankungen der Strahlungsquelle oder Alterungseffekte teilweise kompensieren. Der Aufbau eines solchen Zweikanal-NDIR-Sensors ist in Abbildung 4 dargestellt.

Darüber hinaus lassen sich auch mehrere Gase gleichzeitig erfassen. Dies erfolgt durch die Nutzung paralleler optischer Strahlengänge, die jeweils auf unterschiedliche Wellenlängenbereiche abgestimmt sind (Wiegleb, 2022).

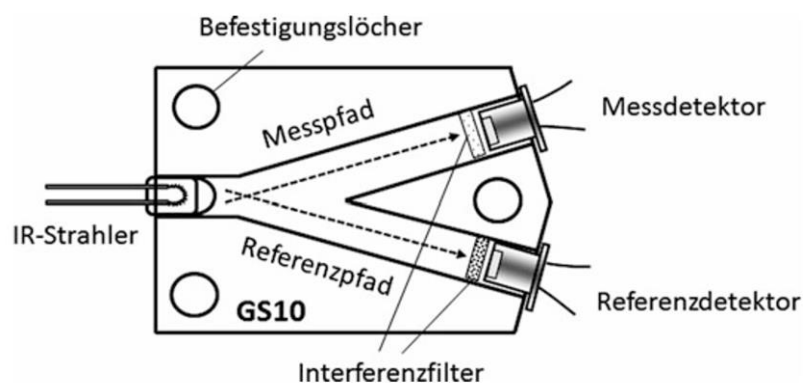


Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines NDIR-Sensors mit Mess- und Referenzdetektor.
Quelle: Wiegleb (2022, S. 394).

3. Spurengasmessungen im Physikunterricht

3.1 Experimentelle Zugänge im Physikunterricht

Experimente stellen eine zentrale Erkenntnismethode der Physik dar und haben sowohl für die wissenschaftliche Arbeitsweise als auch für den Physikunterricht eine zentrale Bedeutung. Sie ermöglichen es, physikalische Phänomene unter kontrollierten und reproduzierbaren Bedingungen zu untersuchen, einzelne Einflussgrößen gezielt zu verändern und auf dieser Grundlage Beobachtungen und Messdaten zu gewinnen. Damit dienen Experimente nicht nur der Erkenntnisgewinnung, sondern werden im Physikunterricht zugleich selbst Gegenstand des Lernens (Girwidz, 2020).

Die hohe Relevanz experimenteller Zugänge zeigt sich auch an ihrem Anteil im Unterricht. Für den Physik-Anfangsunterricht wird angegeben, dass im Mittel etwa zwei Drittel der Unterrichtszeit im Zusammenhang mit Experimenten stehen. Lehrkräfte verwenden damit einen erheblichen Teil ihrer Unterrichtszeit für experimentelle Unterrichtsphasen (Karaböcek & Erb, 2013).

Aus didaktischer Perspektive erfüllen Experimente im Physikunterricht mehrere Funktionen. Sie ermöglichen die Veranschaulichung und Erarbeitung fachlicher Konzepte, indem sie theoretische Zusammenhänge mit beobachtbaren Phänomenen verknüpfen. Gleichzeitig fördern sie naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen und können sowohl auf den Erwerb von Fachwissen als auch auf die Entwicklung fachmethodischer Kompetenzen abzielen, etwa beim Planen, Durchführen und Auswerten von Messungen. Darüber hinaus können Experimente zur Motivation und zum Interesse der Lernenden beitragen (Pusch et al., 2024).

Der Einsatz von Experimenten ist jedoch nicht automatisch lernwirksam. Entscheidend ist vielmehr, wie sie in den Unterricht integriert werden. Eine lernförderliche Wirkung entsteht nach Pusch et al. (2024) insbesondere dann, wenn Experimente durch eine geeignete Hinführung vorbereitet, hinsichtlich ihrer Auswahl, Zugänglichkeit und Gestaltung angemessen umgesetzt sowie die Ergebnisse strukturiert ausgewertet und eingeordnet werden. Dabei spielen die Anknüpfung an das Vorwissen der Lernenden sowie die Einbettung in eine

für sie nachvollziehbare Fragestellung mit Bezug zu bekannten Kontexten oder Alltagsphänomenen eine zentrale Rolle (Pusch et al., 2024; Girwidz, 2020).

Im Physikunterricht lassen sich unterschiedliche Formen des Experimentierens unterscheiden. Während Demonstrationsexperimente eine gezielte Lenkung der Aufmerksamkeit ermöglichen und auch komplexe Versuchsaufbauten zugänglich machen, fördern Schülerexperimente insbesondere die aktive Auseinandersetzung mit physikalischen Fragestellungen. Sie unterstützen die Entwicklung experimenteller Handlungskompetenzen und ermöglichen eigene Erfahrungen im Umgang mit physikalischen Mess- und Arbeitsweisen.

Darüber hinaus kann zwischen qualitativen und quantitativen Experimenten unterschieden werden, wobei erstere auf die unmittelbare Beobachtung von Phänomenen abzielen und letztere eine systematische Datenerfassung und Auswertung erfordern (Girwidz, 2020).

3.2 Spurengase als Gegenstand des Physikunterrichts

Aufbauend auf den zuvor dargestellten Anforderungen an einen lernwirksamen experimentellen Physikunterricht stellt sich die Frage nach geeigneten inhaltlichen Kontexten, in denen experimentelle Zugänge sinnvoll umgesetzt werden können. Die Messung von Spurengasen bietet hierfür geeignete Anknüpfungspunkte und weist einen unmittelbaren Bezug zur Lebenswelt der Lernenden auf, etwa im Zusammenhang mit Lufthygiene in Innenräumen, gesundheitlichen Auswirkungen von Luftschadstoffen sowie gesellschaftlichen Debatten um Klimawandel und Ozonabbau. Viele Spurengase sind vielen Schülerinnen und Schülern aus Alltag oder Medien bekannt. Dadurch lassen sich experimentelle Fragestellungen entwickeln, die an bekannte Alltagsphänomene anknüpfen und somit das Interesse der Lernenden fördern.

Die Bedeutung eines Unterrichtsthemas liegt allerdings nicht ausschließlich in seiner fachlichen Betrachtung. Nach Kircher und Girwidz (2020) ergibt sich der Bildungswert physikalischer Themen auch daraus, dass sie gesellschaftlich-ökologische Zusammenhänge verständlich machen und zur Orientierung in einer durch Technik geprägten Lebenswelt beitragen. Die Behandlung von Spurengasen eröffnet damit auch fächerübergreifende Bezüge und kann ein reflektiertes sowie verantwortungsbewusstes Handeln unterstützen.

Da Spurengase nicht direkt wahrnehmbar sind, ist ihre Untersuchung auf geeignete Messverfahren angewiesen. Erst durch den Einsatz entsprechender Sensoren werden diese physikalischen Größen messbar und damit experimentell zugänglich. Sensoren übernehmen dabei eine doppelte Funktion: Einerseits dienen sie als Messgeräte zur Untersuchung alltagsnaher Fragestellungen, andererseits können sie selbst zum Gegenstand des Unterrichts werden, indem ihr Aufbau und Funktionsprinzip thematisiert werden (Watzka & Girwidz, 2011a). Darüber hinaus erlaubt die experimentelle Erfassung von Spurengasen die Durchführung quantitativer Experimente, bei denen Messdaten erhoben, ausgewertet und interpretiert werden.

3.3 Curriculare Einordnung

Für die schulische Umsetzung stellt sich auch die Frage, inwiefern sich die Behandlung von Spurengasen im Physikunterricht in bestehende curriculare Vorgaben einordnen lässt. Diese basieren auf bundesweit einheitlichen Bildungsstandards, die von der Kultusministerkonferenz (KMK) als übergeordnetem Gremium formuliert wurden und der Vereinheitlichung sowie Überprüfbarkeit von Kompetenzerwartungen dienen (KMK, 2024).

Die konkrete Ausgestaltung dieser Standards erfolgt auf Ebene der Bundesländer, wodurch sich länderspezifische Unterschiede ergeben können. Für Hessen erfolgt diese Ausgestaltung über das Kerncurriculum, das die verbindliche curriculare Grundlage für den Unterricht bildet. Die konkrete Umsetzung erfolgt im Rahmen schulischer Curricula, wobei den Schulen ein gewisser Spielraum zur Schwerpunktsetzung zukommt. Liegt an einer Schule kein Beschluss zu einem Schulcurriculum vor, finden daneben weiterhin die bisherigen Lehrpläne Verwendung (Hessisches Kultusministerium, 2026).

Für die Sekundarstufe I sind im Fach Physik die vier Kompetenzbereiche „Sachkompetenz“, „Erkenntnisgewinnungskompetenz“, „Kommunikationskompetenz“ und „Bewertungskompetenz“ festgelegt (KMK, 2024).

Die experimentelle Untersuchung von Spurengasen lässt sich dabei insbesondere dem Bereich der Sachkompetenz (S2) zuordnen, da hier der Umgang mit Messverfahren, der Aufbau und die Durchführung von Experimenten sowie die Auswertung von Daten im Vordergrund stehen. Darüber hinaus werden zentrale Aspekte der Erkenntnisgewinnungskompetenz

(E2 und E3) angesprochen, etwa durch die Planung und Durchführung von Experimenten sowie durch die Entwicklung und Nutzung geeigneter Modelle zur Beschreibung physikalischer Zusammenhänge. Auch die Auswertung und Interpretation von Messergebnissen sowie die Reflexion des Erkenntnisprozesses stellen wesentliche Elemente dar (KMK, 2024).

Im Bereich der Kommunikationskompetenz ergeben sich Anknüpfungspunkte insbesondere durch die gemeinsame Auswertung von Messergebnissen, die Diskussion physikalischer Sachverhalte sowie die fachsprachlich angemessene Darstellung und Begründung von Ergebnissen. Zudem eröffnet der Kontext von Spurengasen, insbesondere im Zusammenhang mit Luftqualität und Klimawandel, vielfältige Möglichkeiten zur Förderung der Bewertungskompetenz, da hierbei gesellschaftlich relevante Fragestellungen sowie die Auswirkungen physikalischer Erkenntnisse auf Umwelt und Gesellschaft thematisiert werden.

Darüber hinaus wurden im Rahmen der Weiterentwicklung der Bildungsstandards 2024 erstmals verbindliche inhaltliche Aspekte für das Fach Physik festgelegt. Hierzu zählt unter anderem der Bereich der Klimaphysik, insbesondere der Strahlungshaushalt der Erde (Rückstrahlvermögen, mögliche Kippelemente sowie der natürliche und anthropogene Treibhauseffekt), bei dem sich Spurengasmessungen inhaltlich sinnvoll ansetzen lassen (KMK, 2024).

Insgesamt zeigen sich damit vielfältige Anknüpfungspunkte an die in den Bildungsstandards formulierten Kompetenzbereiche, sodass Spurengasmessungen grundsätzlich in verschiedenen Jahrgangsstufen behandelt werden können, wenngleich eine altersgerechte didaktische Reduktion erforderlich ist (siehe dazu Abschnitt 6.1.1 Didaktische Reduktion).

Auch in der gymnasialen Oberstufe lassen sich Spurengasmessungen grundsätzlich den Kompetenzbereichen der Bildungsstandards zuordnen (KMK, 2020). Aufgrund der thematischen Schwerpunktsetzungen und der Ausrichtung auf die Abiturprüfung gestaltet sich eine curriculare Einbindung jedoch eingeschränkter, sodass sich der Einsatz insbesondere für die Sekundarstufe I als besonders geeignet erweist.

Auf Grundlage der von der Kultusministerkonferenz im Jahr 2016 formulierten Strategie „Bildung in der digitalen Welt“ wurde der kompetente Umgang mit digitalen Werkzeugen verstärkt in den Bildungsstandards verankert (KMK, 2017). In diesem Zusammenhang werden auch physikbezogene Aspekte wie die digitale Messwerterfassung sowie die digitale Darstellung und Auswertung von Daten hervorgehoben, die sich am Beispiel von Spurengasmessungen sinnvoll thematisieren lassen.

3.4 Digitale Messwerterfassung

Im Zusammenhang mit der in den Bildungsstandards verankerten Nutzung digitaler Werkzeuge stellen digitale Messwerterfassungssysteme ein zentrales Instrument naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung im Unterricht dar. Sie dienen dazu, physikalische Größen mithilfe von Sensoren zu erfassen, die entstehenden Daten digital zu verarbeiten und die Ergebnisse anschaulich darzustellen. Dabei setzen sie sich grundlegend aus einer Hardware zur Erfassung der Messwerte und einer Software zur Steuerung, Auswertung und Visualisierung zusammen (Lück & Wilhelm, 2023).

Neben dem Erwerb digitaler Kompetenzen kann der Einsatz digitaler Messwerterfassungssysteme den Unterricht entlasten, da „langweilige Routinetätigkeiten wie das Zeichnen von Diagrammen“ entfallen (Lück & Wilhelm, 2023, S. 15). Die gewonnene Zeit kann für die Interpretation und Diskussion der Ergebnisse sowie für weiterführende experimentelle Variationen genutzt werden, sodass physikalische Zusammenhänge stärker in den Fokus rücken. Allerdings besteht die Gefahr einer Überforderung, da die Vielzahl an gleichzeitig erfassten Daten und Darstellungen den Überblick erschweren kann. Daher benötigen insbesondere die Auswertung und Interpretation von Diagrammen ausreichend Zeit und Unterstützung. Das Erstellen von Tabellen und Diagrammen sollte dennoch zumindest zu Beginn exemplarisch auch von Hand erfolgen, um ein grundlegendes Verständnis der damit verbundenen Auswertungsprozesse zu fördern (Lück & Wilhelm, 2023).

Durch digitale Messwerterfassung lassen sich auch neue Themenbereiche erschließen, etwa im Bereich der Spurengasmessung.

Im Vergleich zu konventionellen Messmethoden können deutlich mehr Messwerte erfasst werden. Dies ermöglicht eine anschaulichere Darstellung

von Messverläufen und eine präzisere Auswertung. Durch hohe Abtastraten lassen sich auch sehr schnelle Vorgänge untersuchen, während gleichzeitig Langzeitmessungen ohne permanente Überwachung realisierbar sind (Lück & Wilhelm, 2023).

Lehrkräfte können digitale Messwerterfassung im Unterricht auf unterschiedliche Weise umsetzen. Wilhelm und Bernstein unterscheiden hierbei unter anderem zwischen Stand-alone-Messgeräten, Systemen von Lehrmittelherstellern, mobilen Endgeräten sowie Mikrocontrollern wie der Arduino-Familie (Bernstein & Wilhelm, 2023a).

Welche Form digitaler Messwerterfassung gewählt wird, hängt von technischen und didaktischen Rahmenbedingungen ab. Mikrocontrollerbasierte Ansätze stellen eine flexible und kostengünstige Alternative zu kommerziellen Messwerterfassungssystemen dar, erfordern jedoch zugleich einen erhöhten Einarbeitungsaufwand seitens der Lehrkraft, insbesondere im Hinblick auf grundlegende Programmierkenntnisse (Bernstein & Wilhelm, 2023a).

Gleichzeitig ermöglichen Schnittstellen wie der Excel Data Streamer oder phyphox eine vergleichsweise einfache Übertragung und Visualisierung von Messdaten, wodurch komplexe technische Prozesse für Lernende weitgehend im Hintergrund bleiben, ohne vollständig zu einem Blackbox-System zu werden, da die zugrunde liegende Funktionsweise grundsätzlich nachvollzogen werden kann (Bernstein & Wilhelm, 2023b).

Darüber hinaus eröffnet der Einsatz von Mikrocontrollern die Möglichkeit, grundlegende Aspekte der Programmierung in den Unterricht zu integrieren. Durch niedrigschwellige, blockbasierte Umgebungen können Schülerinnen und Schüler erste Einblicke in algorithmisches Denken gewinnen und einfache Anwendungen selbst umsetzen. Eine vertiefte didaktische Auseinandersetzung mit dem Programmieren ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird genauer auf den Einsatz eines Mikrocontrollers der Arduino-Familie in Verbindung mit dem Excel Data Streamer eingegangen. Eine genauere Erläuterung des Excel Data Streamers erfolgt in Abschnitt 6.4.2.

3.5 Bisherige Ansätze

Im Bereich der Spurengasmessung im Unterricht liegen bereits verschiedene didaktische Ansätze und Unterrichtsmaterialien vor. Diese beziehen sich bislang jedoch überwiegend auf die Messung von Kohlendioxid. Für weitere atmosphärische Spurengase sind unterrichtsbezogene Konzepte bisher nur vereinzelt verfügbar. Da auch das in der vorliegenden Arbeit eingesetzte digitale Messsystem auf die CO₂-Messung ausgerichtet ist, wird im Folgenden ein Überblick über ausgewählte bestehende Ansätze zur Messung von Kohlendioxid mit NDIR-Sensoren im Unterricht gegeben.

In mehreren Veröffentlichungen beschreiben Watzka und Girwidz einen umfangreichen Ansatz zur CO₂-Messung im Physikunterricht mit nichtdispersiven Infrarotsensoren (Watzka & Girwidz, 2011a, 2012a). Neben Erläuterungen zum Messprinzip sowie zu Aufbau und Funktionsweise von NDIR-Sensoren stellen sie auch konkrete Unterrichtsmaterialien bereit, die über die Homepage des Lehrstuhls für Didaktik der Physik der LMU München (LDP) zugänglich sind (LDP, 2026). Ergänzt werden diese Arbeiten durch empirische Untersuchungen, in denen unter anderem der Einfluss von Kontextorientierung, Aufgabenformaten und Präsentationsformen auf Wissenserwerb und Transferleistungen betrachtet wird (Watzka & Girwidz, 2011b, 2012b, 2015).

Im Artikel „Ist die Luft zu schlecht zum Lernen? Nichtdispersive IR-CO₂-Gassensoren im Physikunterricht“ werden zunächst Messprinzip, Aufbau und Funktionsweise eines NDIR-Sensors am Beispiel eines Sensors von MB Systemtechnik erläutert (Watzka & Girwidz, 2011a). Der im Artikel verwendete Sensor von MB Systemtechnik ist in Abbildung 5 dargestellt. Daran anknüpfend werden Experimente zur Veranschaulichung der Funktionsweise des Sensors vorgestellt, unter anderem zur Grundfunktion, zur Rolle der Gasmesszelle, zum thermischen Detektor sowie zum Zusammenwirken von thermischem Detektor und Infrarotstrahlungsquelle (Watzka & Girwidz, 2011a).

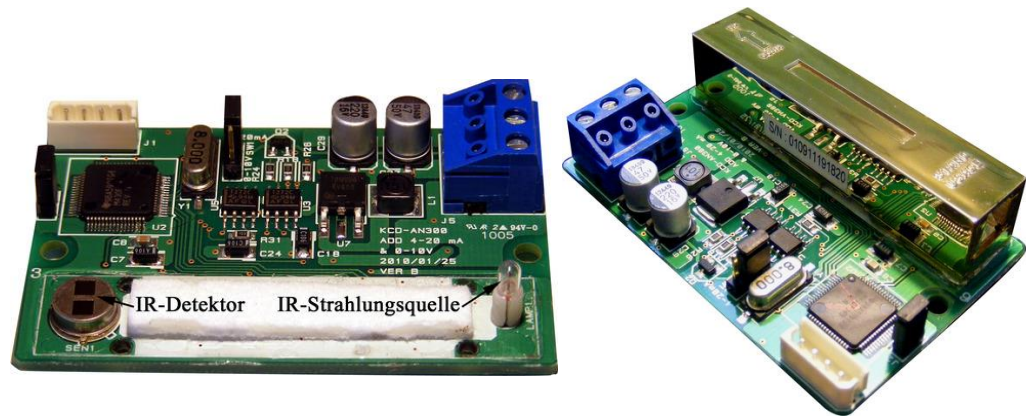


Abbildung 5: Der in Watzka & Girwidz (2011), verwendete Sensor von MB Systemtechnik (CO₂ SEN S 100 2) zur Veranschaulichung der Funktionsweise des NDIR-Messprinzips. Links mit entfernter Gasmesszelle. Quelle: LDP (2026).

Darüber hinaus beschreiben Watzka und Girwidz (2011a) Anwendungskontexte und Modellierungsaufgaben, insbesondere zur Raumluftqualität im Klassenzimmer. Dabei geht es vor allem darum, auf der Grundlage gemessener Ausgangswerte und vereinfachender Annahmen abzuschätzen, auf welchen Wert sich das CO₂-Mischungsverhältnis im Verlauf einer Unterrichtsstunde entwickelt beziehungsweise unter welchen Bedingungen Leitwerte überschritten werden. Als weitere Kontexte nennen Watzka & Girwidz (2011a) unter anderem die Photosynthese von Pflanzen sowie die Untersuchung von CO₂-freisetzenden Alltagsstoffen, etwa Brausetabletten oder Hefe. Darauf aufbauend diskutieren sie Aspekte der Elementarisierung und skizzieren eine vierstündige Unterrichtseinheit mit den Phasen Einführung in den Kontext; Erkundung des Kontextes; Erarbeitung der physikalischen Grundlagen; Anwenden, Messen und Modellieren; Konsequenzen ziehen und Diskussion. Für die unterrichtspraktische Umsetzung wird ein Vernier-Sensor verwendet, der speziell für schulische CO₂-Messungen vorgesehen ist. In der späteren Veröffentlichung „NDIR-CO₂-Gassensoren im Physikunterricht“ wird das zugehörige Material für die Unterrichtspraxis im Hinblick auf den Einsatz dieses Vernier-Sensors näher vorgestellt (Watzka & Girwidz, 2012a). Dazu zählen zwei Arbeitshefte mit Aufgaben und Experimentieranleitungen, eines zur Erforschung CO₂-freisetzender Alltagsmaterialien und eines zum Kontext Raumluftqualität, sowie ergänzende Materialien zum Aufbau und zur Funktionsweise des Sensors (LDP, 2026). Zudem werden Hinweise zur Messwerterfassung mit dem zugehörigen LabQuest-System gegeben (Watzka & Girwidz, 2012a).

Ein weiterer unterrichtsbezogener Ansatz zur CO_2 -Messung mit demselben Vernier-Sensor findet sich bei Mann (2026). Beschrieben wird ein einfach umsetzbares Experiment im Physikunterricht, bei dem nach dem Lüften des Raums die Entwicklung des CO_2 -Gehalts während einer Unterrichtssituation erfasst wird. Das Experiment gliedert sich in eine Vorbereitungsphase mit geringer körperlicher Aktivität, eine aktive Phase mit erhöhter Aktivität sowie eine anschließende Auswertungsphase. In der aktiven Phase steigen die Schülerinnen und Schüler wiederholt auf die Tische, sodass der Einfluss körperlicher Aktivität auf den CO_2 -Anstieg im Raum sichtbar wird. Die erhobenen Messdaten werden anschließend nicht nur qualitativ ausgewertet, sondern auch für konkrete Berechnungen genutzt, etwa zur Stoffwechselleistung, zum Energiebedarf und zum Muskelwirkungsgrad (Mann, 2026).

Der verwendete Vernier-Sensor ist in Abbildung 6 dargestellt und findet auch in weiteren, hier nicht näher dargestellten unterrichtsbezogenen Materialien zur CO_2 -Messung Verwendung.



Abbildung 6: Vernier-NDIR-Sensor zur CO_2 -Messung links sowie beispielhafter Messaufbau im Glasgefäß rechts. Quellen: links Böttcher Datentechnik GmbH (2026), rechts Independence Science (2026.).

Neben dem Vernier-Sensor finden sich weitere von Lernmittelherstellern angebotene Sensorsysteme sowie Unterrichtsmaterialien zur CO₂-Messung im Schulunterricht.

Ein weiteres Beispiel ist die senseBox CO₂-Ampel. Dabei handelt es sich um einen Bausatz auf Grundlage eines Arduino-kompatiblen Mikrocontrollers, der ebenfalls einen NDIR-Sensor zur Erfassung des CO₂-Gehalts verwendet (senseBox, 2026). Die senseBox CO₂-Ampel ist in Abbildung 7 dargestellt. Das System wurde für den Einsatz in der Schule entwickelt und kann durch weitere Sensoren und Komponenten erweitert werden, beispielsweise zu einer Umweltmessstation oder einem Hitzefrei-Alarm (senseBox, 2026). Die Programmierung kann sowohl über die Arduino-Entwicklungsumgebung als auch über eine graphische Programmieroberfläche namens senseBox Blockly erfolgen, sodass der Einsatz auch ohne vertiefte Programmierkenntnisse möglich ist (Witte, 2019). Abbildung 26 im Anhang A.1.1 zeigt beispielhaft die zugehörige graphische Programmieroberfläche. Ergänzend stehen Schritt-für-Schritt-Anleitungen sowie Materialien für Lehrkräfte und Lernende zur Verfügung (senseBox, 2026).

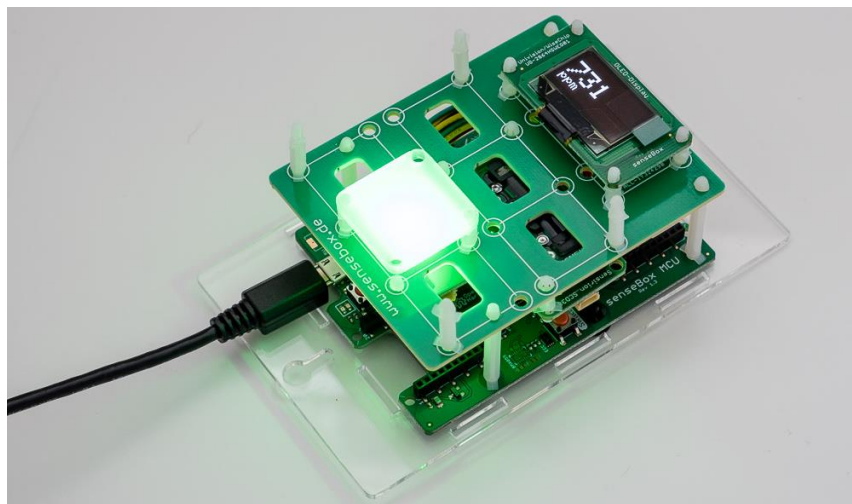


Abbildung 7: Microcontrollerbasierte senseBox CO₂-Ampel. Quelle: senseBox Docs (2024).

Das Lehrkräftenetzwerk Science on Stage hat ebenfalls ein mehrstündiges Unterrichtsprojekt zur CO₂-Messung entwickelt. Im Mittelpunkt steht ein vereinfachtes Modell des Treibhauseffekts, bei dem die Schülerinnen und Schüler mithilfe eines Arduino-basierten Messsystems Temperatur- und CO₂-Daten in zwei Versuchsgefäßen erfassen. Dabei dient ein Gefäß als

Vergleichsgefäß, während in dem anderen durch Brausepulver CO_2 erzeugt wird. Der im Projekt verwendete Versuchsaufbau ist in Abbildung 8 dargestellt. Dazu programmieren sie einen Mikrocontroller, binden Temperatur- und CO_2 -Sensoren ein, zeichnen Messwerte auf und werten diese anschließend aus. Ziel ist es, den Zusammenhang zwischen erhöhtem CO_2 -Mischungsverhältnis und Temperaturanstieg experimentell nachzuvollziehen und mit Fragestellungen zu Treibhauseffekt, globaler Erwärmung und Klimawandel zu verknüpfen (Science on Stage, 2026).

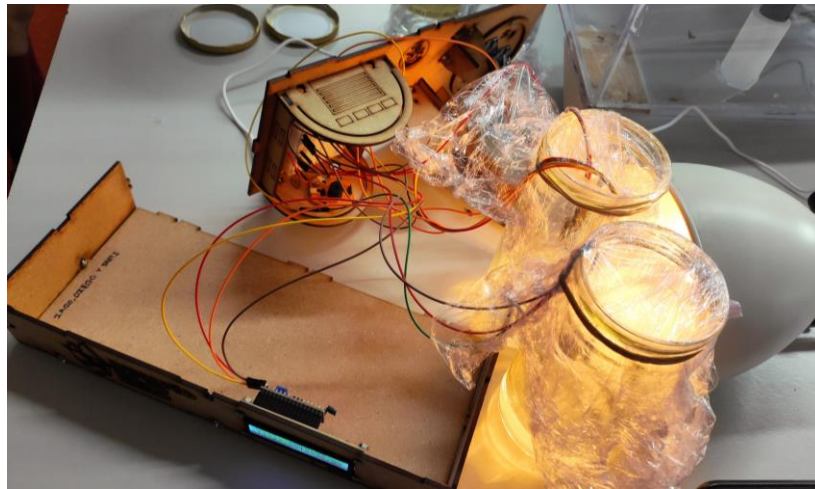


Abbildung 8: Versuchsaufbau des Arduino-basierten Messsystems zur Untersuchung des Treibhauseffekts. Quelle: Science on Stage (2026).

Die kostenlose App phyphox bietet die Möglichkeit, Messdaten eines CO_2 -Sensors direkt mit dem Smartphone auszuwerten. Die erfassten Werte können dazu über Bluetooth oder eine Netzwerkschnittstelle an die App übertragen, dort graphisch dargestellt und weiterverarbeitet werden (Abbildung 9, links). Grundlage ist ein Arduino-kompatibler Bausatz, mit dem CO_2 -Gehalt, Temperatur und Luftfeuchtigkeit erfasst werden können. Der Bausatz umfasst eine Platine mit aufzulötenden Komponenten sowie ein Gehäuse, das als 3D-Druck- oder Lasercut-Version umgesetzt werden kann (Dorsel et al., 2022). Der Bausatz wurde im Rahmen des Projekts Lehrerbildung Aachen an der RWTH Aachen entwickelt und ist rechts in Abbildung 9 dargestellt. Zu dem System liegen umfassende Bau- und Lötanleitungen sowie Anleitungen zu verschiedenen Experimenten vor. Beschrieben werden unter anderem Anwendungen zur Raumluftüberwachung sowie naturwissenschaftliche Experimente, etwa zur Photosynthese und zu CO_2 -freisetzenden Reaktionen (phyphox, 2026).

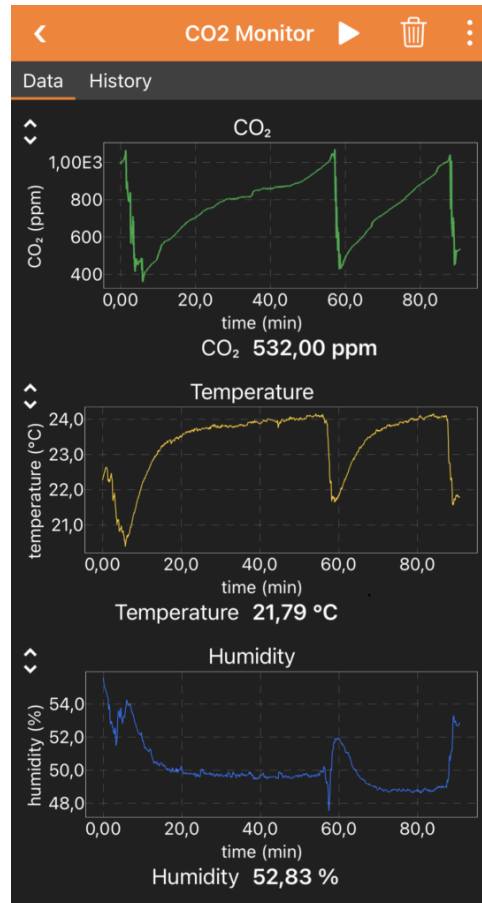


Abbildung 9: Links: App-Ansicht mit graphischer Darstellung von CO₂-Gehalt, Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Messverlauf. Oben rechts: Bausatz mit Lasercut-Gehäuse. Unten rechts: Bausatz mit 3D-Druck-Gehäuse. Quelle: phyphox (2026).

4. CO₂-Messsystem

In diesem Kapitel wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte CO₂-Messsystem vorgestellt, das die technische Grundlage für die spätere unterrichtliche Umsetzung bildet. Dafür werden zunächst der CO₂-Sensor sowie die weiteren verwendeten Komponenten beschrieben. Anschließend wird erläutert, wie diese miteinander verschaltet und programmiert wurden.

4.1 CO₂-Sensor

Die zentrale Komponente des CO₂-Messsystems ist das K30-Sensormodul der Firma Senseair. Das Sensormodul basiert auf dem zuvor beschriebenen NDIR-Messprinzip (Abschnitt 2.3) und ist in Abbildung 10 dargestellt.

Zur Vergrößerung der effektiven optischen Weglänge wird im K30 ein gefalteter optischer Strahlengang (Waveguide-Technologie, vgl. Abbildung 3) verwendet, sodass trotz kompakter Bauform eine hohe Messempfindlichkeit erreicht wird (Paramair GmbH, 2025a).

Der K30-Sensor erfasst CO₂-Mischungsverhältnisse in einem Messbereich von 0 bis 5000 ppm bei einer Auflösung von 1 ppm. Die vom Hersteller angegebene Messgenauigkeit beträgt $\pm 30 \text{ ppm} \pm 3 \% \text{ des Messwerts}$ und wird nach einer Aufwärmzeit von 1 min erreicht.



Abbildung 10: Senseair K30 FR 2Hz (ABC=OFF).

In der verwendeten Fast-Response-Variante (FR) erfolgt die Messwerterfassung mit einer Abtastrate von 2 Hz, sodass auch zeitlich schnelle Änderungen des CO₂-Mischungsverhältnisses erfasst werden können. Für den hier relevanten diffusionsbasierten Betrieb wird eine Ansprechzeit T_{90} von etwa 20 s angegeben. Die Größe T_{90} bezeichnet dabei die Zeit, nach der 90 % des Endwerts erreicht sind (Paramair GmbH, 2025b).

Für die Einbindung in das CO₂-Messsystem sind darüber hinaus die elektrischen Betriebs- und Schnittstelleneigenschaften des K30 relevant. Das Sensormodul kann mit einer Versorgungsspannung von 4,5 V bis 14 V DC betrieben werden, wobei für einen stabilen Betrieb ein Bereich von 5 V bis 9 V empfohlen wird. Die Stromaufnahme beträgt laut Hersteller im Mittel etwa 70 mA, kurzzeitig können Stromspitzen von bis zu 600 mA auftreten.

Die Messwerte stehen sowohl über analoge Spannungsausgänge als auch über die serielle UART-Schnittstelle zur Verfügung. Zusätzlich besitzt das Modul weitere Ein- und Ausgänge, die unter anderem für Kalibrierung, Statusausgabe und Konfiguration genutzt werden können. Eine Übersicht der verfügbaren Anschlüsse ist in Abbildung 11 dargestellt, da die Pins auf der Sensorplatine selbst nicht beschriftet sind. (Paramair GmbH, 2025b).

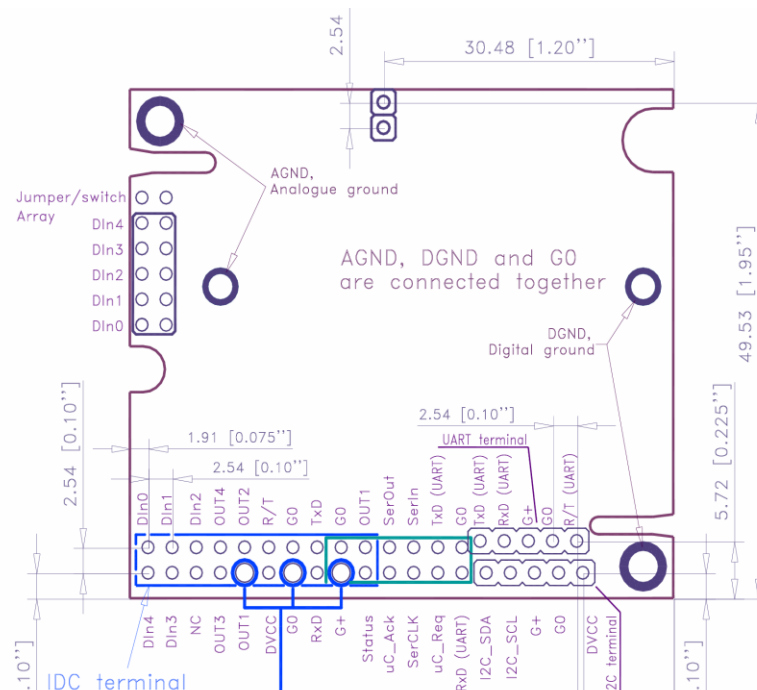


Abbildung 11: Übersicht der Leiterplatte des K30-Sensormoduls mit beschrifteten Anschlüssen und Schnittstellen. Quelle: (Paramair GmbH, 2025b, S.5).

Das verwendete K30-Sensormodul verfügt über keinen separaten Referenzkanal (vgl. Abbildung 4). Stattdessen erfolgt die Referenzierung entweder durch eine manuelle Kalibrierung mit bekannten Referenzgasen oder durch eine softwarebasierte automatische Baseline-Korrektur (ABC) (Senseair, 2024). Dem ABC-Algorithmus liegt die Annahme zugrunde, dass der Sensor in regelmäßigen Abständen Frischluftbedingungen mit einem CO₂-Gehalt von etwa 400 ppm ausgesetzt ist. Auf dieser Grundlage werden langsame Langzeitdrifts korrigiert (Paramair GmbH, 2025b).

Zusätzlich besitzt das K30-Sensormodul eine hardwareseitige Kalibrierfunktion. Ausgelöst werden kann sie über die in Abbildung 11 mit DIN 1 und DIN 2 gekennzeichneten Pinpaare, indem zwischen den jeweiligen Kontakten kurzzeitig ein elektrischer Kurzschluss hergestellt wird. Über DIN 1 wird eine Single-Point-Kalibrierung aktiviert. Dabei wird der aktuell gemessene CO₂-Wert intern auf einen festgelegten Referenzwert gesetzt, der werkseitig 400 ppm beträgt. Dieser Referenzwert kann über die serielle Schnittstelle angepasst werden. Über DIN 2 lässt sich entsprechend eine Zero-Kalibrierung auslösen, bei der eine Referenzierung auf 0 ppm erfolgt (Paramair GmbH, 2025b).

Ergänzend konnte in Tybussek (2026) mit demselben Sensormodell gezeigt werden, dass eine extern durchgeführte Vierpunktkalibrierung auf Basis bekannter Referenzgase die Genauigkeit der ausgegebenen CO₂-Messwerte deutlich verbessern kann.

4.2 Weitere Komponenten

Das CO₂-Messsystem umfasst außerdem ein Arduino-Uno-kompatibles Mikrocontrollerboard vom Typ Elegoo Uno R3. Dieses bildet die zentrale Steuereinheit des Messsystems und ermöglicht die Anbindung der einzelnen Komponenten. Das Board kann entweder über eine USB-Verbindung oder über eine externe Stromversorgung mit einer Spannung von 6 bis 20 V betrieben werden. Es verfügt über verschiedene Ein- und Ausgänge, die bei Arduino-Boards als Pins bezeichnet werden. Eine beschriftete Übersicht der Anschlüsse ist in Abbildung 14 dargestellt (ELEGOO, 2026).

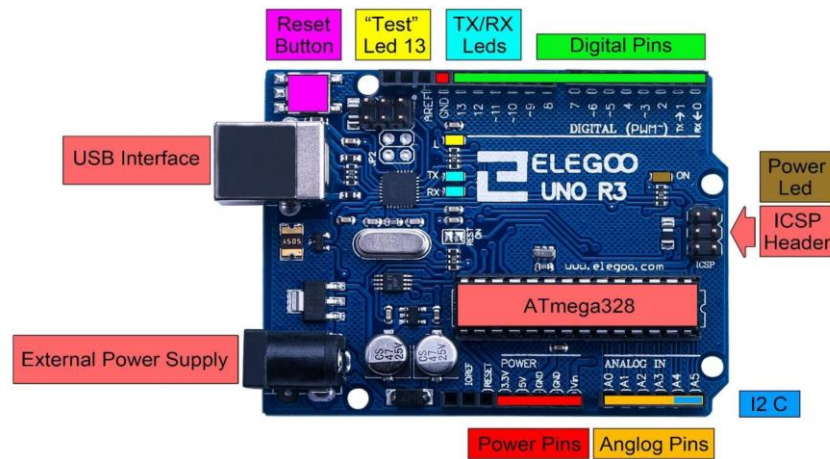


Abbildung 14: Übersicht der Anschlüsse des Elegoo Uno R3. Quelle: (ELEGOO, 2026, S.2).

Die Ausgabe der Messwerte erfolgt über ein LCD-Display mit I²C-Schnittstelle, das in Abbildung 13 gezeigt ist. Zur Verteilung der Versorgungsspannung auf Sensor und Display wird ein Mini-Breadboard verwendet, das in Abbildung 12 rechts neben dem Mikrocontrollerboard abgebildet ist.



Abbildung 13: LCD-Display mit I²C-Schnittstelle.

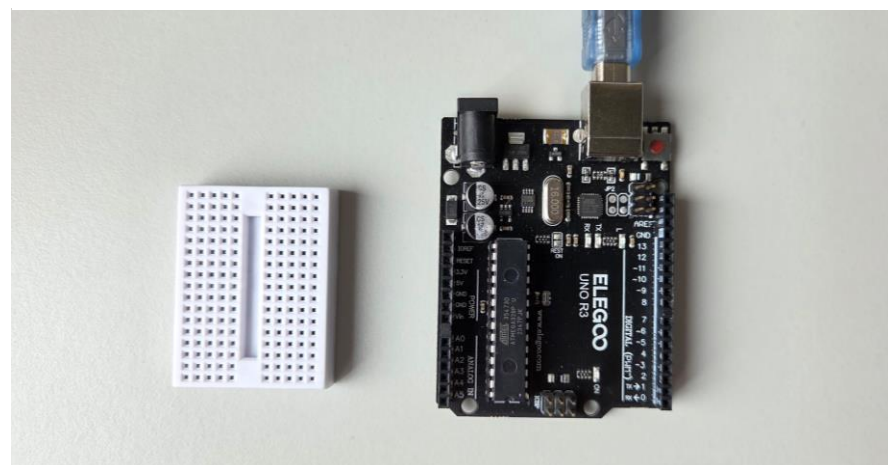


Abbildung 12: Mikrocontrollerboard vom Typ Elegoo Uno R3 (rechts) und Mini-Breadboard (links).

4.3 Verschaltung und Programmierung

Die einzelnen Komponenten des Messsystems werden über Jumperleitungen mit dem Mikrocontrollerboard verbunden. Der K30-Sensor ist dabei über die serielle UART-Schnittstelle mit dem Mikrocontrollerboard verbunden und nutzt dazu die digitalen Pins RX und TX, wobei RX dem Empfang und TX dem Senden serieller Daten dient. Die Verbindung zwischen K30-Sensor und Mikrocontrollerboard ist in Tabelle 1 dargestellt. Eine Übersicht der Anschlüsse und Schnittstellen des Sensors wurde bereits in Abschnitt 4.1 gezeigt (Abbildung 11).

Das LCD-Display wird über den I²C-Bus angeschlossen. Beim verwendeten Mikrocontrollerboard kann die Verschaltung über die I²C-Leitungen sowohl über die in Abbildung 14 dargestellten Pins A4 und A5 als auch über die separat beschrifteten Anschlüsse SDA und SCL neben dem Reset-Button erfolgen. Für den hier realisierten Aufbau werden die Anschlüsse SDA und SCL verwendet, da die Zuordnung der Leitungen dadurch übersichtlicher ist, und die spätere unterrichtliche Darstellung in Abschnitt 6.2.2 erleichtert. Die zugehörige Pinbelegung ist in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 1: Elektrische Verschaltung des K30-Sensors mit dem Mikrocontrollerboard.

K30-Sensor	Uno R3
G+	5V
G0	GND
TxD	D8
RxD	D9

Tabelle 2: Elektrische Verschaltung des LCD-Displays mit dem Mikrocontrollerboard.

LCD-Display	Uno R3
VCC	5V
GND	GND
SDA	SDA
SCL	SCL

Die Spannungsversorgung von Sensor und Display erfolgt über die 5 V-Leitung des Mikrocontrollerboards, die mithilfe des Mini-Breadboards und entsprechender Jumperleitungen auf beide Komponenten verteilt wird. Die Masseanschlüsse werden jeweils mit den GND-Pins des Mikrocontrollerboards verbunden. Da sich ein Batteriebetrieb im Test nicht als ausreichend stabil erwies, erfolgt die Versorgung des Systems über den USB-B-Anschluss, entweder über die Verbindung zu einem PC oder über ein geeignetes externes Netzteil.

Der vollständig verschaltete Aufbau ist in Abbildung 15 dargestellt, weitere Detailaufnahmen der Verkabelung finden sich im Anhang A.1.2.

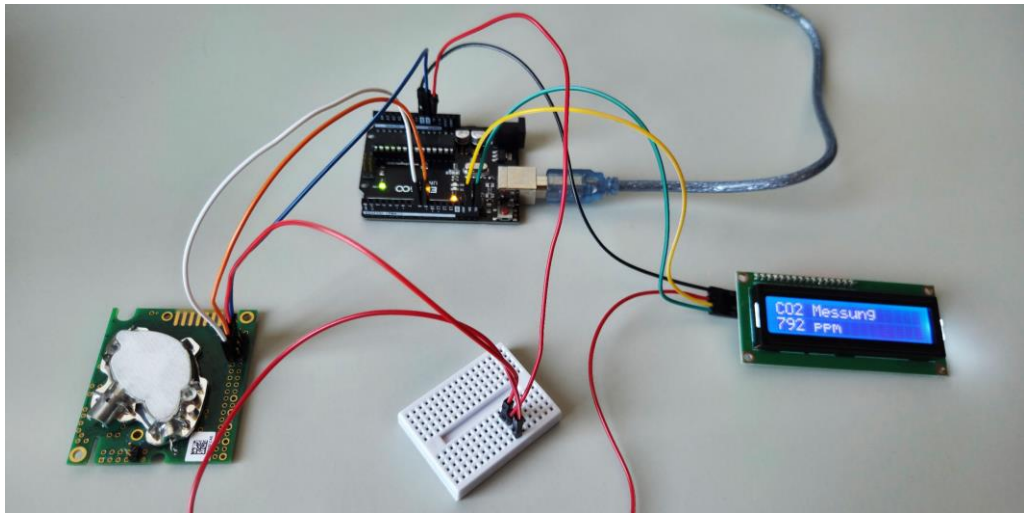


Abbildung 15: Vollständig aufgebautes und verschaltetes CO₂-Messsystem mit K30-Sensormodul, Mikrocontrollerboard, LCD-Display und Mini-Breadboard.

Die Programmierung des Messsystems erfolgt über die Arduino-Entwicklungsumgebung. Die dort erstellten Programme werden als Sketches bezeichnet. Der für das CO₂-Messsystem verwendete Sketch ist im Anhang A.2 beigelegt. Zur Ansteuerung des Sensors und des Displays werden die Bibliotheken `SoftwareSerial` und `LiquidCrystal_I2C` verwendet. Der K30-Sensor wird über eine serielle Schnittstelle mit einer Baudrate von 9600 Baud ausgelesen. Die Erfassung des CO₂-Gehalts erfolgt mit einem Messintervall von einer Sekunde. Bei erfolgreicher Messung wird der jeweilige Wert sowohl auf dem LCD-Display als auch im Serial-Monitor der Arduino-Entwicklungsumgebung ausgegeben. Bleibt eine gültige Antwort des Sensors aus, erscheint auf dem Display die Meldung „Messfehler“, während im Serial Monitor „NaN“ ausgegeben wird. Nach der Initialisierung des Systems

erscheint zunächst die Statusmeldung „Starte K30 CO₂-Messung“ im Serial-Monitor, auf dem LCD-Display wird „Start...“ angezeigt. Zusätzlich ist ein Watchdog-Timer implementiert, der das Mikrocontrollerboard automatisch neu startet, falls das Programm nicht mehr ordnungsgemäß ausgeführt wird. Dadurch wird die Betriebssicherheit des Messsystems erhöht. Die Ausgabe im Serial-Monitor erfolgt numerisch, um eine Weiterverarbeitung der Messwerte mit dem Excel Data Streamer zu ermöglichen. Darauf wird in Abschnitt 6.4.2 näher eingegangen.

5. Erprobung des Messsystems

5.1 Zielsetzung und Rahmenbedingungen

Im Rahmen eines Schülerpraktikums bot sich die Möglichkeit, zentrale Elemente des entwickelten Messkonzepts mit Schülern zu erproben. Im Zentrum standen dabei insbesondere der Aufbau und die Verkabelung der Hardware, die Programmierung des Messsystems sowie die Auswertung der Messdaten. Darüber hinaus sollte beobachtet werden, an welchen Stellen Verständnisschwierigkeiten auftreten, welcher Unterstützungsbedarf sich zeigt und welche Anpassungen sich daraus für die spätere unterrichtliche Umsetzung ableiten lassen. Die Erprobung hatte damit explorativen Charakter und diente nicht einer systematischen Evaluation. Sie fand am Institut für Atmosphäre und Umwelt der Goethe-Universität Frankfurt statt und erfolgte somit nicht in einem regulären schulischen Unterrichtssetting. An der Durchführung nahmen zwei Schüler eines Gymnasiums aus den Jahrgangsstufen 9 und 11 teil. Beide verfügten bereits über grundlegende Programmiererfahrungen, insbesondere im Umgang mit Python. Der Schüler aus Jahrgangsstufe 9 brachte zudem bereits Erfahrungen mit eigenen Arduino-Projekten mit.

5.2 Durchführung der Erprobung

Zu Beginn der Erprobung wurden den beiden Schülern der geplante Ablauf sowie die zur Verfügung stehenden Bauteile und Arbeitsmaterialien vorgestellt. Für beide stand ein eigener Arbeitsplatz mit Laptop und Messaufbau bereit. Der für die Erprobung verwendete Messaufbau wich von dem in Kapitel 4 beschriebenen Messsystem ab und entsprach dem in Tybussek (2026) dokumentierten Aufbau. Dieser umfasste jeweils ein Arduino-Uno-kompatibles Mikrocontrollerboard, das bereits vorgestellte Senseair-K30-Sensormodul zur Erfassung des CO₂-Mischungsverhältnisses sowie einen Sensor zur Messung von Druck, Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit. Hierfür kam der BME280-Sensor von Bosch Sensortec auf einer vorbeschalteten Adafruit-Trägerplatine zum Einsatz. Zur Speicherung der Messdaten auf einer SD-Karte wurden die Mikrocontrollerboards um ein Data-Logging-Shield mit integrierter Echtzeituhr erweitert. Ergänzt wurde der Aufbau außerdem durch ein Breadboard und die für die Verkabelung erforderlichen Jumperleitungen. Das

in Kapitel 4 beschriebene Display zur direkten Anzeige der Messwerte war in diesem Aufbau noch nicht integriert. Der für die Erprobung verwendete Messaufbau ist in Abbildung 16 dargestellt.

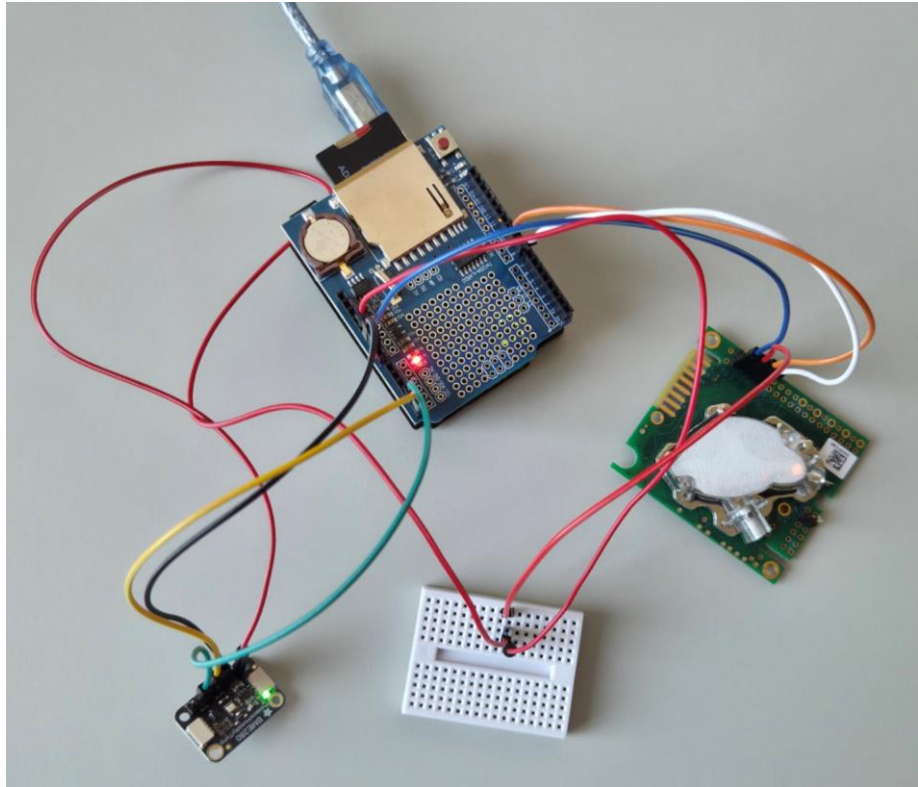


Abbildung 16: Messaufbau der Erprobung, bestehend aus einem Arduino-kompatiblen Mikrocontrollerboard mit Data-Logging-Shield sowie einem Senseair-K30-Sensor und einem BME280-Sensor.

Im Anschluss wurde auf den Laptops zunächst die Arduino-Entwicklungsumgebung eingerichtet. Für Aufbau und Verschaltung des Messsystems wurden den Schülern unterstützende Materialien bereitgestellt, die in Anhang A.4 aufgeführt sind. Hierzu gehörten unter anderem die in Abbildung 11 bereits gezeigte Übersicht der Leiterplatte des K30-Sensormoduls sowie die in Tabelle 3 dargestellte Übersicht der Verschaltung.

Tabelle 3: Elektrische Verschaltung des zu erprobenden Messsystems. Quelle: (Tybussek, 2026, S. 12)

K 30	Uno R3	BME280	Uno R3
G+	5V	VIN	5V
G0	GND	GND	GND
TxD	D8	SCK	A5
RxD	D9	SDI	A4

Nach Abschluss der Verkabelung erhielten die Schüler einen als Lückentext vorbereiteten Sketch des Messsystems (Anhang A.3). Die zu ergänzenden Stellen betrafen unter anderem die Zuordnung einzelner Pins, das Messintervall sowie einfache Bedingungen für Status- und Fehlermeldungen. Eine entsprechende Lücke findet sich beispielsweise in Codezeile 26.

Darüber hinaus bekamen die Schüler ein Arbeitsblatt mit Verständnisfragen zum Code sowie zum Mess- und Datenverständnis, um die inhaltliche Auseinandersetzung mit Aufbau, Funktionsweise und Auswertung des Messsystems zu unterstützen. Dazu gehörten beispielsweise Fragen, welche Sensoren im Programm verwendet werden und was sie messen, warum bei einem Fehler „NaN“ und nicht „0“ ausgegeben wird, weshalb UTC-Zeit verwendet wird oder welche Messgrößen sich bei einer Fensteröffnung verändern (Anhang A.4).

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme des Messsystems wurden erste Messungen unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt, unter anderem bei geöffnetem Fenster. Während der Messung wurden die erfassten Werte live im Serial-Monitor der Arduino-Entwicklungsumgebung angezeigt. Zusätzlich wurden die Messdaten automatisch auf der SD-Karte gespeichert und im Anschluss ausgewertet. Für die Auswertung standen Leitfäden sowohl für die Arbeit mit Excel als auch mit Python zur Verfügung. Diese reichten von der Sichtung der Rohdaten über die Diagrammerstellung bis hin zur Interpretation und einfachen statistischen Auswertung. Die Erprobung erstreckte sich über einen Vormittag und den frühen Nachmittag. Die beiden Schüler arbeiteten dabei über weite Strecken selbstständig. Der Arbeitsprozess wurde jedoch kontinuierlich begleitet, um bei Rückfragen und technischen oder inhaltlichen Schwierigkeiten gezielte Hilfestellungen geben zu können.

5.3 Beobachtungen und Schlussfolgerungen

Die Erprobung zeigte zunächst, dass die beiden Schüler den Aufbau des Messsystems sowie die Bearbeitung des vorbereiteten Lückentext-Sketches weitgehend selbstständig bewältigen konnten. Der Sketch erwies sich für beide als gut zugänglich. Auch die ergänzenden Verständnisfragen wurden kaum benötigt, da zentrale Zusammenhänge des Codes im Gespräch schnell nachvollzogen werden konnten. Insgesamt zeigte sich ein hohes fachliches

Interesse an dem Messsystem und dessen Programmierung. Auch die Auswertung der Messdaten stieß auf großes Interesse. Dies zeigte sich insbesondere in den Nachfragen der Schüler, ihrer Bereitschaft, länger als ursprünglich vorgesehen weiterzuarbeiten, sowie in ihrem positiven Feedback.

Insbesondere die Arbeit mit Python gelang weitgehend problemlos, wobei der Schüler aus Jahrgangsstufe 9 die Auswertung ohne nennenswerte Unterstützung umsetzen konnte.

Schwierigkeiten traten vor allem im Bereich der Hardware auf. So erwies sich die in Tabelle 3 dargestellte Verschaltung zunächst als nicht ausreichend selbsterklärend. Darüber hinaus war die Beschriftung der Anschlüsse des K30-Sensormoduls auf dem ausgedruckten Material nur schwer erkennbar. Erst mithilfe einer vergrößerten digitalen Darstellung auf dem Laptop ließ sich die Verkabelung nachvollziehen. Eine zusätzliche Verzögerung entstand durch ein nicht ausreichend leistungsfähiges USB-Kabel. Dadurch wurde das Mikrocontrollerboard zwar grundsätzlich betrieben, der K30-Sensor jedoch nicht zuverlässig versorgt. Die Ursache ließ sich erst nach längerer Fehlersuche eingrenzen, die zusätzlich durch eine uneinheitliche Farbcodierung der verwendeten Kabel erschwert wurde.

Im Bereich der Datenauswertung zeigte sich außerdem, dass die Auswertung der auf der SD-Karte gespeicherten Rohdaten in Excel weniger gut funktionierte als die Arbeit mit Python. Während Python eine vergleichsweise direkte Weiterverarbeitung der Messdaten ermöglichte, erwies sich die Excel-Auswertung in dieser Erprobung vor allem bei der Strukturierung der Daten und der Erstellung geeigneter Diagramme als weniger intuitiv. Auch die in der Arduino-Entwicklungsumgebung verfügbare graphische Darstellung der Messwerte erwies sich nur als eingeschränkt hilfreich, da sie zwar eine unmittelbare Beobachtung während der Messung ermöglichte, für die übersichtliche Darstellung und Auswertung mehrerer Messgrößen jedoch nicht geeignet war.

Aus diesen Beobachtungen lassen sich mehrere Schlussfolgerungen für die spätere Unterrichtskonzeption ableiten. Erstens sollten die Materialien zur Verkabelung, insbesondere Abbildungen und Tabellen, visuell deutlicher und größer aufbereitet werden. Zweitens erscheint eine Reduktion der Komplexität des Messaufbaus sinnvoll. Die Einbindung des BME280-Sensors erwies sich

zwar inhaltlich als interessant, erhöhte jedoch insbesondere bei der Auswertung die Komplexität des Messsystems, sodass für das in Kapitel 4 beschriebene Messsystem bewusst auf diese Erweiterung verzichtet wurde.

Drittens erscheint es sinnvoll, die Messwertanzeige und Auswertung für den Unterricht stärker zu strukturieren, damit Messwerte nicht nur erfasst, sondern auch übersichtlich dargestellt und weiterverarbeitet werden können.

Viertens zeigte sich, dass sowohl die weitgehend problemlose Bearbeitung des Lückentext-Sketches als auch die Arbeit mit Python stark vom technischen Vorwissen der beiden Schüler geprägt waren und sich nicht ohne Weiteres auf eine reguläre Schulklasse übertragen lassen.

Zu berücksichtigen ist außerdem, dass die in der Erprobung eingesetzten Materialien und Hilfen auf eine enge Begleitung ausgelegt waren und in der vorliegenden Form nicht ohne weitere Strukturierung auf Unterrichtssituationen mit größeren Lerngruppen übertragen werden können.

Die Ergebnisse sind daher nicht als repräsentativ zu verstehen, liefern jedoch wertvolle erste Hinweise auf technische Schwierigkeiten, den notwendigen Unterstützungsbedarf sowie die Anforderungen an die spätere Gestaltung von Materialien zur Durchführung und Auswertung.

6. Das CO₂-Messsystem im Physikunterricht

Aufbauend auf den in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten fachlichen, fachdidaktischen und technischen Grundlagen wird im Folgenden aufgezeigt, wie das in Kapitel 4 vorgestellte CO₂-Messsystem im Physikunterricht verwendet werden kann. Im Mittelpunkt steht dabei nicht die Entwicklung einer vollständig ausgearbeiteten Unterrichtseinheit, sondern eine exemplarische Darstellung der unterrichtlichen Einbindung sowie der experimentellen Arbeit mit dem Messsystem. Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei der Darstellung und Auswertung der Messdaten sowie der Frage, wie die mit dem Sensor verbundenen fachlichen und technischen Aspekte für Schülerinnen und Schüler zugänglich gemacht werden können.

6.1 Didaktische Reduktion und Lernziele

6.1.1 Didaktische Reduktion

Für den Einsatz des in Kapitel 4 vorgestellten CO₂-Messsystems in der Sekundarstufe I ist eine didaktische Reduktion erforderlich. Sowohl das in Abschnitt 2.3 erläuterte NDIR-Messprinzip als auch der technische Aufbau des Messsystems umfassen fachliche und technische Zusammenhänge, die für Schülerinnen und Schüler der betreffenden Jahrgangsstufen nicht unmittelbar zugänglich sind. Es ist daher zu bestimmen, welche Aspekte für das Verständnis des Messsystems zentral sind und welche Inhalte in vereinfachter Form behandelt oder ausgeklammert werden können.

Je nach unterrichtlicher Zielsetzung kann die didaktische Reduktion unterschiedlich gewichtet werden. Ein gemeinsamer Kern besteht darin, CO₂ als messbares Spurengas mithilfe eines Sensors experimentell zu erfassen, die dabei gewonnenen Messwerte digital darzustellen und in einem fachlichen oder alltagsbezogenen Zusammenhang zu deuten. Für die weitere Darstellung lassen sich drei Schwerpunktsetzungen unterscheiden:

- die Thematisierung des Messsystems selbst, seiner Systemkomponenten und des zugrunde liegenden NDIR-Messprinzips (Abschnitt 6.2),

- der Einsatz des Sensors zur Untersuchung fachlicher oder alltagsbezogener Fragestellungen (Abschnitt 6.3),
- die digitale Darstellung und Auswertung der Messwerte (Abschnitt 6.4).

Wird der Sensor vor allem als Messinstrument eingesetzt, steht seine Nutzung zur Untersuchung fachlicher oder alltagsbezogener Fragestellungen im Vordergrund. Das Messsystem dient in diesem Fall dazu, CO₂-Mischungsverhältnisse unter unterschiedlichen Bedingungen experimentell zu erfassen und dadurch eine nicht unmittelbar wahrnehmbare physikalische Größe in Form von Messwerten sichtbar zu machen. Aufbau und Funktionsweise des Systems können dabei zunächst gegenüber seiner Anwendung zurücktreten.

Wird das Messsystem selbst stärker thematisiert, erscheint es für die Sekundarstufe I sinnvoll, den Fokus zunächst auf die Funktion der einzelnen Komponenten innerhalb der Messkette zu legen. Thematisiert werden können insbesondere die Rolle des K30-Sensors bei der Erfassung des CO₂-Mischungsverhältnisses, die Funktion des Arduino-Mikrocontrollers als zentrale Steuereinheit sowie eine grundlegende, funktionsbezogene Verschaltung der Bauteile. Komplexe technische Aspekte wie Kalibrierung und detaillierte Schnittstellenkommunikation können dabei ausgeklammert werden. Die Programmierung selbst wird dabei nicht zum Gegenstand des Unterrichts gemacht.

Auch Aufbau und Messprinzip des Sensors können in der Sekundarstufe I nur in didaktisch reduzierter Form thematisiert werden. Für eine erste unterrichtliche Annäherung erscheint es sinnvoll, das Messprinzip auf die Grundvorstellung zu beschränken, dass CO₂ in eine Messzelle gelangt, dort Anteile der Infrarotstrahlung absorbiert und auf dieser Grundlage ein Messsignal entsteht. Weiterführende Zusammenhänge, etwa das Lambert-Beersche Gesetz oder technische Details der Signalentstehung und -verarbeitung, können dabei ausgeklammert oder nur in vereinfachter Form angesprochen werden. Hinzu kommt, dass der innere Aufbau des K30-Sensors für Lernende nicht unmittelbar anschaulich zugänglich ist, weshalb sich das Messprinzip im Unterricht nur eingeschränkt über den konkreten Aufbau dieses Sensors erschließen lässt.

6.1.2 Lernziele

Aus dieser didaktischen Reduktion ergeben sich allgemeine Lernziele für den Einsatz des CO₂-Messsystems im Unterricht. Diese knüpfen an die in Abschnitt 3.3 herausgearbeiteten Kompetenzbereiche an und werden entsprechend den zuvor skizzierten Schwerpunktsetzungen unterschiedlich akzentuiert. Übergreifend können die Schülerinnen und Schüler:

- 1) erläutern, dass CO₂ als atmosphärisches Spurengas mithilfe eines Sensors experimentell erfasst werden kann.
- 2) das CO₂-Messsystem zur Untersuchung einfacher fachlicher oder alltagsbezogener Fragestellungen einsetzen.
- 3) die bei der Messung gewonnenen Daten sachgerecht darstellen und auswerten.
- 4) Zusammenhänge zwischen Messverläufen und äußeren Bedingungen herstellen.
- 5) Messverläufe und Messergebnisse im Hinblick auf die zugrunde liegende Fragestellung deuten und daraus begründete Aussagen ableiten.
- 6) die Aussagekraft digital erhobener Messdaten sowie mögliche Grenzen und Unsicherheiten der Messung kritisch reflektieren.

Darüber hinaus können je nach Schwerpunktsetzung weitere Lernziele in den Vordergrund treten:

- a) Wird das Messsystem selbst stärker thematisiert, können die Schülerinnen und Schüler:
 - die Funktion zentraler Komponenten des Messsystems, insbesondere des K30-Sensors, des Arduino-Mikrocontrollers und weiterer Bauteile, in vereinfachter Form erläutern.
 - die grundlegende Verschaltung der Bauteile nachvollziehen und das Messsystem angeleitet aufbauen.
 - das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten von der Erfassung des CO₂-Gehalts bis zur Ausgabe der Messwerte erklären.

- b) Wird das Messprinzip stärker in den Blick genommen, können die Schülerinnen und Schüler:
- das NDIR-Messprinzip in seinen Grundzügen erläutern.
 - erklären, wie aus der Wechselwirkung von CO₂ mit Infrarotstrahlung in der Messzelle ein Messsignal entsteht.
 - den qualitativen Zusammenhang zwischen Signaländerung und CO₂-Mischungsverhältnis beschreiben.
- c) Liegt ein Schwerpunkt auf der digitalen Darstellung und Auswertung, können die Schülerinnen und Schüler:
- Messdaten manuell, etwa durch das Ablesen am LCD-Display, tabellarisch erfassen und graphisch darstellen.
 - Messdaten mithilfe des Excel Data Streamers digital visualisieren und auswerten.
 - einfache statistische Kenngrößen, etwa Mittelwert oder Standardabweichung, bestimmen und zur Beschreibung von Messverläufen nutzen.

Die konkrete Ausgestaltung dieser Lernziele hängt somit von der jeweiligen unterrichtlichen Schwerpunktsetzung sowie von der Lerngruppe und deren Vorwissen ab.

6.2 Einführung des Messsystems in den Unterricht

6.2.1 Inhaltsfelder und thematische Einbettung

Die Einbettung des CO₂-Messsystems in den Unterricht kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Aufbauend auf der in Abschnitt 3.3 vorgenommenen curricularen Einordnung werden im Folgenden die Inhaltsfelder des hessischen Kerncurriculums für die Sekundarstufe I am Gymnasium als Bezugspunkt herangezogen (Hessisches Kultusministerium, 2024). Anhand dieser Inhaltsfelder lassen sich mögliche thematische Anknüpfungen und unterrichtliche Zugänge zum Messsystem skizzieren. Die konkrete Zuordnung zu einzelnen Jahrgangsstufen bleibt dabei den jeweiligen Schulcurricula vorbehalten.

Besonders naheliegend ist das Inhaltsfeld „Haus der Naturwissenschaften“ (Hessisches Kultusministerium, 2024). Im Mittelpunkt dieses Inhaltsfelds stehen grundlegende Formen naturwissenschaftlichen Arbeitens, insbesondere die Formulierung von Fragestellungen, die experimentelle Überprüfung von Hypothesen sowie die Unterscheidung zwischen Beobachtung und Deutung. Dabei spielen auch die Erfassung physikalischer Größen durch Messung sowie die Beurteilung von Messgenauigkeit und möglichen Einflüssen von Messfehlern eine zentrale Rolle. Das CO₂-Messsystem lässt sich hier gut einordnen, da es die Messung einer Größe ermöglicht, die sich dem unmittelbaren Wahrnehmen entzieht und erst durch sensorbasierte Erfassung zugänglich wird.

Mögliche Zugänge ergeben sich in diesem Inhaltsfeld insbesondere über Fragestellungen, bei denen CO₂ als messbare Größe in naturwissenschaftlichen Zusammenhängen untersucht wird. Anknüpfend an die in Abschnitt 3.5 dargestellten bisherigen Ansätze bieten sich hier zunächst Untersuchungen zu CO₂-freisetzenden Prozessen an, etwa bei Brausetabletten. Auch der inhaltliche Schwerpunkt der Gemeinsamkeiten mit anderen Naturwissenschaften, insbesondere mit der Biologie, lässt sich mit dem CO₂-Messsystem aufgreifen, beispielsweise durch die Untersuchung von Photosynthese und Zellatmung bei Pflanzen. Dies lässt sich anhand einfacher Versuche beispielsweise mit Kresse unter unterschiedlichen Lichtbedingungen oder mit keimenden Bohnen in geschlossenen Systemen umsetzen (vgl. Abschnitt 3.5; Watzka & Girwidz, 2011a). Ein weiterer alltagsnaher Zugang kann über kohlenensäurehaltige Getränke oder Wassersprudler erfolgen.

Auch das Inhaltsfeld „Wettererscheinungen und Klima“ bietet Anknüpfungspunkte für die Einbettung des CO₂-Messsystems in den Unterricht. Im Vordergrund steht hier vor allem die Rolle von CO₂ als klimarelevantem Spurengas. Dadurch können der Strahlungshaushalt der Erde, der Treibhauseffekt sowie der in diesem Inhaltsfeld angelegte Schwerpunkt der Übertragung thermischer Energie thematisiert werden. Eine Verknüpfung ist dabei beispielsweise mit der in Kapitel 2 dargestellten Keeling-Kurve möglich. Über die wellenlängenabhängige Absorption von Infrarotstrahlung lässt sich von dort aus eine Brücke zum NDIR-Messprinzip des Sensors schlagen. Ein Experiment zum Treibhauseffekt kann diesen Zusammenhang zusätzlich

verdeutlichen, indem Wärmeübertragung und die Rolle von CO₂ in Klimaprozessen anschaulich gemacht werden. Eigene CO₂-Messungen können diesen Zugang ergänzen, indem sie CO₂ als messbare Größe konkret erfahrbar machen und damit einen konkreten Bezug zwischen global diskutierten Klimafragen und physikalischer Messpraxis herstellen. Auf dieser Grundlage lassen sich auch Fragen nach dem Einfluss des Menschen auf das Klima und nach eigenen Verhaltensweisen aufgreifen.

Einen weiteren Anknüpfungspunkt bietet das Inhaltsfeld „Physik in der Verantwortung“. Im Zusammenhang mit dem CO₂-Messsystem ist hier insbesondere die Verantwortung gegenüber der Umwelt sowie die Berücksichtigung von Umwelt- und Gesundheitsaspekten relevant. Das Messsystem lässt sich in diesem Rahmen vor allem über Fragestellungen zur Raumluftqualität und Lufthygiene in Innenräumen einbinden. Mögliche Zugänge ergeben sich etwa über Konzentrationsschwierigkeiten in schlecht gelüfteten Räumen oder über die in Abschnitt 2.2.3 dargestellten Richtwerte zur Innenraumluftqualität. Auf diese Weise kann das CO₂-Messsystem dazu genutzt werden, physikalische Erkenntnisse zur Identifikation von Problemursachen heranzuziehen und mögliche Maßnahmen, etwa regelmäßiges Lüften, im Hinblick auf ihre Folgen zu beurteilen.

Über diese Inhaltsfelder hinaus sind je nach unterrichtlicher Schwerpunktsetzung auch Bezüge zu weiteren Themenbereichen denkbar, etwa wenn stärker technische, messmethodische oder strahlungsbezogene Aspekte des Messsystems in den Vordergrund rücken. Die genannten Inhaltsfelder erscheinen jedoch für die Einführung des CO₂-Messsystems besonders anschlussfähig.

6.2.2 Erschließung der Komponenten des Messsystems

Die in Abschnitt 6.1.2 formulierten Lernziele setzen voraus, dass die zentralen Komponenten des Messsystems im Unterricht so eingeführt werden, dass ihre Funktion, ihre Verschaltung und ihr Zusammenwirken für Schülerinnen und Schüler nachvollziehbar werden. Dazu kann das Messsystem zunächst über seine grundlegenden Bauteile erschlossen werden.

Für die Erschließung des Arduino-Mikrocontrollerboards kann auf bestehende Unterrichtsmaterialien zum Kennenlernen von Arduino-Boards zurückgegriffen

werden. In Anlehnung an das Arbeitsblatt „Arduino kennenlernen“ aus der Materialdatenbank „Physik Kommunizieren“ ist in Abbildung 17 eine beschriftbare Darstellung des Boards dargestellt (Schumann & Pusch, 2019).

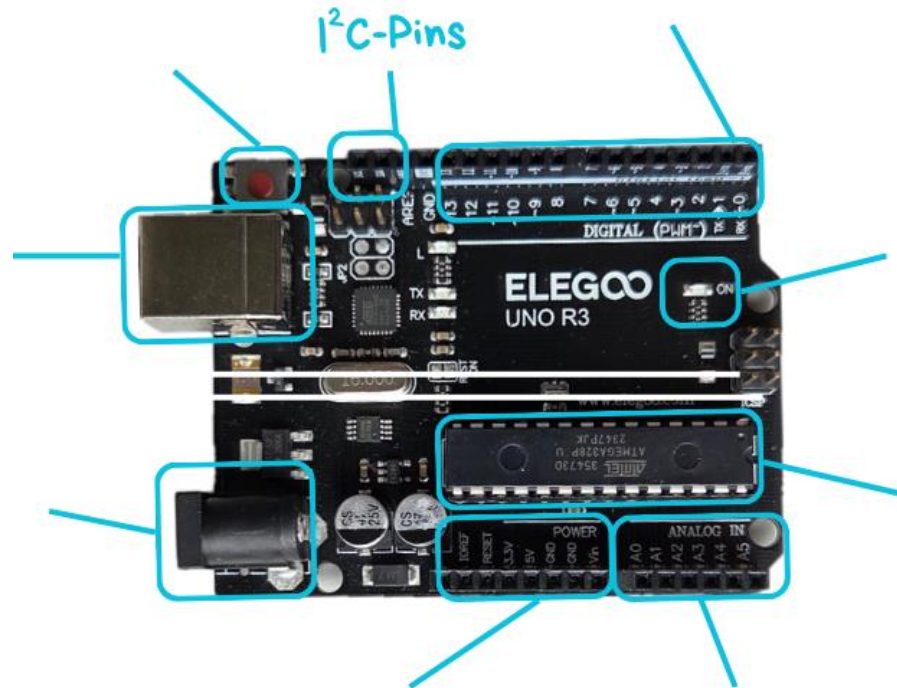


Abbildung 17: Beschriftbare Darstellung des Elegoo Uno R3-Boards zur Zuordnung zentraler Bauteile und Anschlüsse.

Die Schülerinnen und Schüler ordnen dort die Begriffe:

- „Analog“-Pins
- „Digital“-Pins
- Mikrocontroller Atmega328P
- Reset-Button
- Status LED (ON)
- USB-Anschluss
- Versorgungspins

den entsprechenden Bereichen des Boards zu.

Diese gezielte Beschriftung kann die Auseinandersetzung mit der Hardware unterstützen und eine erste Orientierung im Aufbau des Messsystems ermöglichen. Darüber hinaus können auch die Funktionen der einzelnen Elemente erläutert werden. Dies kann beispielsweise im Unterrichtsgespräch, in kurzen Erklärungstexten auf einem Arbeitsblatt oder in Form einer ergänzenden Tabelle erfolgen, wie sie beispielhaft in Tabelle 4 dargestellt ist.

Auf dieser Grundlage soll für die Schülerinnen und Schüler erkennbar werden, dass das Board über Anschlüsse verfügt, die als sogenannte Pins bezeichnet werden und über die sich weitere Bauteile des Messsystems einbinden lassen. Auf dem Board befindet sich zudem ein Mikrocontroller, also eine programmierbare elektronische Schaltung. Mithilfe eines geeigneten Programms kann festgelegt werden, wie die angeschlossenen Bauteile ausgelesen oder angesteuert werden. Über den USB-Anschluss wird das Board mit einem Computer verbunden und zugleich mit Strom versorgt.

Tabelle 4: Bauteile des Arduino-Boards und ihre Funktion.

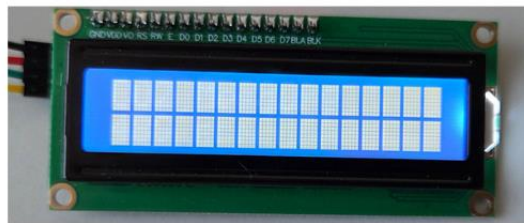
Bauteil	Funktion
„Analog“-Pins	Anschlüsse für analoge Eingangssignale (0-5 V)
„Digital“-Pins	Anschlüsse für digitale Ein- und Ausgangssignale (5 V)
I2C-Pins (SCL und SDA)	Serielle Datenausgabe (u. a. für LCD-Displays)
Mikrocontroller Atmega328	programmierbare elektronische Schaltung mit Recheneinheit und Speicher; verarbeitet Signale und steuert Abläufe
Reset-Button	Neustart des Boards
Status- LED (ON)	leuchtet, wenn das Board mit Strom versorgt wird
USB-Anschluss	Verbindung mit dem Computer; Stromversorgung; Upload von Programmen
Versorgungspins	5 V, 3,3 V und GND-Anschluss für externe Schaltungen

Beim K30-Sensor sollen die Schülerinnen und Schüler vor allem erkennen, dass er die zentrale Messkomponente des Systems darstellt. Der Sensor erfasst den CO₂-Gehalt der Umgebungsluft und überführt diese physikalische Größe in ein elektrisches Signal, das vom Arduino weiterverarbeitet werden kann. Darüber hinaus ist es wichtig, auch die begrenzte Messgenauigkeit des Messinstruments sowie die notwendige Aufwärmzeit vor Beginn der Messung zu thematisieren (vgl. Abschnitt 4.1). So wird deutlich, dass Messwerte nicht als unmittelbar gegebene exakte Größen zu verstehen sind, sondern als Ergebnisse eines technischen Messprozesses, die eingeordnet werden müssen.

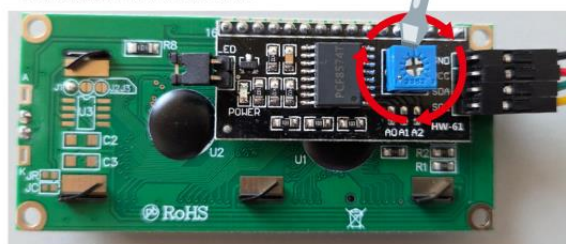
Am LCD-Display sollen die Schülerinnen und Schüler vor allem erkennen, dass sich die vom K30-Sensor erfassten Messwerte dort unmittelbar ablesen lassen. Darüber hinaus kann das Display eine erste Rückmeldung darüber geben, ob der Aufbau in zentralen Teilen funktioniert. Für den praktischen Umgang mit dem Display ist insbesondere relevant, dass sich der Kontrast über einen kleinen Regler auf der Rückseite (Potentiometer) einstellen lässt. Die Anpassung des Kontrasts kann von den Schülerinnen und Schülern selbst vorgenommen werden und bietet damit eine einfache Möglichkeit, aktiv mit dem Aufbau zu interagieren, um die Lesbarkeit der Anzeige zu verbessern. Da sich dieser Regler auf der Rückseite des Displays befindet, kann zusätzlich eine beschriftete Abbildung als Hilfestellung zur Verfügung gestellt werden, wie sie in Abbildung 18 dargestellt ist.

Kontrast des LCD-Displays einstellen

LCD-Display nicht lesbar



Potentiometer auf der Rückseite drehen



Für die Verschaltung des Messsystems ist eine möglichst übersichtliche und kleinschrittige Darstellung der Verbindungen erforderlich, da die meisten Schülerinnen und Schüler mit einem solchen Aufbau zuvor nicht gearbeitet haben. Anknüpfend an die Beobachtungen aus Abschnitt 5 kann ihnen hierfür die bereits in Abbildung 11 dargestellte Übersicht der K30-Platine zur Verfügung gestellt werden, in der die relevanten Anschlüsse markiert sind, da auf der Sensorplatine selbst keine Beschriftung dieser Anschlüsse vorhanden ist. Da sich in der Erprobung gezeigt hat, dass die Anschlüsse auf ausgedruckten Darstellungen nicht immer gut erkennbar sind, sollte auf eine ausreichend große und scharfe Darstellung geachtet werden. Alternativ kann es auch hilfreich sein, die relevanten Anschlüsse auf der K30-Platine zusätzlich zu beschriften. Ebenso erscheint es sinnvoll, nur diejenigen Pins anzulöten, die für den konkreten Aufbau tatsächlich benötigt werden, damit die Schülerinnen und Schüler die relevanten Anschlüsse leichter zuordnen können. Für die eigentliche Verschaltung des K30-Sensors und des LCD-Displays können die in Abschnitt 4.3 eingeführten Tabelle 1 und Tabelle 2 genutzt werden. Ihre getrennte Darstellung ist didaktisch sinnvoll, da sich in der Erprobung des Messsystems gezeigt hat, dass eine gemeinsame Darstellung der Verbindungen nicht unmittelbar verständlich war.

Zusätzlich sollte erläutert werden, dass die 5-Volt-Versorgung über das Breadboard verteilt wird und die Verbindung der einzelnen Bauteile über Steckbrücken (Jumper-Kabel) erfolgt. Eine einheitliche Farbgebung der verwendeten Kabel kann die Orientierung zusätzlich unterstützen, etwa wenn die 5V-Leitung rot und die Masseleitung (GND) schwarz oder blau geführt wird.

Als weitere Hilfestellung kann bei Bedarf eine ergänzende schematische Darstellung der Verkabelung herangezogen werden, wie sie in Abbildung 19 gezeigt ist. Je nach Vorkenntnissen der Schülerinnen und Schüler und der unterrichtlichen Zielsetzung können die Funktionen der einzelnen Bauteile sowie ausgewählte elektrische Aspekte der Verschaltung weiterführend vertieft werden.

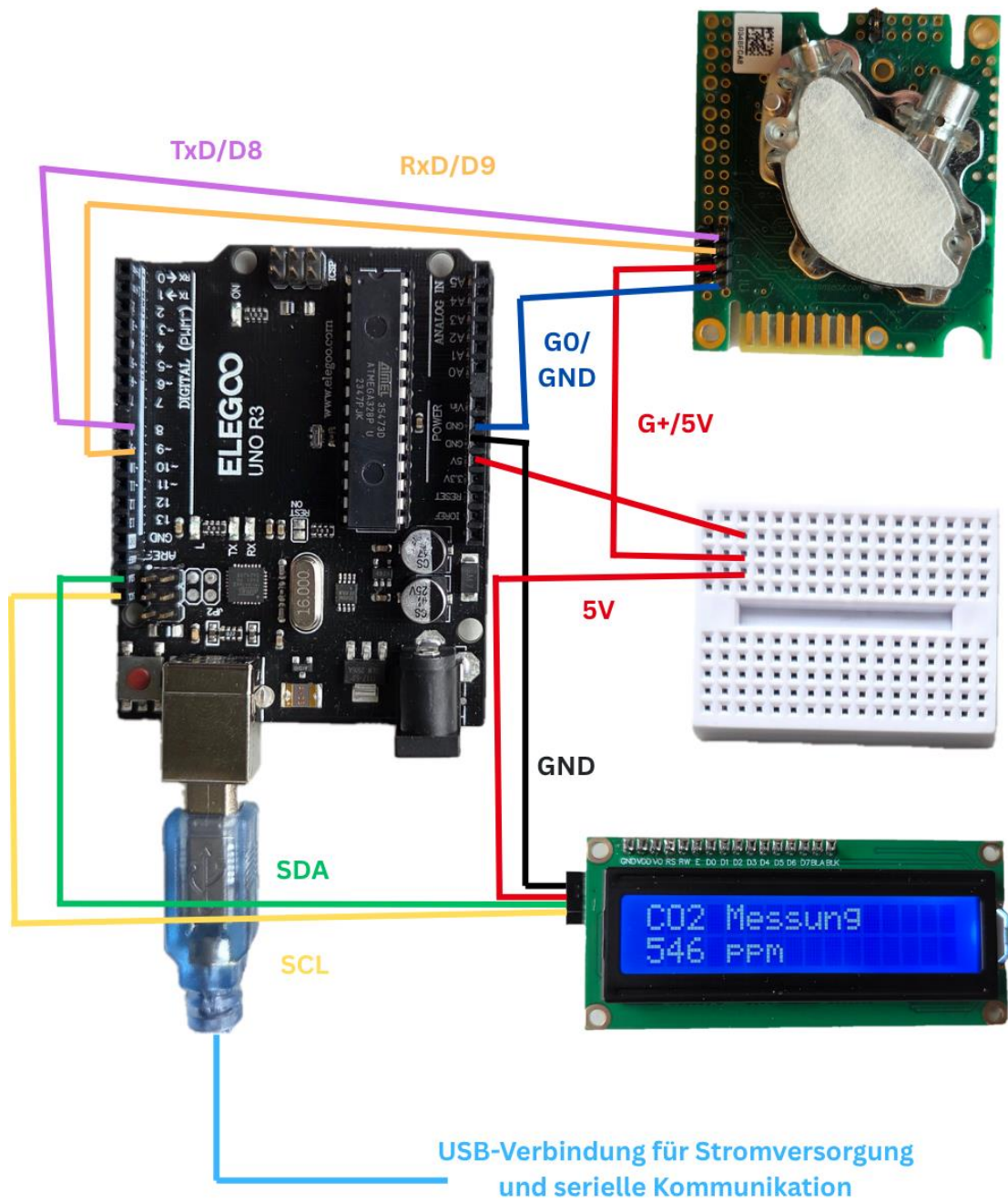


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Verkabelung des in Kapitel 4 vorgestellten Messsystems.

6.2.3 Hinführung zum Messprinzip

Für die unterrichtliche Hinführung zum Messprinzip steht in Anlehnung an Abschnitt 6.1.1 nicht der konkrete innere Aufbau des verwendeten K30-Sensors im Vordergrund, sondern die Grundvorstellung, dass CO₂ mit Infrarotstrahlung wechselwirkt. In vereinfachter Form kann erläutert werden, dass eine Infrarotquelle Strahlung durch eine Messzelle sendet, in der sich CO₂ befindet. Je mehr CO₂ sich in der Messzelle befindet, desto stärker wird die Strahlung auf ihrem Weg abgeschwächt und desto weniger erreicht den Detektor. Diese Veränderung wird registriert und als Messsignal weiterverarbeitet. Auf dieser Grundlage lässt sich auch der qualitative Zusammenhang zwischen CO₂-Mischungsverhältnis und Signaländerung verdeutlichen: Nimmt der CO₂-Gehalt zu, wird die Infrarotstrahlung stärker absorbiert und das gemessene Signal verändert sich entsprechend. Zur Veranschaulichung der Absorption können ergänzend einfache Demonstrationen eingesetzt werden.

Eine Möglichkeit stellt ein qualitatives Experiment mit einer Wärmebildkamera dar, wie es beispielsweise auf dem YouTube-Kanal Wetterschule gezeigt wird (Wetterschule, 2024). Dabei werden ein mit Umgebungsluft gefüllter und ein mit CO₂ gefüllter Ballon vor ein Gefäß mit heißem Wasser gehalten. Befindet sich CO₂ zwischen dem warmen Hintergrund und der Kamera, absorbiert es einen Teil der von dort ausgehenden Wärmestrahlung, sodass weniger Strahlung die Kamera erreicht und sich der Bereich im Wärmebild verändert. Der luftgefüllte Ballon zeigt diesen Effekt deutlich schwächer.

Um Fehlvorstellungen zu vermeiden, sollte bei der Durchführung für die Schülerinnen und Schüler deutlich werden, dass die Wärmebildkamera nicht einfach die Temperatur des CO₂ misst, sondern dass aufgrund der Absorption weniger Wärmestrahlung vom warmen Hintergrund zur Kamera gelangt. Ebenso soll deutlich werden, dass CO₂ dabei nicht als eine Art „Wärmemauer“ verstanden werden darf, die jede Wärmestrahlung gleichermaßen abschirmt.

Auf diese Weise kann die Grundidee des Messprinzips anschaulich unterstützt werden, ohne bereits den technischen Aufbau des Sensors im Detail erklären zu müssen.

Ergänzend können die in Abschnitt 3.5 dargestellten bisherigen Ansätze herangezogen werden. Im dort beschriebenen Arbeitsheft von Watzka und Girwidz werden einzelne Bestandteile des Messprinzips, etwa Strahlungsquelle, Filter, Detektor und Gasraum, modellhaft verdeutlicht und mit alltagsnahen Vergleichsobjekten verknüpft. Eine solche Vorgehensweise kann das Verständnis der Grundidee unterstützen, ohne dass der verwendete K30-Sensor selbst in seinem inneren Aufbau vollständig erschlossen werden muss.

Der K30-Sensor kann daran anschließend als technische Realisierung dieses vereinfachten Prinzips eingeordnet werden. Für die unterrichtliche Arbeit erscheint dabei entscheidend, dass die Schülerinnen und Schüler die Grundidee des Verfahrens nachvollziehen können. Weiterführende technische Details, etwa die elektronische Signalverarbeitung oder die genaue innere Anordnung der Bauteile, können an dieser Stelle ausgeklammert bleiben.

Anhand realer Messwertverläufe kann darüber hinaus thematisiert werden, dass Sensorsignale nicht verzögerungsfrei reagieren. So lässt sich beispielsweise zeigen, dass die Messwerte nach einer kurzzeitigen CO₂-Zufuhr nicht unmittelbar ihren Endwert erreichen und auch nicht sofort wieder auf den Ausgangswert zurückfallen, sondern eine gewisse Ansprechzeit aufweisen.

Soll das Messprinzip stärker vertieft werden, kann ergänzend ein anschaulicherer Sensor oder eine schematische Darstellung wie in den Materialien von Watzka & Girwidz (2011a) herangezogen werden (vgl. Abschnitt 3.5.1). Auf dieser Grundlage ließen sich je nach Lerngruppe auch weiterführende Aspekte, etwa der Aufbau des thermischen Detektors, die Funktion von Filter und Messzelle oder in anspruchsvollere Form auch das Lambert-Beersche Gesetz, anschließen. Für die Sekundarstufe I erscheint dies jedoch eher als mögliche Erweiterung denn als notwendigen Bestandteil der grundlegenden Einführung.

6.3 Experimenteller Einsatz

Im Unterricht kann das entwickelte CO₂-Messsystem in unterschiedlichen Experimenten eingesetzt werden, um fachliche oder alltagsbezogene Fragestellungen zu untersuchen sowie einfache Hypothesen experimentell zu überprüfen. In Abschnitt 3.5 wurden dazu bereits verschiedene Ansätze vorgestellt. Diese lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen.

6.3.1 Kategorisierung der Experimente

Zur ersten Kategorie zählen Messungen des CO₂-Gehalts in Innenräumen. Dazu gehören insbesondere Anwendungen zur Raumluftqualität, etwa im Zusammenhang mit CO₂-Ampeln oder einfachen Modellierungsaufgaben. Der Aufbau ist hierbei vergleichsweise unkompliziert, da das entwickelte Messsystem ohne zusätzliche Anpassungen eingesetzt werden kann, um die Umgebungsluft direkt zu erfassen.

Die zweite Kategorie umfasst Versuche, bei denen CO₂-Veränderungen in einem räumlich begrenzten Volumen erfasst werden. Hierzu zählen insbesondere die Experimente mit CO₂-freisetzenden Alltagsstoffen wie Brause, Hefe oder Gebissreinigertabs. Je nach Stoff und eingesetzter Menge können sich Anstiegsverhalten und erreichter CO₂-Maximalwert deutlich unterscheiden. Zur zweiten Kategorie gehören außerdem die Untersuchungen zu Photosynthese und Zellatmung bei Pflanzen, etwa mit Kresse oder keimenden Bohnen. Auch ähnliche Aufbauten zur Veranschaulichung des Treibhauseffekts lassen sich dieser Kategorie zuordnen. Der Einsatz des CO₂-Messsystem wird für diese Kategorie im Folgenden exemplarisch am Brauseversuch verdeutlicht.

6.3.2 Exemplarische Umsetzung am Brauseversuch

Der Brauseversuch eignet sich für den Einsatz im Unterricht besonders, da die benötigten Materialien leicht verfügbar sind und Brause den Schülerinnen und Schülern in der Regel aus dem Alltag bekannt ist. Für den Brauseversuch werden neben dem entwickelten CO₂-Messsystem Materialien zur räumlichen Begrenzung des Messvolumens benötigt. Hierfür können beispielsweise Gefrier- oder Zip-Beutel in unterschiedlichen Größen, aber auch einfache Kunststoffgefäße verwendet werden. Wichtig ist dabei, dass eine Durchführung

für die Sensorkabel möglich ist. Zur Freisetzung von CO₂ werden Brause und Wasser benötigt. Darüber hinaus sind Hilfsmittel wie ein Löffel, Tücher zum Auffangen möglicher Rückstände, eine leere Klopapierrolle oder ein vergleichbarer Abstandshalter sowie zwei Kunststoffbehälter erforderlich. Eine Übersicht der verwendeten Materialien ist in Abbildung 20 dargestellt.

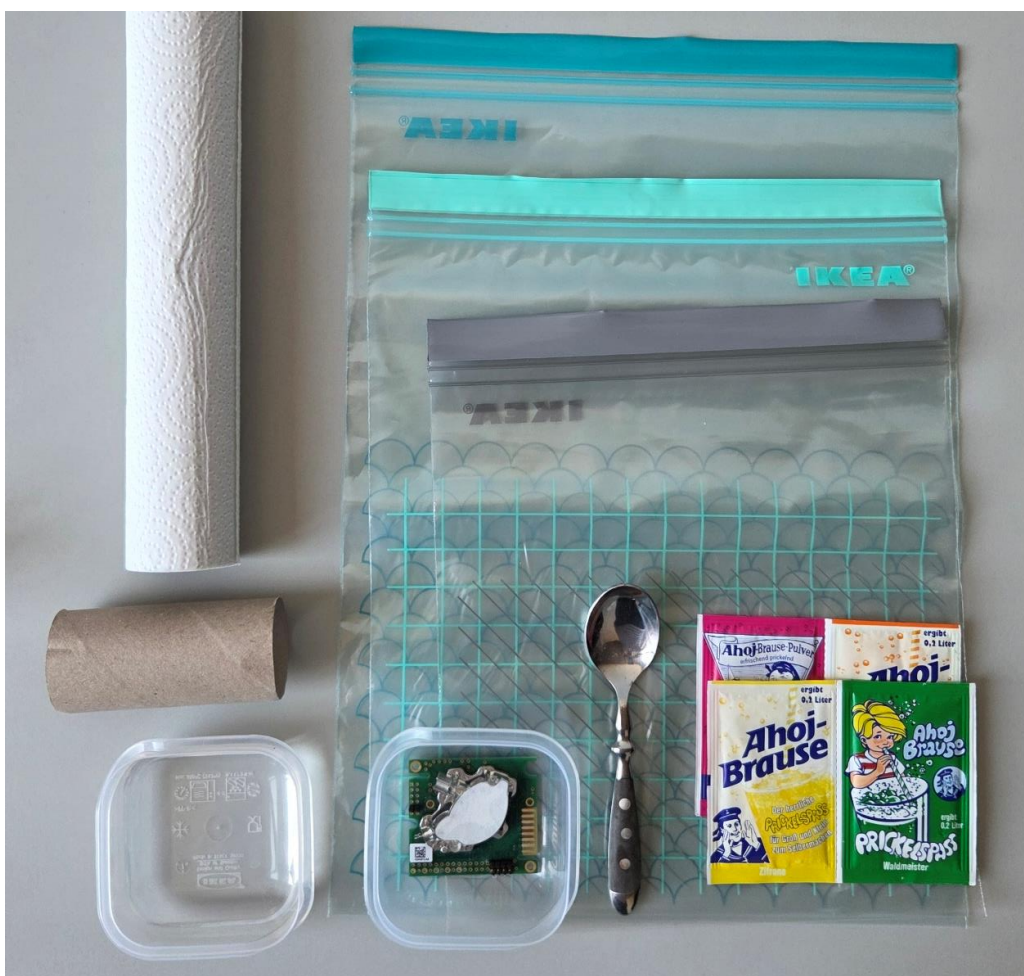


Abbildung 20: Übersicht der für den Brauseversuch verwendeten Materialien: Wassergefüllter Kunststoffbehälter, Kunststoffbehälter mit K30-Sensor, leere Klopapierrolle, Küchenrolle, drei Zip-Beutel mit Volumina von 2,5 l, 4,5 l und 6 l, Löffel sowie Brausepackungen.

Der exemplarische Versuchsaufbau ist in Abbildung 21 dargestellt. Als räumlich begrenztes Messvolumen wurde ein Zip-Beutel mit einem Volumen von 4,5 l verwendet. Es ist empfehlenswert, die Verbindungskabel des K30-Sensors auf 40 bis 50 cm zu verlängern, um den Aufbau zu erleichtern.

Für die Kabelführung wird ein möglichst kleines Loch in den Beutel eingebracht, durch das die Kabel nach außen geführt werden. Die Öffnung kann bei Bedarf zusätzlich mit Klebeband abgedichtet werden. Alternativ ist

auch eine Durchführung über den Zip-Verschluss möglich, dies erwies sich in der praktischen Umsetzung jedoch als umständlicher. Innerhalb des Beutels werden zwei Kunststoffbehälter diagonal zueinander angeordnet. Der mit Wasser gefüllte Behälter wird dabei in der Nähe des Beuteleingangs positioniert, während der K30-Sensor in dem zweiten Behälter möglichst weit davon entfernt platziert wird. Auf diese Weise wird der Sensor vor austretendem Wasser geschützt. Zusätzlich wird eine leere Klopapierrolle mittig im Beutel platziert, damit der Beutel geöffnet bleibt und ein ausreichend großer Innenraum erhalten bleibt.

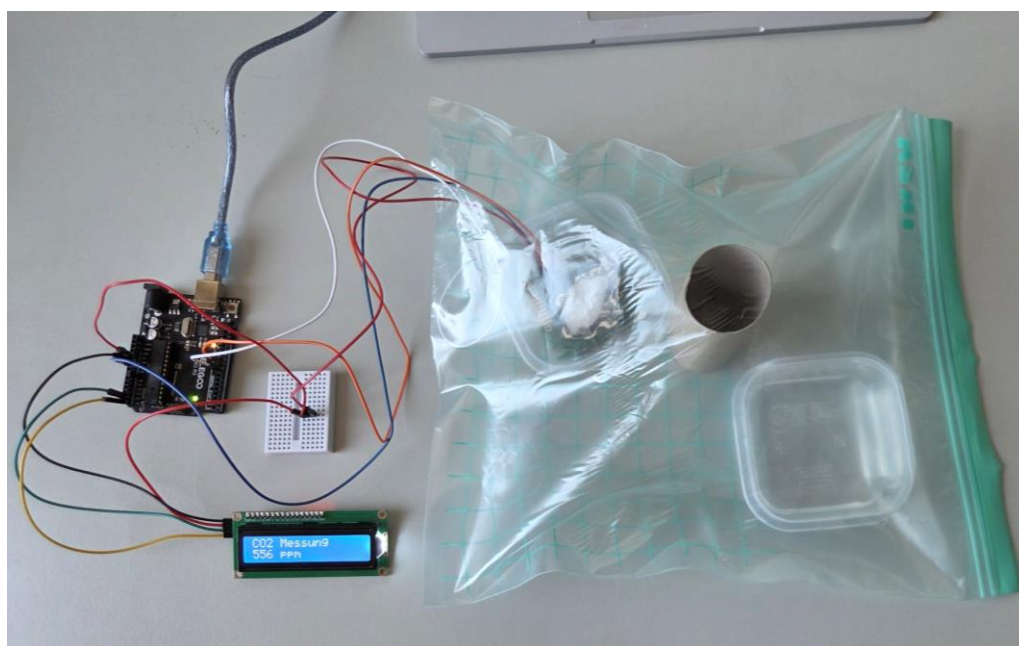


Abbildung 21: Zeigt den exemplarischen Versuchsaufbau des Brauseversuchs mit einem 4,5l Volumen.

Zur Durchführung wird der vorbereitete Aufbau zunächst mit dem Zip-Beutel verschlossen. Die Messwerverfassung kann dabei über das LCD-Display erfolgen oder zusätzlich mithilfe des Excel Data Streamers aufgezeichnet werden, wie in Abschnitt 6.4.2 erläutert. Zu Beginn der Messung wird abgewartet, bis sich im Beutel ein weitgehend stabiler Ausgangswert eingestellt hat. Währenddessen lässt sich eine kleine Menge Brausepulver auf einem Löffel vorbereiten. Anschließend wird der Beutel kurz geöffnet und das Pulver in den mit Wasser gefüllten Kunststoffbehälter gegeben. Danach wird der Beutel unmittelbar wieder verschlossen. Nach dem Anstieg des CO₂-Gehalts kann die Messung noch einige Zeit fortgeführt werden, bis kein weiterer deutlicher Anstieg mehr erkennbar ist. Auf Grundlage des beschriebenen

Aufbaus sind auch Variationen mit unterschiedlich großen Brausemengen oder veränderten Beutelvolumina möglich.

Ein Messverlauf des beschriebenen Brauseversuchs bei Verwendung von rund 2 g Brausepulver ist in Abbildung 24 dargestellt, die im Zusammenhang mit der Darstellung über den Excel Data Streamer in Abschnitt 6.4.2 eingeführt wird. Anhand dieses Verlaufs können Schülerinnen und Schüler, anknüpfend an die formulierten Lernziele, Beobachtungen zum Verlauf der Messung festhalten und erste Auswertungen vornehmen. Die genauere Auswertung solcher Messverläufe wird in Abschnitt 6.4.3 aufgegriffen. Der konkrete Verlauf hängt dabei unter anderem von der eingesetzten Brausemenge und dem gewählten Beutelvolumen ab. Bei sehr großer Brausemenge beziehungsweise sehr kleinem Beutelvolumen kann die Obergrenze des Messbereichs des K30-Sensors von 10000 ppm erreicht werden. Damit bietet der Versuch zugleich die Möglichkeit, die Aussagekraft digital erhobener Messdaten sowie die Grenzen des Messsystems zu thematisieren.

6.4 Messwertdarstellung und Auswertung

Aufbauend auf den in Abschnitt 3.4 dargestellten Grundlagen digitaler Messwerterfassung und den in Abschnitt 6.1.2 formulierten Lernzielen ist für den Unterrichtseinsatz des CO₂-Messsystems zu überlegen, wie Messwerte manuell und digital dargestellt, ausgewertet und mithilfe einfacher statistischer Kenngrößen beschrieben werden können.

6.4.1 Messwertdarstellung am LCD-Display

Die unmittelbarste Form der Messwertdarstellung erfolgt über das LCD-Display des Messsystems. Die Schülerinnen und Schüler können dort den aktuell erfassten CO₂-Wert direkt ablesen und zeitlich verfolgen. Zugleich bietet das Display einen niedrigschwelligen Zugang zur Messwerterfassung, da keine zusätzliche Software erforderlich ist und der Messprozess direkt am Aufbau beobachtet werden kann.

Für den Unterricht bietet es sich an, die am Display angezeigten Werte in festgelegten Zeitabständen manuell in eine Tabelle zu übertragen. Auf dieser Grundlage können die Schülerinnen und Schüler Messwertverläufe zunächst in einfacher Form dokumentieren und anschließend graphisch darstellen. So lässt

sich beispielsweise ein zeitlicher Verlauf des CO₂-Gehalts per Hand in ein Koordinatensystem eintragen. Auf diese Weise wird ein grundlegendes Verständnis dafür gefördert, wie aus einzelnen Messpunkten ein Diagramm entsteht. So lässt sich auch an die in Abschnitt 3.4 dargestellte Bedeutung einer zunächst manuellen Auswertung von Messdaten anknüpfen (vgl. Lück & Wilhelm, 2023).

Gleichzeitig bleibt die Darstellung am LCD-Display auf momentane Einzelwerte beschränkt. Für umfangreichere Messreihen und weiterführende Auswertungen stößt diese Form der Darstellung daher an Grenzen.

6.4.2 Darstellung mit dem Excel Data Streamer

Für eine fortlaufende tabellarische Erfassung und graphische Visualisierung größerer Datenmengen bietet sich daher die digitale Übertragung der Messwerte in ein Computerprogramm an. Im vorliegenden Messaufbau kann dafür der Excel Data Streamer verwendet werden. Dabei handelt es sich um ein bidirektionales Add-in für Microsoft Excel zur Übertragung von Live-Daten zwischen Excel und einem Mikrocontroller. Voraussetzungen für die Nutzung sind eine Windows-Desktop-Version von Excel für Microsoft 365 sowie ein PC mit Windows 10 oder 11 (Microsoft, 2026).

Für das in dieser Arbeit verwendete CO₂-Messsystem steht dabei die Nutzung des Tools zur Darstellung und Auswertung der übertragenen Messdaten im Zentrum. Über diesen hier betrachteten Anwendungsfall hinausgehende Funktionen des Excel Data Streamers, beispielsweise die Übertragung von Daten aus Excel an den Mikrocontroller oder die Einbindung interaktiver Bedien- und Anzeigeelemente, werden an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt. Entsprechende Informationen sowie eine kurze Anleitung zur Aktivierung des Add-ins finden sich unter anderem in den bereits in Abschnitt 3.4 herangezogenen Publikationen von Bernstein und Wilhelm (2023a, 2023b) sowie auf der Supportseite von Microsoft (Microsoft, 2026).

Nach der Aktivierung des Add-ins werden in der Excel-Arbeitsmappe die Arbeitsblätter „Dateneingang“, „Datenausgang“, „Einstellungen“ und „Manifest“ angelegt. Zudem erscheint im Excel-Menüband die in Abbildung 23 dargestellte Registerkarte „Datenstreamer“. Über die Schaltfläche „Ein Gerät verbinden“ lässt sich das per USB angeschlossene Messsystem als

serielles Gerät auswählen. Wird anschließend „Daten starten“ gewählt, werden die vom Mikrocontroller gesendeten Werte live in die Arbeitsmappe übertragen und im Arbeitsblatt „Dateneingang“ angezeigt. Dieses Arbeitsblatt bildet somit die Rohdatenquelle des Messsystems.

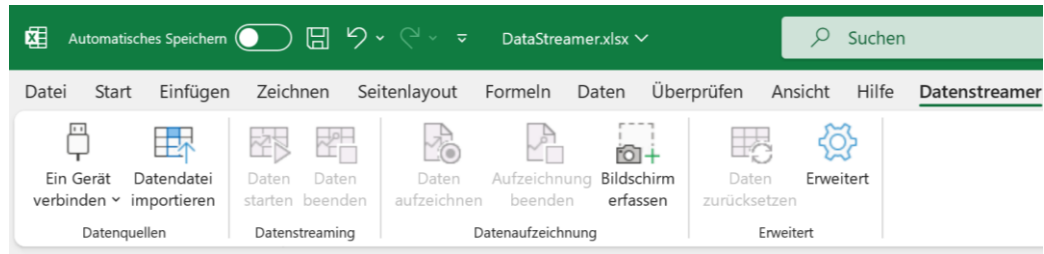


Abbildung 23: Registerkarte des Excel Data Streamers in Microsoft Excel.

Die Darstellung der eingehenden Daten lässt sich über die Arbeitsmappeneinstellungen des Excel Data Streamers anpassen. Für das hier verwendete Messsystem werden die in Abbildung 22 dargestellten Einstellungen gewählt.

	A	C	D	E	F
1	Arbeitsmappeneinstellungen				
2	Die unten stehenden Einstellungen beeinflussen, wie Daten aus Datenquellen in die aktuelle Arbeitsmappe gelesen werden. Löschen Sie den Inhalt eines Felds, um es auf seine Standardeinstellung zurückzusetzen.				
4	Datenintervall (ms)	1000			
6	Datenzeilen	600			
8	Datenkanäle	1			
10	Datenrichtung	Neueste zuerst			
12	WARNUNG: Das Ändern der Einstellungen kann zum Verlust von Inhalten und/oder benutzerdefinierten Formatierungen in den Arbeitsblättern "Dateneingang" und "Datenausgang" führen. Speichern Sie immer, bevor Sie Werte ändern.				
13					
14					
15					
16					

Abbildung 22: Arbeitsmappeneinstellungen des Excel Data Streamers für das CO₂-Messsystem.

Da der in Kapitel 4 beschriebene Sketch alle 1000 ms einen CO₂-Messwert über die serielle Schnittstelle ausgibt, wird auch im Excel Data Streamer ein Datenintervall von 1000 ms gewählt. Diese Einstellung passt die Aktualisierung der Datenerfassung in Excel an die Ausgaberate des Mikrocontrollers an. Die Anzahl der Datenzeilen legt fest, wie viele Messwerte im Verlaufsbereich des Arbeitsblatts „Dateneingang“ vorgehalten werden. Sie

sollte entsprechend der geplanten Messdauer gewählt werden, damit der für die Auswertung relevante Messverlauf vollständig erfasst wird. Da pro Messzyklus nur ein einzelner CO₂-Wert übertragen wird, ist ein Datenkanal ausreichend. Die Datenrichtung wird auf „Neueste zuerst“ gesetzt, sodass der aktuellste Messwert im Arbeitsblatt „Dateneingang“ oben angezeigt wird. Da die vom K30-Sensor erfassten CO₂-Messwerte durch den Sketch bereits in Form ganzzahliger ppm-Werte ohne Einheit an Excel übertragen werden, treten bei der Übernahme keine Probleme durch Dezimal- oder Trennzeichen auf.

Die mit dem Excel Data Streamer eingelesenen Messwerte lassen sich unmittelbar mit den in Excel verfügbaren Funktionen weiterverarbeiten und visualisieren. Auf Grundlage der Rohdaten kann so ein Dashboard als übersichtliche Darstellungs- und Auswertungsoberfläche erstellt werden. Eine beispielhafte Umsetzung für das CO₂-Messsystem ist in Abbildung 24 dargestellt.

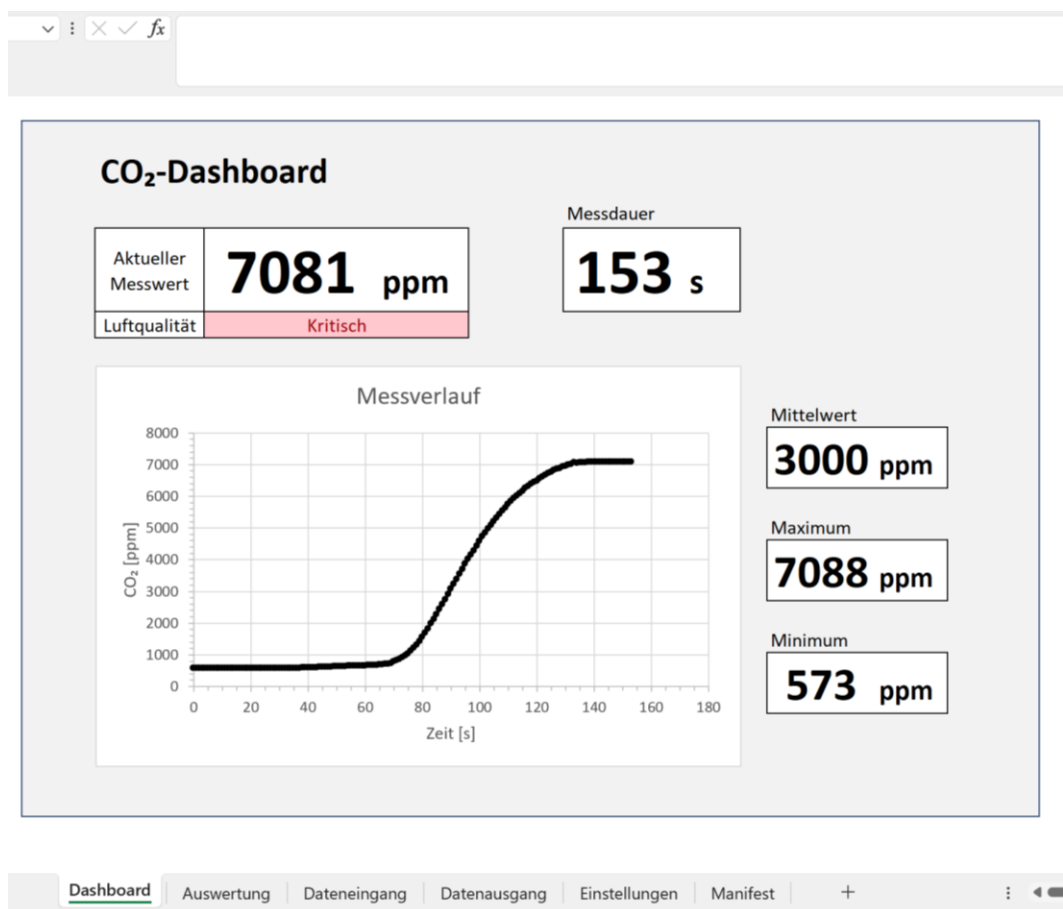


Abbildung 24: CO₂-Dashboard zur Darstellung und Auswertung der Messwerte in Excel am Beispiel des in Abschnitt 6.3.2 beschriebenen Brauseversuchs mit 2 g Brausepulver.

Es zeigt den aktuellen Messwert, die Messdauer, den graphischen Verlauf der Messung sowie ausgewählte Kennwerte. Zusätzlich kann über eine Statusanzeige eine einfache Bewertung der Luftqualität vorgenommen werden. Ein solches Dashboard kann entweder von Schülerinnen und Schülern selbst erstellt oder von der Lehrkraft als vorbereitete Excel-Datei zur Verfügung gestellt werden.

Das Dashboard greift über Zellbezüge auf die vom Excel Data Streamer erfassten Messwerte zurück und aktualisiert sich dadurch während der laufenden Messung automatisch. Für die graphische Darstellung und die Berechnung der Kennwerte ist es sinnvoll, die Rohdaten zunächst in einem separaten Arbeitsblatt „Auswertung“ aufzubereiten. Dieses Arbeitsblatt dient dazu, die dynamisch eingehenden Messwerte in eine für das Dashboard geeignete Form zu überführen. Dazu wird eine Zeitachse mit der seit Messbeginn verstrichenen Zeit in Sekunden erzeugt. Die CO₂-Werte werden mittels Excel-Funktionen so angeordnet, dass der Messverlauf im Diagramm zeitlich nachvollziehbar dargestellt werden kann. Leere Bereiche werden mithilfe der Funktion NV() von der Darstellung ausgeschlossen. Zusätzlich können Plausibilitätsfilter eingebunden werden, um ungültige oder offensichtlich fehlerhafte Messwerte wie NaN oder unplausibel hohe Ausreißer von der weiteren Darstellung und Berechnung auszuschließen.

Erfolgt der Zugang zum Messsystem im Unterricht über den Kontext der Innenraumluftqualität, bietet es sich an, im Dashboard eine ampelartige Statusanzeige zur automatisierten Bewertung der Luftqualität zu integrieren (vgl. Abbildung 24 und Abbildung 25). Dazu wird der aktuelle CO₂-Messwert anhand definierter Grenzbereiche eingeordnet. In der hier dargestellten Umsetzung werden die Kategorien „Gut“, „Lüften empfohlen“ und „Kritisch“ verwendet. Die Grenzbereiche können dabei an den in Abschnitt 2.2.3 dargestellten Kriterien zur Bewertung der Innenraumluftqualität angelehnt werden. Mithilfe der bedingten Formatierung in Excel kann die Statusanzeige in Abhängigkeit vom aktuellen CO₂-Messwert automatisch angepasst und farblich hervorgehoben werden. Abbildung 25 zeigt die Umsetzung der Statusanzeige bei verschiedenen CO₂-Mischungsverhältnissen.

Aktueller Messwert	491 ppm
Luftqualität	Gut

Aktueller Messwert	863 ppm
Luftqualität	Lüften empfohlen

Aktueller Messwert	1276 ppm
Luftqualität	Kritisch

Abbildung 25: Statusanzeige zur Luftqualitätsbewertung im CO₂-Dashboard bei unterschiedlichen CO₂-Mischungsverhältnissen.

Über das vorgestellte Dashboard hinaus bietet Excel weitere Möglichkeiten zur Gestaltung und Anpassung der Darstellung. Die Oberfläche kann dadurch an die jeweilige Unterrichtssituation und die konkrete Fragestellung angepasst werden. Ebenso wäre als Erweiterung denkbar, über das Arbeitsblatt „Datenausgang“ Steuerbefehle an den Arduino zu senden, um etwa das Messintervall vorzugeben, ohne den Sketch erneut auf den Mikrocontroller hochladen zu müssen. Dafür müsste der Arduino-Sketch jedoch entsprechend erweitert werden, sodass eingehende Befehle über die serielle Schnittstelle empfangen und verarbeitet werden können.

6.4.3 Auswertung der Messdaten

Die mit dem CO₂-Messsystem erfassten Messwerte sollten nicht nur dargestellt, sondern auch im Hinblick auf die zugrunde liegende Fragestellung ausgewertet und interpretiert werden. Anknüpfend an die in Abschnitt 6.1.2 formulierten Lernziele geht es dabei insbesondere darum, Messverläufe zu beschreiben, einfache Kenngrößen zu bestimmen und aus den erhobenen Daten begründete Aussagen abzuleiten.

Die Auswertung kann dabei sowohl auf den über das LCD-Display manuell erfassten Messwerten als auch auf den mit dem Excel Data Streamer aufgezeichneten Messdaten beruhen. Die Nutzung des Excel Data Streamers erleichtert die Auswertung und eröffnet durch die in Excel verfügbaren Funktionen zusätzliche Möglichkeiten. Dennoch sollte für Schülerinnen und Schüler nachvollziehbar bleiben, welche mathematischen Schritte der Auswertung zugrunde liegen.

Zu den grundlegenden Auswertungsmöglichkeiten gehören zunächst die Beschreibung des Messverlaufs, die Freisetzungsrates sowie die Erkennung auffälliger Veränderungen. Darüber hinaus können einfache Kenngrößen wie Mittelwert, Minimum, Maximum und Messdauer bestimmt und zur Beschreibung der Messung genutzt werden. Wie im in Abschnitt 6.4.2 vorgestellten Dashboard bereits umgesetzt, lassen sich solche Kenngrößen bei digitaler Erfassung unmittelbar ausgeben. Sie können jedoch ebenso auf Grundlage manuell erfasster Messwerte bestimmt werden.

Durch diese Bestimmung werden insbesondere für Versuche der zweiten Kategorie unterschiedliche Versuchsanordnungen vergleichbar, etwa im Hinblick auf verwendete Stoffe, eingesetzte Mengen oder das gewählte Beutelvolumen.

Für Versuche der ersten Kategorie lassen sich die beschriebenen Formen der Auswertung insbesondere für Monitoring- und Modellierungsaufgaben nutzen. Anknüpfend an die in Abschnitt 3.5 dargestellten Ansätze von Watzka und Girwidz können Messverläufe zur Raumluftqualität daraufhin ausgewertet werden, wann bestimmte Richtwerte überschritten werden, wie lange erhöhte CO₂-Werte anhalten oder wie sich Lüftungsmaßnahmen auf den weiteren Verlauf auswirken. Darüber hinaus können beobachtete CO₂-Anstiege genutzt werden, um einfache Abschätzungen zur Entwicklung des CO₂-Mischungsverhältnisses während einer Unterrichtsstunde vorzunehmen. Auch der in Abschnitt 3.5 dargestellte Ansatz von Wolfgang Mann zeigt, dass sich CO₂-Messungen unter körperlicher Aktivität für weiterführende Berechnungen nutzen lassen.

Damit können Messdaten nicht nur beschrieben, sondern auch genutzt werden, um Zusammenhänge zwischen Nutzung eines Raums, Lüftungssituation und CO₂-Verlauf zu analysieren und Maßnahmen wie regelmäßiges Lüften im

Hinblick auf Raumluftqualität und gesundheitlich zuträgliche Lernbedingungen zu beurteilen. Im Zusammenhang mit klimabezogenen Fragestellungen kann die Auswertung zudem dazu beitragen, CO₂ als messbare und für naturwissenschaftliche Deutungen relevante Größe einzuordnen.

7. Diskussion

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass sich CO₂-Messungen als Beispiel für Spurengasmessungen grundsätzlich mit einfachen, Arduino-basierten NDIR-Sensoren im Physikunterricht umsetzen lassen. So bietet das entwickelte CO₂-Messsystem dabei mehrere fachliche und didaktische Anknüpfungspunkte. Es verbindet alltagsbezogene Fragestellungen, etwa zur Raumluftqualität oder zum Klimawandel, mit digitaler Messwerterfassung sowie der Darstellung und Auswertung von Messdaten. Damit können Kompetenzen aufgegriffen werden, die in den aktuellen Bildungsstandards und curricularen Vorgaben eine zentrale Rolle spielen.

Die vorangegangenen Kapitel haben zugleich gezeigt, dass der Einsatz eines solchen Messsystems didaktisch und technisch komplex ist. Auf Basis der fachlichen Grundlagen wurden mögliche Zielsetzungen, didaktische Reduktionen und schulische Einsatzmöglichkeiten herausgearbeitet. Zu diskutieren ist daher, wie sich die technischen Möglichkeiten des Messsystems so einordnen lassen, dass daraus ein unterrichtlicher Mehrwert entstehen kann.

Ein wesentlicher Vorteil des entwickelten Messsystems liegt in seiner Flexibilität. Da es auf einem Mikrocontroller der Arduino-Familie basiert, lassen sich einzelne Komponenten ergänzen oder anpassen. Dadurch ist das System nicht auf eine feste Messanordnung beschränkt, sondern kann an unterschiedliche experimentelle Fragestellungen angepasst werden. So lassen sich auch bereits vorgestellte Ansätze wie eine CO₂-Ampel realisieren oder zusätzliche Sensoren für Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck integrieren, wie es im Rahmen der Erprobung umgesetzt wurde.

Auch aus Kostensicht ist der entwickelte Aufbau für den schulischen Einsatz interessant. Das Messsystem lässt sich für unter 80 € aufbauen, wobei der K30-Sensor mit etwa 50 € den größten Anteil ausmacht (DigiKey, 2026).

Dem geringen Preis steht jedoch ein höherer zeitlicher und technischer Aufwand der Lehrkraft gegenüber als bei den meisten kommerziellen Messsystemen für den Schulunterricht. Die Einrichtung und Programmierung des Systems setzen grundlegende Kenntnisse im Umgang mit Arduino und dessen Programmiersprache C++ voraus. Hinzu kommt, dass der K30-Sensor in der Regel nicht vollständig anschlussfertig ausgeliefert wird und vor dem

Einsatz zunächst Stiftleisten verlötet werden müssen. Besonders attraktiv kann der Einsatz daher an Schulen sein, an denen Arduino-Boards bereits vorhanden sind und in anderen Fächern, etwa im Informatik- oder Technikunterricht, genutzt werden. Dort können sowohl die Anschaffungskosten als auch der Einarbeitungsaufwand geringer ausfallen, da technisches Know-how und Teile der Hardware bereits vorhanden sind.

Eine weitere technische Hürde entsteht durch die Kalibrierung des Sensors. Da Schulen in der Regel nicht über Referenzgase verfügen, ist eine manuelle Kalibrierung, wie sie in Abschnitt 4.1 beschrieben wurde, nur schwer möglich. Hier könnte die automatische Baseline-Korrektur des Sensors Abhilfe schaffen. Dadurch würde sich der Sensor ähnlich wie beim in Abschnitt 3.5 vorgestellten phyphox-Aufbau durch regelmäßige Frischluftbedingungen selbstständig referenzieren.

Auch die Stromversorgung ist zu berücksichtigen. Obwohl der Hersteller für den K30-Sensor kurzzeitige Stromspitzen von bis zu 600 mA angibt, erwies sich die Versorgung über das Arduino-Board bei Messungen im Unterrichtskontext als ausreichend stabil. Für Messungen über mehrere Stunden kann jedoch eine externe Spannungsversorgung sinnvoll sein.

Hinzu kommt die offene Bauweise des Systems. Sie ermöglicht zwar eine nachvollziehbare Auseinandersetzung mit den einzelnen Komponenten, erfordert zugleich aber einen geeigneten Schutz der Bauteile. Besonders der K30-Sensor ist durch seine offene Platine im praktischen Einsatz weniger geschützt. In Abschnitt 6.3 wurde dies bereits dadurch berücksichtigt, dass der Sensor in einem separaten Gefäß positioniert wurde. Perspektivisch wäre zusätzlich eine einfache Schutzabdeckung oder Montageplatte denkbar, wie sie bereits für Mikrocontroller verwendet wird. Ähnlich wie beim vorgestellten phyphox-Bausatz könnte eine solche Abdeckung mithilfe eines 3D-Drucks umgesetzt werden. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die diffusionsbasierte Messung des Sensors nicht beeinträchtigt wird.

Im Unterschied dazu sind kommerzielle Messsysteme wie der in Abschnitt 3.5 vorgestellte Vernier-Sensor gezielt für den Einsatz im Unterricht entwickelt. Sie sind robuster aufgebaut und intuitiver zu bedienen, liegen mit einem Preis von über 500 € ohne Zubehör jedoch deutlich über den Kosten des hier entwickelten Low-Cost-Aufbaus (Böttcher Datentechnik GmbH, 2026).

Der Unterschied betrifft jedoch nicht nur Kosten und Robustheit, sondern auch die Frage, welche Teile des Messprozesses im Unterricht sichtbar gemacht werden können. Bei kommerziellen Messsystemen treten technische Details häufig stärker in den Hintergrund, was die Bedienung erleichtert, zugleich aber die Nachvollziehbarkeit einzelner Verarbeitungsschritte einschränken kann. Beim entwickelten Messsystem können dagegen Verschaltung, Programmablauf und Datenausgabe vergleichsweise offen nachvollzogen werden. Eine Grenze bleibt jedoch der K30-Sensor selbst: Sein innerer Aufbau ist nicht zugänglich, sodass sich das NDIR-Messprinzip, wie in Abschnitt 6.2.3 dargestellt, nur didaktisch reduziert und nicht vollständig am konkreten Sensor erschließen lässt.

Eine besondere Stärke des entwickelten Messsystems zeigt sich bei der Weiterverarbeitung der Messdaten. Durch den Excel Data Streamer stehen die Messwerte unmittelbar in Excel zur Verfügung und können dort tabellarisch erfasst, graphisch dargestellt und weiterverarbeitet werden. Damit wird an einen Vorteil angeknüpft, den auch Bernstein und Wilhelm (2023a) für den Excel Data Streamer hervorheben: Die Messdaten stehen direkt in Excel zur Verfügung, das im Physikunterricht ohnehin häufig zur Aufnahme und Auswertung von Messdaten eingesetzt wird.

Die Erprobung liefert darüber hinaus erste Hinweise auf die unterrichtliche Umsetzbarkeit. Sie deutet darauf hin, dass das Messsystem insbesondere bei technisch interessierten Lernenden Neugier und Motivation auslösen kann. Ein Grund dafür könnte sein, dass sich der Umgang mit dem Messsystem vom klassischen Experimentieren unterscheidet und für Schülerinnen und Schüler dadurch eine besondere Abwechslung bietet. Aufgrund der kleinen Stichprobe sowie des hohen Betreuungsschlüssels ist diese Beobachtung jedoch mit Vorsicht einzuordnen.

Für den Einsatz im regulären Unterricht als Schülerexperiment ist zu berücksichtigen, dass Fehler beim Aufbau des Messsystems, insbesondere bei der Verkabelung, schnell zu Frustration führen könnten, gerade bei Lernenden mit weniger technischem Vorwissen oder Interesse. Dies würde eine gezielte Unterstützung durch die Lehrkraft erfordern, die bei größeren Lerngruppen nicht immer im gleichen Maße zu leisten ist. Auch vor diesem Hintergrund erscheint die in Abschnitt 6.1 vorgenommene didaktische Reduktion mit klaren

Schwerpunktsetzungen besonders sinnvoll, da fachliche und technische Zusammenhänge für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I nicht unmittelbar zugänglich sind. Denkbar wäre daher, das Messsystem in Projektphasen, etwa im Rahmen von Projektwochen oder Arbeitsgemeinschaften, einzusetzen, da dort mehr Zeit und gegebenenfalls ein höherer Betreuungsschlüssel zur Verfügung stehen. So könnten auch Erweiterungsmöglichkeiten sowie das Programmieren des Sensors vertiefter behandelt werden.

8. Fazit und Ausblick

Die Arbeit hat am Beispiel eines Arduino-basierten CO₂-Messsystems gezeigt, wie Spurengasmessungen im Physikunterricht der Sekundarstufe I umgesetzt werden können.

Das Spurengas CO₂ erweist sich hierfür als besonders geeignet, da es an Alltagserfahrungen von Schülerinnen und Schülern anknüpft und fachliche Inhalte mit Fragen zu Raumluftqualität, Klimawandel und digitaler Messwerterfassung verbindet.

Entscheidend ist dabei eine klare didaktische Schwerpunktsetzung, da das Messsystem fachliche und technische Aspekte umfasst, die für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I nicht vollständig erschlossen werden können. Je nach Unterrichtsziel können so unterschiedliche Kompetenzen adressiert werden, ohne die technische Komplexität des Systems vollständig zum Gegenstand des Unterrichts machen zu müssen.

Für das im Rahmen der Arbeit entwickelte Messsystem lässt sich festhalten, dass der geringe Preis, die hohe Flexibilität und der Einblick in Aufbau und Funktionsweise des Messsystems zentrale Stärken darstellen. Die Diskussion hat jedoch gezeigt, dass diese Vorteile mit einem erhöhten technischen und zeitlichen Vorbereitungsaufwand der Lehrkraft verbunden sind. Dazu zählen insbesondere die Einrichtung und Programmierung des Systems, die Kalibrierung des Sensors sowie praktische Fragen wie Stromversorgung und Schutz der Bauteile.

Der unterrichtliche Mehrwert des entwickelten Messsystems hängt daher wesentlich davon ab, ob seine spezifischen Stärken tatsächlich zum Tragen kommen. Steht vor allem eine möglichst reibungslose Messwerterfassung im Vordergrund, können vorgefertigte Lehrmittelsysteme wie der Vernier-Sensor die naheliegendere Wahl sein. Diese Einordnung lässt sich mit Lück und Wilhelm stützen, die für den gewöhnlichen Schulalltag darauf hinweisen, dass aufgrund der engen Taktung des Lehrbetriebs häufig Effizienz im Vordergrund steht und daher „fertige Lösungen wohl im Allgemeinen die erste Wahl darstellen“ (Lück & Wilhelm, 2023, S. 26). Der entwickelte Low-Cost-Aufbau erscheint dagegen besonders dann sinnvoll, wenn neben der

Messwertaufnahme auch Aufbau, Erweiterbarkeit und digitale Weiterverarbeitung der Messdaten in den Unterricht einbezogen werden sollen. Darauf aufbauend könnten die entwickelten Schwerpunktsetzungen in konkreten Unterrichtsmaterialien ausgearbeitet und in regulären Lerngruppen erprobt werden. Dabei könnten insbesondere der benötigte Zeitrahmen, der Unterstützungsbedarf, die Materialgestaltung und der Umgang mit unterschiedlichen Lernvoraussetzungen genauer untersucht werden. Neben dem Einsatz im regulären Unterricht erscheinen auch Projektwochen oder Arbeitsgemeinschaften als geeignete Kontexte, da dort mehr Zeit für Aufbau, Fehlersuche, Erweiterungen und Programmierung zur Verfügung stehen kann. Darüber hinaus könnte ein genauerer Vergleich mit schulisch aufbereiteten Systemen wie senseBox oder phyphox interessant sein, da diese zwischen unmittelbar einsetzbaren Lehrmittelsystemen und offenen Eigenbau-Lösungen stehen. Auch weitere Spurengase sowie Feinstaub könnten perspektivisch betrachtet werden, sofern geeignete Sensoren für schulische Kontexte verfügbar sind. Fächerübergreifende Bezüge, etwa zur Biologie, Informatik oder Technik, bieten hierfür weitere Anknüpfungspunkte.

Literaturverzeichnis

- Barmer. (2026, 30. April). *Klima-Angst und Klima-Handeln: Ergebnisse der BARMER-Jugendstudie 2025/26*. Abgerufen am 8. Mai 2026, von <https://www.barmer.de/gesundheit-verstehen/mensch/gesundheit-2030/nachhaltigkeit/klima-angst-1072176>
- Bernstein, F., & Wilhelm, T. (2023a). Digitale Messwerterfassung mit Mikrocontrollern: Konnektivität, Datenauswertung, Nutzeroberflächen. In *Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Hannover 2023*.
- Bernstein, F., & Wilhelm, T. (2023b). Digitale Messwerterfassung mit Mikrocontrollern und digitalen Endgeräten: Interaktive Dashboards mit Datastreamer und phyphox gestalten. *Plus Lucis*, (3), 27–30.
- Böttcher Datentechnik GmbH. (o. D.). *CO2-Gas-Sensor* [Produktbild]. Abgerufen am 14. April 2026, von <https://www.taschenrechner.de/shop/artikel/details/CO2-BTA>
- Chen, H., & Markham, J. (2020). Using microcontrollers and sensors to build an inexpensive CO2 control system for growth chambers. *Applications in Plant Sciences*, 8(10), e11393. <https://doi.org/10.1002/aps3.11393>
- Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e. V. (2018). *Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit* [Positionspapier]. <https://pneumologie.de/storage/app/uploads/public/619/e02/6f1/619e026f17e05942939616.pdf>
- Deutscher Wetterdienst. (o. D.). *Spurengase*. Abgerufen am 18. März 2026, von https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/spurengase/spurengase_node.html
- DigiKey. (o. D.). *SENSEAIR K30 FR 2HZ ABC=OFF* [Produktseite]. Abgerufen am 6. Mai 2026, von <https://www.digikey.de/de/products/detail/senseair/030-8-0010/13535296>
- Dorsel, D., Staacks, S., Heinke, H., Stampfer, C., Kuhn, J., & Wilhelm, T. (2022). Visualisierung von Messdaten eigener Sensormodule mit phyphox. *Physik in Unserer Zeit*, 53(3), 151–152. <https://doi.org/10.1002/piuz.202270310>

- ELEGOO. (o. D.). *ELEGOO UNO R3 product overview* [Datenblatt]. Abgerufen am 8. April 2026, von https://epow0.org/~amki/car_kit/Datasheet/ELEGOO%20UNO%20R3%20Board.pdf
- Girwidz, R. (2020). Experimente im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz, & H. E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik | Grundlagen* (4. Aufl.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2_7
- Hartmann, A., Cetin, Y. E., Gastmeier, P., & Kriegel, M. (2024). Praktische Bedeutung von CO₂ als Indikator für die Innenraumluftqualität und die relative inhalierte Dosis virenbeladener Partikel. *Robert-Koch-Institut (RKI)*. <https://doi.org/10.25646/11950>
- Hessisches Kultusministerium. (2024). *Bildungsstandards und Inhaltsfelder: Das neue Kerncurriculum für Hessen: Sekundarstufe I – Gymnasium: Physik*. https://kultus.hessen.de/sites/kultus.hessen.de/files/2024-02/kc_physik_uesekii_201102-uea.pdf
- Hessisches Kultusministerium. (o. D.). *Lehrpläne*. Abgerufen am 6. April 2026, von <https://kultus.hessen.de/unterricht/kerncurricula-und-lehrplaene/lehrplaene>
- Independence Science. (o. D.). *CO₂ Gas Sensor* [Produktbild]. Abgerufen am 11. Mai 2026, von <https://independencescience.com/product/co2-gas-sensor/>
- Karaböcek, F., & Erb, R. (2013). Experimentieren im Physikunterricht: Welche Ziele verbinden Lehrkräfte mit dem Experimentieren? *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/456>
- Kircher, E., & Girwidz, R. (2020). Ziele und Kompetenzen im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz, & H. E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik | Grundlagen* (4. Aufl.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2_3
- Klose, B. (2016). *Meteorologie*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43622-6>
- Kraus, H. (2004). *Die Atmosphäre der Erde: Eine Einführung in die Meteorologie*. Springer.

- Kultusministerkonferenz. (2017). *Strategie der Kultusministerkonferenz „Bildung in der digitalen Welt“* (Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 08.12.2016, in der Fassung vom 07.12.2017).
https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2018/Strategie_Bildung_in_der_digitalen_Welt_idF_vom_07.12.2017.pdf
- Kultusministerkonferenz. (2020). *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife* (Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020).
https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf
- Kultusministerkonferenz. (2024). *Weiterentwickelte Bildungsstandards in den Naturwissenschaften für das Fach Physik (MSA)* (Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 16.12.2004 i. d. F. vom 13.06.2024).
https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2024/2024_06_13-WeBiS_Physik_MSA.pdf
- Lehrstuhl für Didaktik der Physik, LMU München. (o. D.). *CO₂-Gas-Sensoren*. Abgerufen am 6. April 2026, von <https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialien/sensorik/co2-gassensoren/index.html>
- Lück, S., & Wilhelm, T. (2023). Messwerte aufnehmen und verarbeiten. In T. Wilhelm (Hrsg.), *Digital Physik unterrichten: Grundlagen, Impulse und Perspektiven* (S. 14–39). Klett/Kallmeyer.
- Mann, W. (o. D.). *CO₂ im Physikzimmer*. Abgerufen am 2. April 2026, von https://www.rainer.ch/unterlagen/chemie/labor/co2_im_schulzimmer.pdf
- Microsoft. (o. D.). *Was ist Datenstreamer?* Abgerufen am 28. April 2026, von <https://support.microsoft.com/de-de/office/was-ist-datenstreamer-1d52ffce-261c-4d7b-8017-89e8ee2b806f>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (o. D.). *Trends in CO₂ (NOAA Global Monitoring Laboratory)*. Abgerufen am 30. März 2026, von <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

- Paramair GmbH. (2025a). CO2 Engine® K30 FR: *Fast response CO2 sensor module – Standard specification* (Dokument PSH0100, Rev. 4). Abgerufen am 24. Oktober 2025, <https://paramair.de/produkte/k30-fr/>
- Paramair GmbH. (2025b). CO2 Engine® K30 FR: *Fast response CO2 sensor module – Product specification* (Dokument PSP0109, Rev. 6). Abgerufen am 24. Oktober 2025, von <https://paramair.de/produkte/k30-fr/>
- phyphox. (o. D.). *Bausatz für Bluetooth-fähigen CO2-Monitor*. Abgerufen am 13. April 2026, von <https://phyphox.org/de/co2/>
- Pusch, A., Ubben, M. S., Schlummer, P., & Welberg, J. (2024). *Demonstrationsexperimente gestalten: Konzeption und Umsetzung in Theorie und Praxis*. Springer Spektrum.
- Roedel, W., & Wagner, T. (2018). *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*. Springer Spektrum.
- Schumann, D., & Pusch, A. (2019). *Arduino kennenlernen* [Arbeitsblätter]. IDP WWU Münster. https://physikkommunizieren.de/wp-content/uploads/2019/10/Arbeitsbl%C3%A4tter_Arduino_Erlernen_10-2019.pdf
- Science on Stage Deutschland. (o. D.). *CO2MUCH – CO2, Treibhauseffekt und Temperatur*. Abgerufen am 12. April 2026, von <https://www.science-on-stage.de/material/co2much-co2-treibhauseffekt-und-temperatur>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Senseair. (2024). *Single beam vs dual beam CO2 sensors*. Abgerufen am 28. Januar 2026, von <https://senseair.com/single-beam-vs-dual-beam/>
- senseBox Blockly. (o. D.). *Programming environment*. Abgerufen am 14. April 2026, von <https://blockly.sensebox.de/gallery/63b6c8c3d2853f0013b1da67>
- senseBox Docs. (2024). *Software aufspielen und testen*. Abgerufen am 14. April 2026, von <https://docs.sensebox.de/docs/products/co2ampel/aufbau/aufbau-co2ampel-schritt-3/>

- senseBox. (o. D.). *senseBox CO₂-Ampel*. Abgerufen am 12. April 2026, von <https://sensebox.de/de/products-co2>
- Shell Deutschland GmbH. (2024). *Zusammenfassung der Shell Jugendstudie 2024: Jugend 2024: Pragmatisch zwischen Verdrossenheit und gelebter Vielfalt*. https://www.shell.de/about-us/initiatives/shell-youth-study-2024/_jcr_content/root/main/section/simple/call_to_action/links/item0.stream/1730903501282/d8b545435fc2799eb6044e48b4a9fccc80b95b2d/ap-shell-jugendstudie-zusammenfassung-barrierefrei.pdf
- Spektrum der Wissenschaft. (o. D.). *Spurengase*. Abgerufen am 18. März 2026, von <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/spurengase/15428>
- Tybussek, J. S. (2026). *CO₂-Messungen in der Außenluft - Aufbau und Validierung eines Low-Cost-CO₂-Sensors mittels Cavity-Ring-Down-Spektroskopie* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Goethe-Universität Frankfurt am Main.
- Umweltbundesamt. (2008). Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumlufte. *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz*, 51, 1358–1369. <https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2>
- Umweltbundesamt. (2025, 12. Mai). *Studie zum Umweltbewusstsein: Vielfältige Krisen beeinträchtigen die Wahrnehmung von Umwelt- und Klimaherausforderungen* [Pressemitteilung]. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/studie-umweltbewusstsein-vielfaeltige-krisen>
- Umweltbundesamt. (2026a). *Luftqualität 2025: Vorläufige Auswertung (Stand: Februar 2026)*. https://www.umweltbundesamt.de/system/files/document/260210_UBA_HGP_Luftqualitaet_2025_barrierefrei.pdf
- Umweltbundesamt. (2026b). *Warum sind Stickstoffoxide (NO_x) schädlich?* Abgerufen am 24. März 2026, von <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/warum-sind-stickstoffoxide-nox-schaedlich>

- Watzka, B., & Girwidz, R. (2011a). Ist die Luft zu schlecht zum Lernen? Nichtdispersive IR-CO₂-Gassensoren im Physikunterricht. *PhyDid: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1(10), 22–33.
- Watzka, B., & Girwidz, R. (2011b). Kontextorientierte Anker aus der Alltags- und Umweltsensorik: Erste Resultate einer Interventionsstudie. *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Münster 2011*, 1–7. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/294>
- Watzka, B., & Girwidz, R. (2012a). NDIR-CO₂-Gassensoren im Physikunterricht. *PdN Physik in der Schule*, 61(7), 8–15.
- Watzka, B., & Girwidz, R. (2012b). Aufgabenformate und Kontextorientierung beim Physiklernen mit Sensoren: Konkretisierung und empirische Untersuchung am Beispiel des NDIR-CO₂-Gassensors. *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Mainz 2012*, 1–6. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/383>
- Watzka, B., & Girwidz, R. (2015). Einfluss der Kontextorientierung und des Präsentationsmodus von Aufgaben auf den Wissenserwerb und die Transferleistung physikalischer Inhalte. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 21(1), 187–206. <https://doi.org/10.1007/s40573-015-0034-8>
- Watzka, B., & Girwidz, R. (o. D.). *Dicke Luft im Klassenzimmer* [Arbeitsheft]. Pädagogische Hochschule Ludwigsburg; Ludwig-Maximilians-Universität München, Lehrstuhl für Didaktik der Physik. Abgerufen am 2. April 2026, von https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialien/sensorik/co2-gassensoren/arbeitsblaetter/arbeitsheft_multi_raumluft.pdf
- Wetterschule. (2024, 26. September). *Experiment zum Treibhauseffekt – Kohlendioxid als Treibhausgas (Klimakoffer zum Klimawandel)* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=hrT00co7_7s
- Wiegleb, G. (2022). *Gasmesstechnik in Theorie und Praxis: Messgeräte, Sensoren, Anwendungen*. Springer Vieweg.

Witte, V. (2019). *senseBox: Eine Handreichung für Lehrkräfte* (Version 1.0).
Reedu GmbH & Co. KG – home of senseBox.
https://sensebox.de/docs/lehrkraefte_senseBox_de.pdf

Abkürzungsverzeichnis

DGP	Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin
DWD	Deutscher Wetterdienst
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
KMK	Kultusministerkonferenz
LDP	Lehrstuhl für Didaktik der Physik der LMU München
LQI	Luftqualitätsindex
NDIR	Non-Dispersive Infrared
ppb	parts per billion
ppm	parts per million
ppt	parts per trillion
UBA	Umweltbundesamt

Anhang

A.1 Ergänzende Abbildungen

A.1.1 Programmieroberfläche senseBox Blockly



Abbildung 26: Screenshot der graphische Programmieroberfläche namens senseBox Blockly. Quelle: senseBox Blockly (2026).

A.1.2 Detailfotos des Messsystemaufbaus

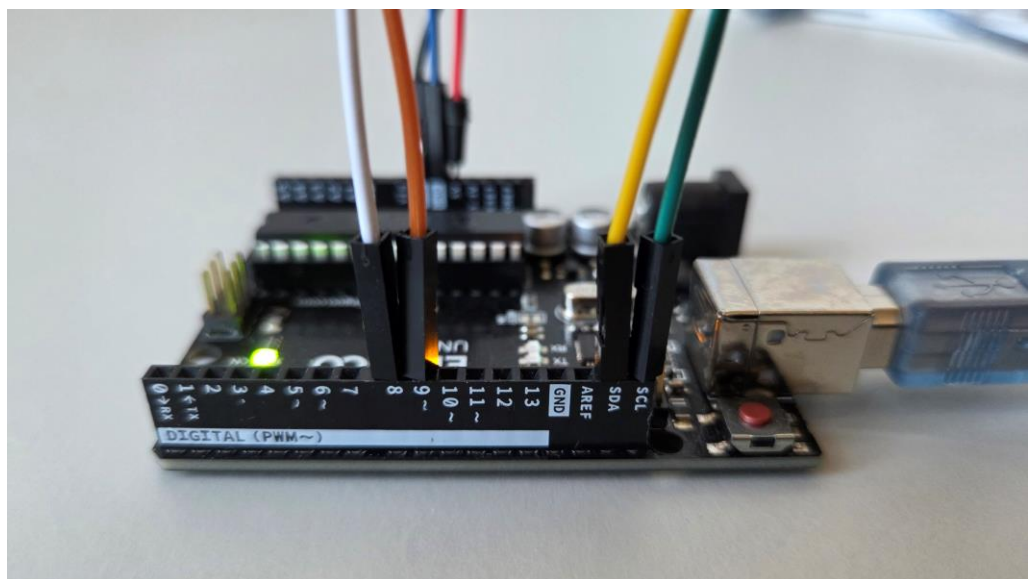


Abbildung 27: Belegung der digitalen Ein- und Ausgänge sowie des I²C-Anschlusses des Mikrocontrollerboards.

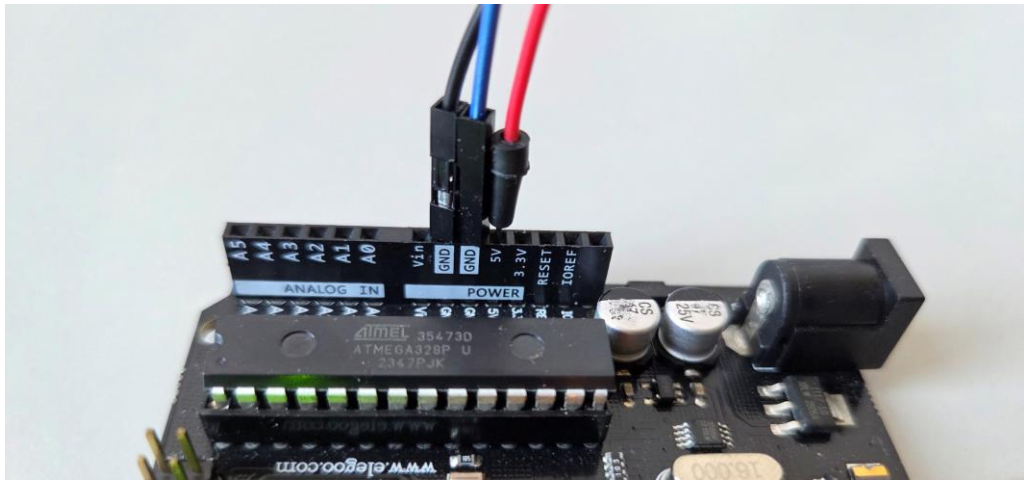


Abbildung 28: Belegung der Versorgungsanschlüsse des Mikrocontrollerboards.

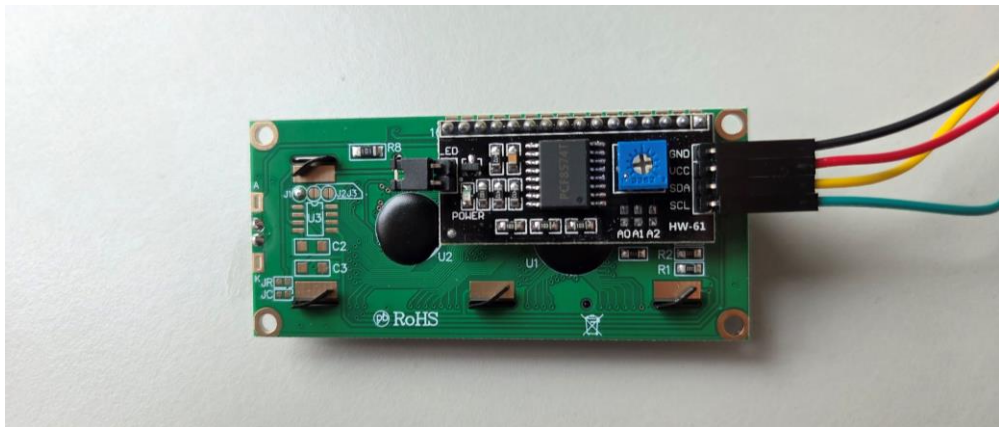


Abbildung 29: Anschlussverkabelung des LCD-Displays mit I²C-Schnittstelle.

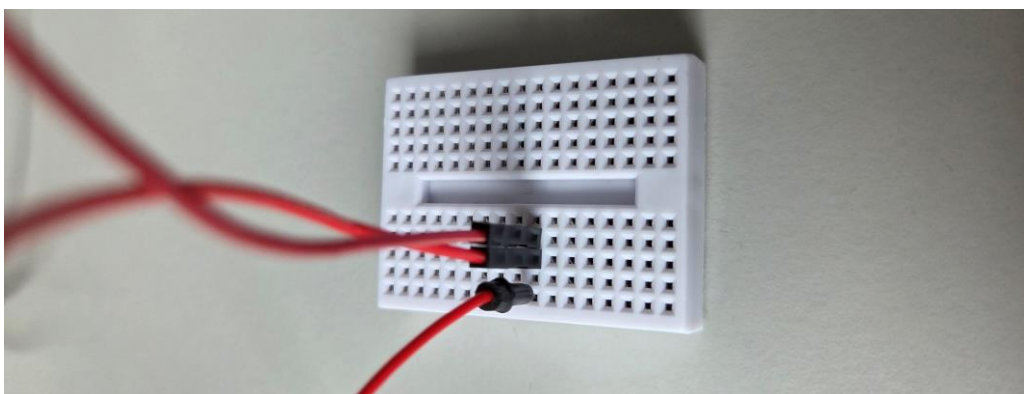


Abbildung 30: Verteilung der 5-V-Versorgung über das Breadboard.

A.2 Sketch des CO₂-Messsystems

```

1  /*
2  * Projekt: WHA-Messsystem
3  * Autor: Jonas Tybussek
4  * Dateiname: K30_LCD_WHA_Excel.ino
5  * * Beschreibung:
6  * Dieser Sketch liest das CO2-Mischungsverhältnis (SenseAir K30) aus
7  * und gibt den Messwert ohne Einheit am Serial Monitor
8  * für den Excel Data Streamer sowie am LCD-Display aus.
9  * * Hardware:
10 * - Arduino Board (Uno)
11 * - SenseAir K30 (via SoftwareSerial an Pin 8 (RX) und 9 (TX))
12 * - 16x2 LCD-Display mit I2C
13 */
14 #include <Wire.h>
15 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
16 #include <SoftwareSerial.h>
17 #include <avr/wdt.h>
18
19 // --- LCD über I2C ---
20 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
21
22 // --- Konfiguration K30 (CO2 Sensor) ---
23 const uint8_t K30_RX_PIN = 8; // Verbunden mit K30 TX
24 const uint8_t K30_TX_PIN = 9; // Verbunden mit K30 RX
25 SoftwareSerial k30Serial(K30_RX_PIN, K30_TX_PIN);
26
27 // Befehl: Read CO2 (7 Bytes laut SenseAir Kommunikationsprotokoll)
28 const byte readCO2_cmd[] = { 0xFE, 0x44, 0x00, 0x08, 0x02, 0x9F, 0x25 };
29 byte k30_response[7];
30
31
32
33 // --- Messintervall ---
34 const unsigned long MEAS_INTERVAL_MS = 1000;
35
36 /**
37 * Liest den CO2-Wert vom K30 Sensor via SoftwareSerial.
38 * Return: true bei Erfolg, false bei Timeout/Fehler.
39 */
40 bool readK30CO2(unsigned long *co2_ppm) {
41 // Serial Buffer Leeren

```

```
42 while (k30Serial.available()) {
43     k30Serial.read();
44 }
45
46 // Befehl senden (mit Retry-Logik)
47 int tries = 0;
48 while (!k30Serial.available() && tries < 10) {
49     k30Serial.write(readCO2_cmd, 7);
50     delay(50);
51     tries++;
52 }
53
54 if (!k30Serial.available()) {
55     return false;
56 }
57
58 // Warten auf vollständige Antwort (7 Bytes)
59 int timeout = 0;
60 while (k30Serial.available() < 7 && timeout < 10) {
61     delay(50);
62     timeout++;
63 }
64
65 if (k30Serial.available() < 7) {
66     // Unvollständige Antwort verwerfen
67     while (k30Serial.available()) {
68         k30Serial.read();
69     }
70     return false;
71 }
72
73 // Antwort einlesen
74 for (int i = 0; i < 7; i++) {
75     k30_response[i] = k30Serial.read();
76 }
77
78 // Berechnung Laut Datenblatt (High Byte * 256 + Low Byte)
79 int high = k30_response[3];
80 int low = k30_response[4];
81
82 *co2_ppm = (unsigned Long)high * 256UL + (unsigned Long)low;
83 return true;
84 }
```

```
85
86 void setup() {
87     MCUSR = 0;
88     wdt_disable(); // Watchdog während Setup deaktivieren
89
90     Serial.begin(9600);
91     k30Serial.begin(9600);
92
93     lcd.init();
94     lcd.backlight();
95     lcd.clear();
96     lcd.setCursor(0, 0);
97     lcd.print("CO2 Messung");
98     lcd.setCursor(0, 1);
99     lcd.print("Start...");
100
101     Serial.println(F("Starte K30 CO2 Messung"));
102
103     wdt_enable(WDTO_8S); // Watchdog aktivieren (8 Sekunden)
104 }
105
106 void loop() {
107     wdt_reset();
108
109     static unsigned long last_meas = 0;
110     unsigned long now_ms = millis();
111
112     if (now_ms - last_meas < MEAS_INTERVAL_MS) return;
113     last_meas = now_ms;
114
115     unsigned long co2_ppm = 0;
116     bool k30_success = readK30CO2(&co2_ppm);
117
118     // Ausgabe im Serial Monitor
119     if (k30_success) {
120         Serial.println(co2_ppm);
121     } else {
122         Serial.println(F("NaN"));
123     }
124
125     // Ausgabe auf LCD
126     lcd.setCursor(0, 0);
127     lcd.print("CO2 Messung      ");
```

```
128
129  lcd.setCursor(0, 1);
130  lcd.print("          ");
131  lcd.setCursor(0, 1);
132
133  if (k30_success) {
134      lcd.print(co2_ppm);
135      lcd.print(" ppm");
136  } else {
137      lcd.print("Messfehler");
138  }
139 }
140
```

A.3 Sketch Lückentext

```

1  /*
2  * Projekt: WHA-Erprobung
3  * Autor: Jonas Tybussek
4  * Dateiname: K30_BME280_SD_Lueckentext.ino
5  * * Beschreibung:
6  * Dieser Sketch liest CO2-Mischungsverhältnis (SenseAir K30)
7  * und Zeitstempel (RTC DS1307) aus
8  * und speichert die Daten im CSV-Format auf einer SD-Karte.
9  * * Hardware:
10 * - Arduino Board (Uno)
11 * - SenseAir K30 (via SoftwareSerial an Pin 8 (RX) und 9 (TX))
12 * - Data Logger Shield (SD + RTC DS1307)
13 */
14 // Lückentext
15
16 #include <Wire.h>
17 #include <RTCLib.h>
18 #include <SPI.h>
19 #include <SD.h>
20 #include <SoftwareSerial.h>
21 #include <Adafruit_Sensor.h>
22 #include <Adafruit_BME280.h>
23 #include <avr/wdt.h>
24
25 // --- Konfiguration K30 (CO2 Sensor) ---
26 const uint8_t K30_RX_PIN = _____; // Verbunden mit K30 TX
27 const uint8_t K30_TX_PIN = _____; // Verbunden mit K30 RX
28 SoftwareSerial k30Serial(K30_RX_PIN, K30_TX_PIN);
29
30 // Befehl: Read CO2 (7 Bytes laut SenseAir Kommunikationsprotokoll)
31 byte readCO2_cmd[] = { 0xFE, 0x44, 0x00, 0x08, 0x02, 0x9F, 0x25 };
32 byte k30_response[7];
33 const int K30_VAL_MULTIPLIER = 1;
34
35 // Globale Variablen für Rohwerte (Debugging)
36 int raw_high = 0;
37 int raw_low = 0;
38
39 // --- Konfiguration BME280 (Umweltsensor) ---
40 Adafruit_BME280 bme;
41 bool bme_ok = false;

```

```
42 #define SEALEVELPRESSURE_HPA 1013.25
43
44 // --- Messintervall ---
45 const unsigned long MEAS_INTERVAL_MS = _____; // z.B. 1000 = 1 Sekunde
46
47 // --- Konfiguration Data Logger Shield ----
48 const int chipSelect = 10;
49 const char filename[] = "_____.csv"; // eigener Dateiname
50 bool sd_ok = false;
51 RTC_DS1307 rtc;
52
53 /**
54  * Liest den CO2-Wert vom K30 Sensor via SoftwareSerial.
55  * Return: true bei Erfolg, false bei Timeout/Fehler.
56  */
57 bool readK30CO2(unsigned long *co2_ppm) {
58     // Serial Buffer Leeren
59     while (k30Serial.available()) {
60         k30Serial.read();
61     }
62
63     // Befehl senden (mit Retry-Logik)
64     int tries = 0;
65     while (!k30Serial.available() && tries < 10) {
66         k30Serial.write(readCO2_cmd, 7);
67         delay(50);
68         tries++;
69     }
70
71     if (!k30Serial.available()) {
72         return false;
73     }
74
75     // Warten auf vollständige Antwort (7 Bytes)
76     int timeout = 0;
77     while (k30Serial.available() < 7 && timeout < 10) {
78         delay(50);
79         timeout++;
80     }
81
82     if (k30Serial.available() < 7) {
83         // Unvollständige Antwort verwerfen
84         while (k30Serial.available()) {
```

```
85     k30Serial.read();
86   }
87   return false;
88 }
89
90 //Antwort einlesen
91 for (int i = 0; i < 7; i++) {
92     k30_response[i] = k30Serial.read();
93 }
94
95 // Berechnung laut Datenblatt (High Byte * 256 + Low Byte)
96 int high = k30_response[3];
97 int low = k30_response[4];
98
99 raw_high = high;
100 raw_low = low;
101
102 unsigned long val = (unsigned long)high * 256UL + (unsigned long)low;
103 *co2_ppm = val * K30_VAL_MULTIPLIER;
104 return true;
105 }
106
107
108
109 void setup() {
110
111     MCUSR = 0;
112     wdt_disable(); // Watchdog während Setup deaktivieren
113
114     Serial.begin(9600);
115     Serial.println(F("Starte K30 + BME280 + RTC + SD Logger"));
116
117     k30Serial.begin(9600);
118
119     // --- RTC ---
120     if (!rtc.begin()) {
121         Serial.println(F("Fehler: RTC nicht gefunden!"));
122     } else {
123         if (!rtc.isrunning()) {
124             Serial.println(F("Warnung: RTC läuft nicht (Zeit nicht gesetzt)."));
125         } else {
126             Serial.println(F("RTC bereit."));
127         }
128     }
129 }
```

```

128 }
129
130 // --- BME280 ---
131 if (bme.begin(0x77)) {
132     bme_ok = true;
133     Serial.println(F("BME280 bereit"));
134 } else {
135     Serial.println(F("Fehler: BME280 nicht gefunden"));
136 }
137
138 // --- SD ---
139 if (!SD.begin(chipSelect)) {
140     Serial.println(F("Fehler: SD-Karte fehlgeschlagen!"));
141     sd_ok = _____;
142 } else {
143     Serial.println(F("SD-Karte bereit."));
144     sd_ok = _____;
145
146     // Header in CSV schreiben, falls Datei neu
147     if (!SD.exists(filename)) {
148         File f = SD.open(filename, FILE_WRITE);
149         if (f) {
150             f.println(F("Zeit.UTC;CO2_ppm;Raw_High;Raw_Low;T_C;RH_pct;P_hPa;Alt_m"));
151             f.close();
152             Serial.println(F("Datei erstellt."));
153         } else {
154             Serial.println(F("Konnte k30_bme.csv nicht anlegen!"));
155         }
156     } else {
157         Serial.println(F("Datei existiert, haenge an."));
158     }
159 }
160
161 wdt_enable(WDTO_8S); // Watchdog aktivieren (8 Sekunden)
162 }
163
164
165
166 void loop() {
167
168     wdt_reset();
169
170     if (!sd_ok) {

```

```

171     Serial.println(F("SD nicht verfuegbar"));
172     delay(1000);
173     return;
174 }
175
176 static unsigned Long last_meas = 0;
177 unsigned Long now_ms = millis();
178
179 if (now_ms - last_meas < MEAS_INTERVAL_MS) return;
180 last_meas = now_ms;
181
182 // Reset Fehlerwerte
183 raw_high = -1;
184 raw_low = -1;
185
186 // 1. Messung: CO2
187 unsigned Long co2_ppm = 0;
188 bool k30_success = readK30CO2(&co2_ppm);
189
190 if (!k30_success) {
191     Serial.println(F("K30 Messfehler (NaN geloggt)"));
192 }
193
194 // Warnung bei hoher CO2-Konzentration
195 if (k30_success && co2_ppm > _____) {
196     Serial.println(F("_____"));
197 }
198
199
200 // 2. Messung: BME280
201 float T = NAN, RH = NAN, P = NAN, Alt = NAN;
202 if (bme_ok) {
203     T = bme.readTemperature();
204     RH = bme.readHumidity();
205     P = bme.readPressure() / 100.0F;
206     Alt = bme.readAltitude(SEALEVELPRESSURE_HPA);
207 }
208
209 // 3. Zeitstempel holen
210 DateTime now = rtc.now();
211
212 // 4. Debug Ausgabe auf Serial
213 Serial.print(F("UTC "));

```

```

213 Serial.print(now.year());
214 Serial.print('-');
215 if (now.month() < 10) Serial.print('0');
216 Serial.print(now.month());
217 Serial.print('-');
218 if (now.day() < 10) Serial.print('0');
219 Serial.print(now.day());
220 Serial.print('T');
221 if (now.hour() < 10) Serial.print('0');
222 Serial.print(now.hour());
223 Serial.print(':');
224 if (now.minute() < 10) Serial.print('0');
225 Serial.print(now.minute());
226 Serial.print(':');
227 if (now.second() < 10) Serial.print('0');
228 Serial.print(now.second());
229 Serial.print(F("Z | "));
230
231 Serial.print(F("CO2="));
232 Serial.print(co2_ppm);
233 Serial.print(F(" ppm | T="));
234 Serial.print(T);
235 Serial.print(F(" C | RH="));
236 Serial.print(RH);
237 Serial.print(F(" % | P="));
238 Serial.print(P);
239 Serial.print(F(" hPa | Alt="));
240 Serial.print(Alt);
241 Serial.println(F(" m"));
242
243
244 // 5. Daten auf SD speichern
245
246 File dataFile = SD.open(filename, FILE_WRITE);
247 if (dataFile) {
248
249     // ISO-8601 Format: YYYY-MM-DDTHH:MM:SSZ
250     dataFile.print(now.year());
251     dataFile.print('-');
252     if (now.month() < 10) dataFile.print('0');
253     dataFile.print(now.month());
254     dataFile.print('-');
255     if (now.day() < 10) dataFile.print('0');

```

```
256     dataFile.print(now.day());
257     dataFile.print('T');
258     if (now.hour() < 10) dataFile.print('0');
259     dataFile.print(now.hour());
260     dataFile.print(':');
261     if (now.minute() < 10) dataFile.print('0');
262     dataFile.print(now.minute());
263     dataFile.print(':');
264     if (now.second() < 10) dataFile.print('0');
265     dataFile.print(now.second());
266     dataFile.print('Z');
267     dataFile.print("_____"); // CSV-Trennzeichen
268
269     // CO2 (Entweder Wert oder NaN)
270     if (k30_success) {
271         dataFile.print(co2_ppm);
272     } else {
273         dataFile.print("_____"); // Fehlerwert
274     }
275     dataFile.print(';');
276
277     dataFile.print(raw_high);
278     dataFile.print(';');
279     dataFile.print(raw_low);
280     dataFile.print(';');
281     dataFile.print(T);
282     dataFile.print(';');
283     dataFile.print(RH);
284     dataFile.print(';');
285     dataFile.print(P);
286     dataFile.print(';');
287     dataFile.println(Alt);
288
289     dataFile.close();
290
291     Serial.print(F("Auf SD geschrieben (UTC): "));
292     Serial.print(now.year());
293     Serial.print('-');
294     Serial.print(now.month());
295     Serial.print('-');
296     Serial.print(now.day());
297     Serial.print(' ');
298     Serial.print(now.hour());
```

```
299     Serial.print(':');
300     Serial.print(now.minute());
301     Serial.print(':');
302     Serial.println(now.second());
303
304 } else {
305     Serial.println(F("Fehler: Kann Datei nicht öffnen"));
306 }
307 }
308
```

A.4 Material zur Erprobung des Messsystems

Aufbau

K 30	Uno R3	BME280	Uno R3
G+	5V	VIN	5V
G0	GND	GND	GND
TxD	D8	SCK	A5
RxD	D9	SDI	A4

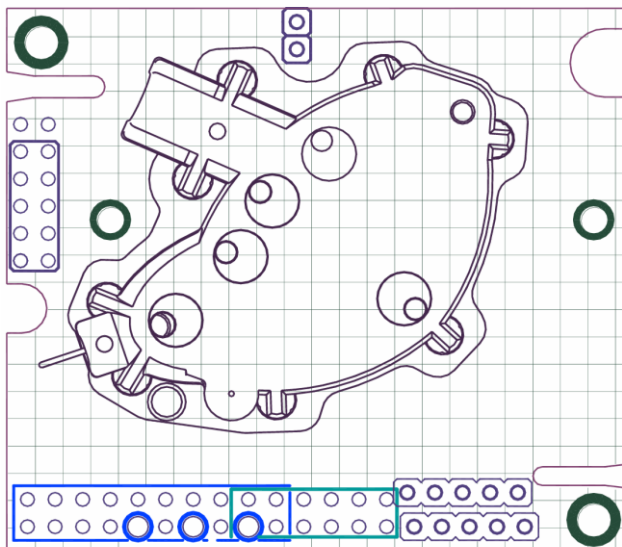
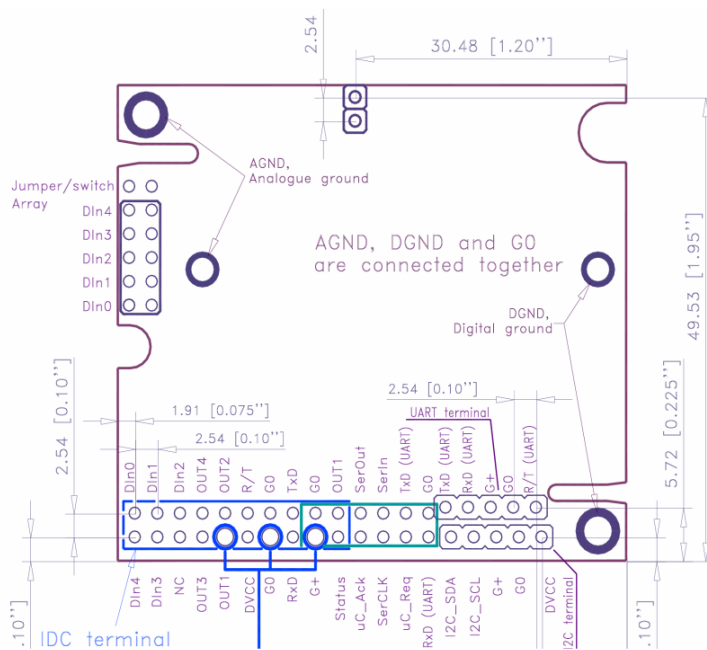


Abbildung 31: Übersicht der Leiterplatte (PCB) des K30-Sensormoduls mit beschrifteten Anschlüssen und Schnittstellen (oben) sowie schematische Darstellung des Sensoraufbaus mit Position der optischen Baugruppe (OBA) (unten). Paramair GmbH (2025a, S.5).

Verständnisfragen zum Code

1 Welche Sensoren werden im Programm verwendet und was messen sie?

Lösung:

2 Warum misst das Programm in einem festen Zeitintervall?

Lösung:

3 Wo im Code wird festgelegt, wie oft gemessen wird?

Lösung:

4 Warum werden die Daten auf einer SD-Karte gespeichert?

Lösung:

5 Was passiert, wenn die SD-Karte nicht funktioniert?

Lösung:

6 Warum wird vor dem Lesen des CO₂-Sensors der Serial-Buffer geleert?

```
while (k30Serial.available()) {  
    k30Serial.read();  
}
```

Lösung:

7 Warum wird bei einem Fehler „NaN“ gespeichert und nicht 0?

Lösung:

Mess- & Datenverständnis

8 Warum wird ein Zeitstempel zu jeder Messung gespeichert?

Lösung:

9 Warum wird UTC-Zeit verwendet?

Lösung:

10 Warum wird CSV als Dateiformat benutzt?

Lösung:

11 Warum steht im Code ein CSV-Header?

`Zeit.UTC;CO2_ppm;Raw_High;Raw_Low;...`

Lösung:

12 Warum wird der Watchdog aktiviert?

Lösung:

13 Warum wird geprüft, ob die Datei schon existiert?

Lösung:

Weiteres

14 Was passiert, wenn man das Messintervall stark verkürzt, zum Beispiel auf 10 ms?

Lösung:

15 Was passiert ohne RTC?

Lösung:

16 Was passiert ohne Sensor?

Lösung:

17 Wie erkennt man einen Sensordefekt anhand der Daten?

Lösung:

18 Wie reagieren die Messgrößen auf das Öffnen des Fensters?

Lösung:

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet und sämtliche Stellen, die anderen Druckwerken oder digitalisierten Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, in jedem einzelnen Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht habe. Insbesondere versichere ich, dass ich sämtliche Stellen, die unter Zuhilfenahme von KI-Tools verfasst wurden, entsprechend gekennzeichnet sowie mit einem Hinweis auf das verwendete KI-Tool und die verwendeten Prompts versehen habe. Die Versicherung gilt auch für verwendete Zeichnungen, Skizzen, Notenbeispiele sowie bildliche und sonstige Darstellungen.

Frankfurt am Main den, 12.05.2026

(Jonas Tybussek)