

Seminararbeit

Rahmenthema des Wissenschaftspropädeutischen Seminars:

Technische und Analytische Chemie

Leitfach:

Chemie

Thema der Arbeit:

Entwicklung eines Messgeräts zur Analyse der Kohlenstoffdioxid-Konzentration in Klassenräumen

Verfasser:

Philipp Jurašić

Kursleiter:

Abgabetermin:

06.November 2018

Bewertung	Note	Notenstufe in Worten	Punkte		Punkte
schriftliche Arbeit				x 3	
Abschlusspräsentation				x 1	
Summe:					
Gesamtleistung nach § 61 (7) GSO = Summe : 2 (gerundet)					

Datum und Unterschrift des Kursleiters

Inhalt

1. 3
2. **Error! Bookmark not defined.**
 - 2.1. **Error! Bookmark not defined.**
 - 2.1.1. **Error! Bookmark not defined.**
 - 2.1.2. **Error! Bookmark not defined.**
 - 2.1.3. **Error! Bookmark not defined.**
 - 2.1.4. **Error! Bookmark not defined.**
 - 2.2. **Error! Bookmark not defined.**
3. **Error! Bookmark not defined.**
 - 3.1. **Error! Bookmark not defined.**
 - 3.1.1. **Error! Bookmark not defined.**
 - 3.1.2. **Error! Bookmark not defined.**
 - 3.1.3. **Error! Bookmark not defined.**
 - 3.1.4. **Error! Bookmark not defined.**
 - 3.1.5. **Error! Bookmark not defined.**
 - 3.2. **Error! Bookmark not defined.**
 - 3.2.1. **Error! Bookmark not defined.**
 - 3.2.2. **Error! Bookmark not defined.**
 - 3.2.3. **Error! Bookmark not defined.**
 - 3.3. **Error! Bookmark not defined.**
4. **Error! Bookmark not defined.**
 - 4.1. **Error! Bookmark not defined.**
 - 4.2. **Error! Bookmark not defined.**
5. **Error! Bookmark not defined.**
 - 5.1. 14
 - 5.2. 14
 - 5.2.1. **Error! Bookmark not defined.**
 - 5.2.2. **Error! Bookmark not defined.**
 - 5.2.3. **Error! Bookmark not defined.**
 - 5.2.4. **Error! Bookmark not defined.**
 - 5.2.5. **Error! Bookmark not defined.**
 - 5.3. **Error! Bookmark not defined.**
 - 5.4. **Error! Bookmark not defined.**
 - 5.5. **Error! Bookmark not defined.**
 - 5.6. **Error! Bookmark not defined.**
6. 22
7. 24
8. **Error! Bookmark not defined.**
9. 33

1. Einleitung

Der Mensch hat sich in seinen sieben Millionen Jahren Entwicklungszeit an Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen von 180 - 300 ppm optimal angepasst. Doch infolge der industriellen Revolution und der Verbrennung fossiler Brennstoffe ist seit 1950 die durchschnittliche atmosphärische CO₂-Konzentration auf 411 ppm¹ angestiegen. Während Korallenriffe und Schalenweichtiere stark unter der resultierenden Versäuerung der Weltmeere leiden, da die Kohlensäure ihre Kalkskelette und -panzer abbaut, ist der Mensch bislang von derartigen, direkten Folgen verschont geblieben. Doch in den Innenräumen von Gebäuden, in denen die Bevölkerung der Industrieländer 80 - 90 % ihrer Zeit verbringt² herrschen häufig Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen von über 3.000 ppm.³ Wie sich das auf mentale Fähigkeiten auswirkt, ist bereits 2012 in einer auf Schüler fokussierten Studie untersucht worden, die eine Halbierung der Fehler in bestimmten Aufgabenbereichen feststellen konnte, nachdem die durchschnittliche CO₂-Konzentration im Raum von über 2.000 ppm auf 1.045 ppm gesenkt worden ist⁴. In Anbetracht der langen Zeit, die Kinder und Jugendliche in der Schule verbringen, sowie der steigenden Relevanz von Bildung in der modernen Arbeitswelt, sollte besonders in diesem Bereich die Regulierung der Luftqualität, insbesondere der CO₂-Konzentration, eine höhere Priorität erhalten. Um genauere Aussagen über die notwendigen Änderungen im Lüftungsverhalten treffen zu können, beschäftigt sich die folgende Arbeit mit der Messung der Kohlenstoffdioxid-Konzentration im Stundenverlauf, sowie der Berechnung optimaler Lüftungsintervalle. Außerdem wird ein kostengünstiges Warngerät auf Basis eines elektrochemischen Gassensors für den Einsatz im Unterricht entwickelt. Durch die Verbesserung des Lüftungsverhaltens wird eine Aufmerksamkeitssteigerung der Schüler erwartet, um Lerninhalte effektiver vermitteln zu können und ihre schulischen Leistungen zu steigern.

2. Theoretische Aufarbeitung der Seminararbeit

In dieser Arbeit wird eine Kombination aus Temperatur- und elektrochemischen Sensoren sowie einem optischen Sensor als Referenz dazu verwendet, das Lüftungsverhalten in Klassenräumen zu analysieren und ein kostengünstiges Warngerät zur Erkennung von zu hohem CO₂-Gehalt zu entwickeln. Zur besseren Verständlichkeit der Arbeit, werden im

¹ Stand vom Juni 2018, vgl. (Earth's CO₂ Home Page, 2007)

² Vgl. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2016)

³ Vgl. (Lahrz Thomas, 2008)

⁴ Vgl. (Fromme, 2012)

Folgenden die Funktionsweisen der verwendeten Sensoren erläutert und die negativen Effekte von CO₂ auf kognitive Anforderungsbereiche des Menschen wie beispielsweise Informationsverarbeitung oder strategische Denkweise vorgestellt.

1.1. Prinzipielle Funktionsweise der verwendeten Sensoren

1.1.1. Elektrochemische Gassensoren

Elektrochemische Gassensoren enthalten einen Halbleiter, der bei Oxidation seinen elektrischen Widerstand verändert. Die Aktivierungsenergie für die Reaktion wird dem Sensor in Form von Wärme zugeführt, sodass Gase und Dämpfe an der Oberfläche des Halbleiters leichter reagieren können. Abhängig von der Konzentration der jeweiligen Gase in der Luft verschiebt sich das Gleichgewicht der Reaktion, was eine entsprechende Widerstandsveränderung des Halbleiters hervorruft. Nachteile dieser Art der Gassensoren sind ihre Temperaturabhängigkeit und Untauglichkeit einzelne Gase dediziert zu detektieren, da verschiedene Stoffe dieselbe Widerstandsänderung erzeugen. Jedoch kann über den Einsatz von Katalysatoren oder Filtern eine Verschiebung des Reaktionsgleichgewichts zum Vorteil bestimmter Gase bewirkt werden, sodass der Sensor intensiver auf diese anspricht.

1.1.2. Thermistoren

Thermistoren sind elektrische Widerstände, deren variable Resistenz sich in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur stark und reproduzierbar ändert. Aus dem gemessenen Widerstand lässt sich anschließend die Temperatur berechnen. Bei Thermistoren wird zwischen zwei Hauptgruppen unterschieden, denen mit negativen Temperatur Koeffizienten (NTC) oder positiven Temperatur Koeffizienten (PTC). Während NTC Thermistoren mit steigender Temperatur ihren Widerstand verringern, (Heißleiter) steigt der Widerstand von PTC Thermistoren (Kaltleitern) mit dem Temperaturgraphen.

1.1.3. Optische Gassensoren

Optische Gassensoren, auch nicht dispersive Infrarotabsorptionssensoren (NDIR) genannt, basieren auf dem Prinzip der Spektralphotometrie⁵. Bei dieser wird über die absorbierte Lichtintensität bei bestimmten Wellenlängen über den Abgleich mit bekannten Absorptionskurven eine sowohl qualitative als auch quantitative Bestimmung von Stoffen durchgeführt. Da optische Kohlenstoffdioxid-Sensoren nur einen einzelnen Stoff detektieren müssen, werden sowohl Lichtquelle als auch Photowiderstand auf das Absorptionsspektrum von CO₂ abgestimmt. Kohlenstoffdioxid hat das höchste Absorptionsmaximum im infraroten

⁵ Vgl. (Harris, 2014)

Bereich⁶, sodass eine entsprechende LED passender Wellenlänge als Lichtquelle verwendet wird. Optische Gassensoren haben eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit, da es weder mechanischen noch chemischen Verschleiß gibt.

1.1.4. Feuchtesensoren

Feuchtesensoren bestehen aus einem nichtleitenden Substrat, das mit einem Salz beschichtet ist. Mit Anstieg der Feuchtigkeit löst sich ein Teil des Salzes und die hydratisierten Ionen fungieren als Ladungsträger zwischen den beiden Elektroden an den gegenüberliegenden Enden des Sensors. Je höher die Feuchtigkeit, desto geringer ist der resultierende Widerstand, da mehr Ladungsträger für den Elektronentransfer verfügbar sind.

1.2. Auswirkungen von Kohlenstoffdioxid auf die menschliche Konzentrationsfähigkeit

Mehrere Studien belegen die negativen Auswirkungen von erhöhten CO₂-Konzentrationen auf diverse Kompetenzbereiche⁷. Beispielsweise vermerkt eine Studie aus 2012 eine Reduktion in der Aktivität der Probanden von 34 %, nachdem die durchschnittliche Kohlenstoffdioxid-Konzentration von 600 auf 2.500 ppm gehoben worden ist. Komplexere und abstrakte Anforderungsbereiche wie Informationsnutzung erfahren eine Verschlechterung von 60 %, strategisches Denken sogar von 93,2 %⁸. Eine andere Arbeit, die sich spezifisch mit den Effekten von unterschiedlichen Lüftungsverhalten auf Schüler beschäftigt, hat eine Verbesserung von 50 % in der Fähigkeit Anagramme aus fünf Buchstaben zu lösen festgestellt, indem die durchschnittliche Kohlenstoffdioxid-Konzentration von >2.000 ppm auf 1.000 ppm gesenkt worden ist⁹. Ein positiver Nebeneffekt des verbesserten Lüftungsverhaltens war in beiden Fällen eine Reduktion der wahrgenommenen Müdigkeit und Kopfschmerzen unter den Probanden.

⁶ Absorptionsmaxima bei 2.000 nm, 4.500 nm und 15.000 nm, vgl. (Plyler, 1951)

⁷ Vgl. (Allen Joseph G., 2015)

⁸ Vgl. (Satish Usha, 2012)

⁹ Vgl. (ECOthinkGroup, n.d.)

2. Material und Methoden

2.1. Verwendete Hardware

Das in dieser Arbeit entwickelte Messgerät besteht aus einem Mikrocontroller, der die Daten mehrerer Sensoren sammelt und diese zur weiteren Auswertung an einen Rechner sendet. Einige der Komponenten sind redundant, damit in einer späteren Entwicklungsphase diejenigen Sensoren, die am besten geeigneten sind, für eine kostenoptimierte Version selektiert werden können.

2.1.1. Arduino Nano Mikrocontroller

Der Arduino Nano Mikrocontroller ist mit seinem auf 16 Mhz getakteten ATmega328 Prozessor die zentrale Recheneinheit des Messgeräts und stellt die Schnittstelle zwischen angeschlossenem Rechner und den einzelnen Sensoren dar. Der Arduino besitzt 8 analoge Ein- oder Ausgänge, die an einen 10-bit¹⁰ Analog-zu-Digital-Konverter (ADC) angeschlossen sind, sowie weitere digitale Ein- und Ausgabekontakte. Der Arduino kann über die serielle USB Schnittstelle sowohl mit anderen Modulen kommunizieren als auch programmiert werden. Neben den 32 kB programmierbaren Flash-EEPROM ist ein weiterer Kilobyte nicht volatiler¹¹ EEPROM Speicher auf dem Mikroprozessor verbaut, in dem Daten zwischen Messungen gespeichert werden können.



Abb. 1: Arduino Nano Mikrocontroller

2.1.2. DS18B20 Temperatursensor

¹⁰ 10-bit Auflösung bei 5V Betriebsspannung entsprechen 1024 Schritten mit je 4,9 mV.

¹¹ Die gespeicherten Daten bleiben im Gegensatz zu volatilen Speicher auch nach Stromverlust erhalten.

Der DS18B20 Temperatursensor enthält neben dem NTC Thermistor zur Temperaturmessung einen Mikroprozessor, der die am variablen Widerstand abfallende Spannung misst und in °C konvertiert. Das digitalisierte Signal wird anschließend über den im parasitären¹² Betrieb laufenden Kommunikationskontakt an den Arduino gesendet. Indem die Spannung am Thermistor bereits im Sensor ausgelesen wird, können bei analogen Systemen vorherrschende Fehlerquellen, wie Kontaktwiderstände oder induzierte Ströme vermieden werden. Dadurch erreicht er eine hohe Auflösung von 12-bit¹³ und eine mittlere Abweichung von nur 0,2 °C.

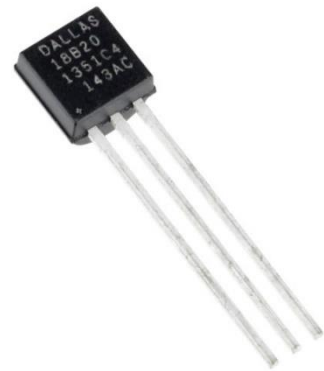


Abb. 2: DS18B20
Temperatursensor

2.1.3. DHT11 Feuchte- und Temperatursensor

Der DHT11 Sensor enthält einen Feuchtesensor und einen Thermistor, die beide, ähnlich wie beim oben genannten DS18B20 bereits auf dem Chip ausgelesen werden, um anschließend die berechneten Temperatur- und relativen Feuchtigkeitswerte digital auszugeben. Sein vorgesehener Temperaturmessbereich liegt zwischen 0 und 50 °C mit einer Auflösung und Genauigkeit von 1 °C. Relative Luftfeuchtigkeit kann mit einer Abweichung von 4 % in einem Bereich von 20 bis 90 % gemessen werden.

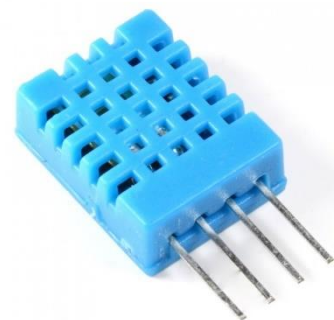


Abb. 3: DHT11 Feuchte- und
Temperatursensor

2.1.4. MH-Z19 optischer Gassensor

¹² Ein Anschluss dient gleichzeitig der Kommunikation und der Stromversorgung.

¹³ Das entspricht bei einem Messbereich von -55 °C – 125 °C einer Schrittgröße von <0,05 °C.

Der MH-Z19 Sensor besteht aus einer mit einem Bandpassfilter¹⁴ versehenen infraroten LED, die eine Probenkammer durchleuchtet und durch einen konkaven Reflektor auf den Photowiderstand trifft, der die verbleibende Lichtintensität bestimmt¹⁵. Da das zu untersuchende Kohlenstoffdioxid ein ähnliches Absorptionsspektrum wie Wasserdampf hat, sind die Öffnungen der Kammer mit einem Filter versehen, der nur CO₂ hindurchdiffundieren lässt. Die Messergebnisse sind neben der Gaskonzentration auch von der Temperatur abhängig¹⁶, weshalb der verwendete Sensor einen Thermistor zur entsprechenden Kompensation enthält. Ein auf dem Sensor verbauter Mikroprozessor berechnet aus den gemessenen Spannungen die tatsächliche CO₂-Konzentration und sendet diese über eine serielle Schnittstelle weiter.

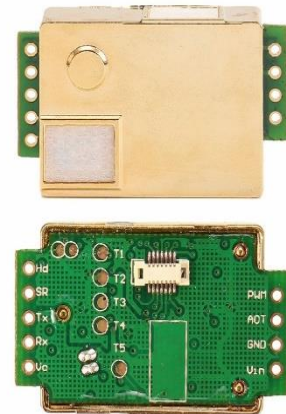


Abb. 4: MH-Z19 optischer CO₂-Sensor

2.1.5. MQ elektrochemische Sensorreihe

In dieser Arbeit werden elektrochemische Sensoren der kostengünstigen MQ-Sensorreihe dafür verwendet, die Luftqualität in Klassenräumen zu bewerten. Im Inneren aller MQ-Sensoren befindet sich eine Heizspule aus einer Nickel-Chrom-Legierung, um die notwendige Aktivierungsenergie zuzuführen. Die Platinelektroden, an denen der Widerstand gemessen wird, sind über eine Zinn(IV)-Oxid-Schicht leitend miteinander verbunden. Oxidierbare Gase in der Luft reagieren mit dieser Schicht und rufen eine Änderung des Widerstands hervor. Indem die zwischen den Elektroden abfallende Spannung gemessen wird, können Schlüsse auf die Konzentration der zu untersuchenden Gase getroffen werden, jedoch ist keine selektive Messung von Stoffen mit dieser Methode möglich. Beispielsweise können beim MQ 135 Sensor ohne zusätzliche Daten CO₂ und Ammonium, das ebenfalls aus der Raumluft stammt, nicht unterschieden werden, da eine Konzentrationsänderung beider Gase dieselbe Spannungsänderung hervorruft (Abb. 6). Die verwendeten Gassensoren MQ-5, MQ-9 und MQ-135 unterscheiden sich durch die darin verbauten Filter, die zu charakteristischen Empfindlichkeitskurven bei den einzelnen



Abb. 5: MQ-9 elektrochemischer Sensor

¹⁴ Optischer Filter um das passierende Spektrum auf die erwünschte Wellenlänge zu beschränken.

¹⁵ Vgl. (lukie80, 2017)

¹⁶ Vgl. (Yi, 2010)

Sensoren führen. Weil die in den Sensoren verbaute Heizspule keine Schwankungen in der Umgebungstemperatur kompensieren kann, werden die resultierenden Messwerte mit externen Temperaturmessungen nachbearbeitet. Laut Herstellerangaben ist eine Aufwärmzeit von 24 h notwendig, bis sich ein Reaktionsgleichgewicht an der Zinndioxidschicht einstellt.

2.2. Verwendete Software

2.2.1. SerialPlot Datenerfassungswerkzeug

SerialPlot dient zur Erfassung der über die serielle Schnittstelle empfangenen Daten und als Zwischenspeicher, bis diese vollständig erfasst werden. Nach Abschluss der Messung können die Daten zur Weiterverarbeitung als CSV¹⁷ Datei exportiert werden.

2.2.2. Das Arduino-Programm

Auf dem Arduino, der zentralen Recheneinheit des Messgeräts, läuft ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Programm¹⁸, das die Sensordaten sammelt und an einen angeschlossenen Rechner sendet.

Es initialisiert die analogen Allzweckanschlüsse, mit denen die MQ-Sensoren verbunden sind und eröffnet eine digitale Kommunikation zu den restlichen Sensoren, die an den Arduino

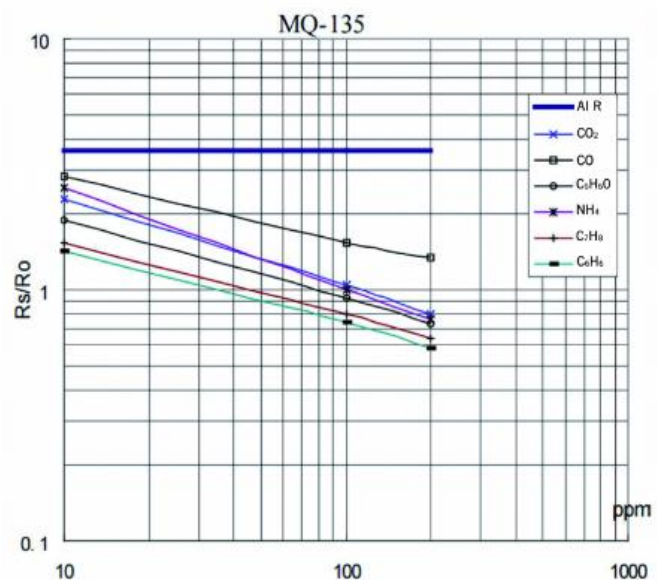


Abb. 6: Empfindlichkeitskurven des MQ-135 für verschiedene Stoffe

angeschlossen sind. Während der Messung werden in regelmäßigen Intervallen alle Sensoren ausgelesen, die Rohdaten in die entsprechenden Einheiten konvertiert und anschließend entweder als lesbarer Text oder im CSV Format über die serielle Schnittstelle ausgegeben. Die zeitliche Auflösung der Messung kann am Messgerät mit einem Drehregler eingestellt werden und wird auch bei der nächsten Messung automatisch gesetzt. Um die Effekte zufälliger Messfehler im Analog-zu-Digital-Konverter des Arduinos zu reduzieren, werden bei den analogen Sensoren in 200 μ s Abständen je fünf Messungen durchgeführt, deren Durchschnitt berechnet und anschließend ausgegeben wird.

¹⁷ Comma-separated-value, eine universell eingesetzte Art Daten zu formatieren.

¹⁸ Der vollständige Quellcode befindet sich auf der CD im Anhang.

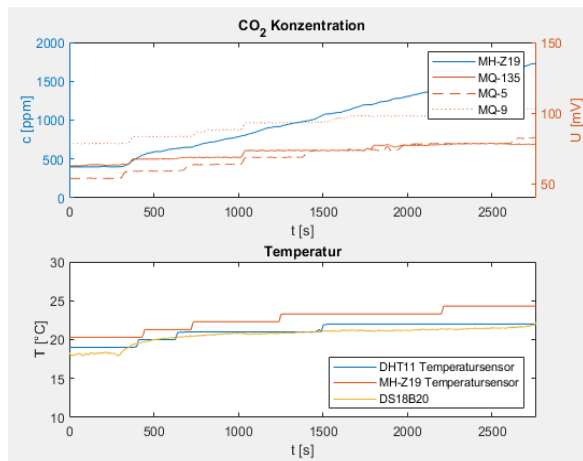


Abb. 7: Screenshot der Sensordaten einer Messung

2.2.3. MATLAB Softwarewerkzeug zur

Datenverarbeitung

Die aus SerialPlot exportierten CSV Dateien können zur weiteren Analyse in Programmen wie Excel eingelesen werden, jedoch wird bei Messungen mit >100.000 Messpunkten die Analyse mit MATLAB empfohlen, da es auch große Datenmengen verarbeiten und anzeigen kann. Im Anhang befindet sich eine eigens dafür entwickelte MATLAB-Funktion, die CSV formatierte Messdaten des Geräts

ausliest, Fehlercodes sowie leere Messpunkte aus dem Datensatz entfernt, die in Millisekunden gemessenen Zeitintervalle zu einer absoluten Zeit integriert und mit dem Korrekturfaktor multipliziert,¹⁹ um die Daten anschließend anzuzeigen. Im oberen Fenster werden die Referenzwerte des optischen Sensors und die Messwerte der elektrochemischen Sensoren angezeigt (x-Achse in Sekunden, linke y-Achse in ppm für den optischen Sensor, rechts in mV für die MQ-Sensoren). Diese werden zuerst mit einem ungewichteten beweglichen Medianfilter dritter Ordnung von unerwünschten Schwankungen befreit und durchlaufen anschließend einen Savitzky-Golay-Filter mit Polynom ersten Grades und einem 97 Punkte breiten Schiebefenster zur besseren Lesbarkeit. Im unteren Fenster (Abb. 7) werden die gefilterten Temperaturwerte (Savitzky-Golay-Filter, 1. Polynom, Fensterbreite 55) der drei Temperatursensoren [°C] in Abhängigkeit von der Zeit angezeigt. Mit dem Curve-Fitting-Tool können die Datensätze nun auf Korrelationen miteinander oder mit mathematischen Funktionen untersucht werden.

2.3. Durchführung der Messungen

Vor Beginn der Messung wird das Messgerät auf einer Höhe von mindestens 50 cm²⁰ positioniert. Um eine ausreichende Luftzirkulation sicherzustellen, darf es nicht in einer Ecke oder hinter großen Gegenständen stehen. Außerdem soll ein Abstand von 2 m zu Personen eingehalten werden, da direkte Atemluft das Ergebnis verfälscht. Der USB-B-Stecker für die Stromversorgung wird an eine externe Stromquelle mit 5 V und >600 mA angeschlossen, um

¹⁹ Die Zeitmessung des Arduino Mikroprozessors ist ungenau, da während der für die Software Serial notwendigen Interrupts keine vergangene Zeit registriert werden kann. Der nachträglich berechnete Korrekturfaktor kompensiert den akkumulierenden Fehler.

²⁰ Bei Messungen am Boden sind erhöhte Messwerte aufgrund von Ablagerung schwerer Gase beobachtet worden.

eine ausreichende Stromzufuhr für die Heizspulen der elektrochemischen Sensoren zu gewährleisten. Nach einer 24-stündigen Aufwärmphase ist das Gerät betriebsbereit, sodass mit dem USB Mini Stecker ein Windows Rechner zur Ausgabe und Speicherung der Daten in SerialPlot²¹ angeschlossen werden kann. Die Messdauer ist durch die maximale Anzahl Messpunkte im Puffer von SerialPlot begrenzt und kann entweder durch Vergrößerung desselben oder wenn nötig durch ein Verringern der zeitlichen Auflösung erhöht werden.

3. Ergebnisse

3.1. Vorstellung der Ergebnisse

²¹ Die in SerialPlot verwendeten Einstellungen mit der korrekt beschrifteten Legende sind der CD im Anhang beigelegt.

Im folgenden Abschnitt werden einige Grundeigenschaften der Messergebnisse erläutert. Das obere Fenster in Abb. 8 enthält die Messwerte des optischen Sensors, die als Referenzwert zur Kalibrierung verwendet werden, in blau und die Messwerte der elektrochemischen Sensoren in orange. Die x-Achse stellt dabei die Zeit in Sekunden dar, wobei die y-Achse links die CO₂-Konzentration des optischen Sensors in ppm abbildet und rechts die in mV an den elektrochemischen Sensoren gemessene Spannung. Im unteren Fenster sind farblich unterschieden die gefilterten Temperaturwerte der drei Temperatursensoren im zeitlichen Verlauf dargestellt. Wenn die Sensorwerte 2.000 ppm

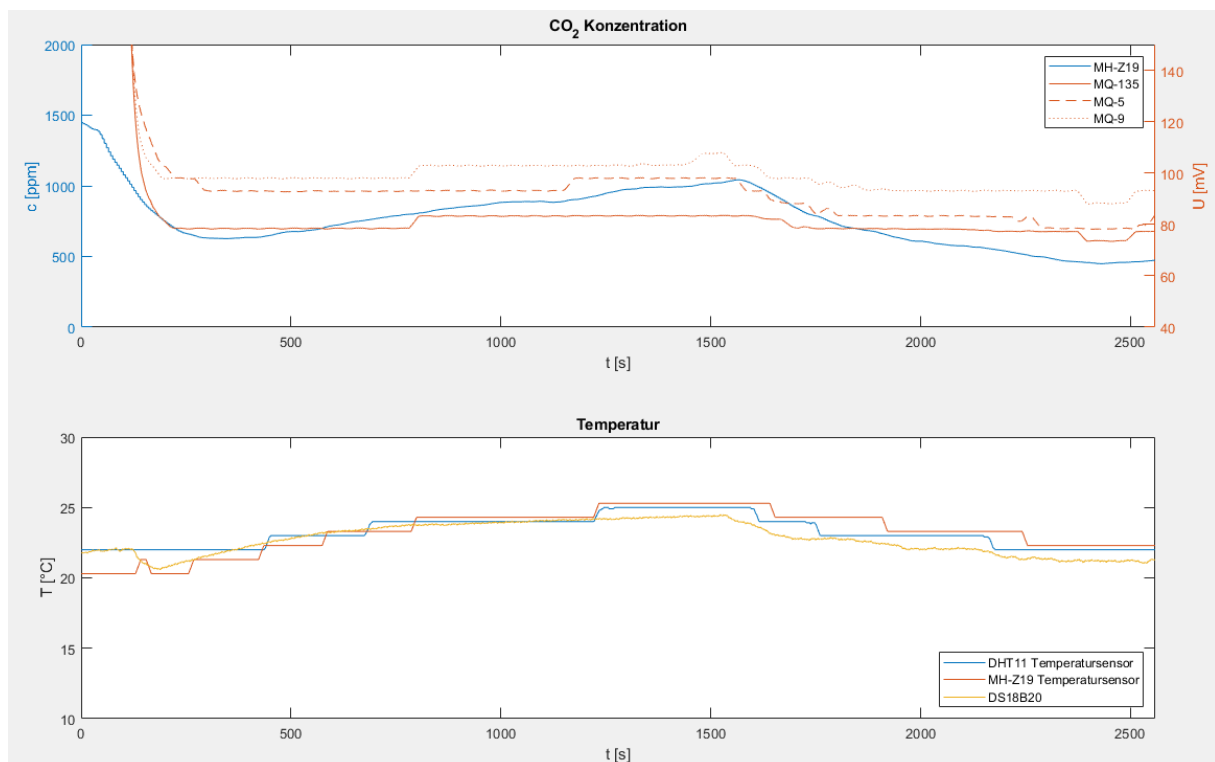


Abb. 8: Repräsentative CO₂-Messung einer Unterrichtsstunde

(bzw. 150 mV bei den MQ-Sensoren) überschreiten, wird die Skalierung der y-Achse entsprechend erweitert.

Der maximale, während der Messungen im Unterricht beobachtete Konzentrationswert liegt bei 2.965 ppm, 40 % der Unterrichtsstunden überschreiten 2000 ppm. Der Medianwert der 18 analysierten Messungen liegt bei 1.407 ppm. Wenn gelüftet wird, werden die Fenster in allen beobachteten Fällen geschlossen, bevor die Frischluftkonzentration von 411 ppm²² im Raum erreicht wird, sodass ein gelüftetes Klassenzimmer durchschnittlich eine CO₂-Konzentration von 618 ppm hat.

²² Durchschnittliche atmosphärische CO₂-Konzentration, vgl. (Earth's CO₂ Home Page, 2007)

3.2. Das Messgerät

Das Messgerät besteht aus verschiedenen, teilweise redundanten Sensoren, aus denen dann die geeignetsten ausgewählt werden um ein kostengünstiges Warngerät zu konstruieren. Alle Sensoren sind an einen Arduino angeschlossen, der die Rohdaten ausliest, grundlegend bearbeitet und an einen angeschlossenen Rechner überträgt. Des Weiteren ist auf der Platine ein Drehregler verbaut, an dem

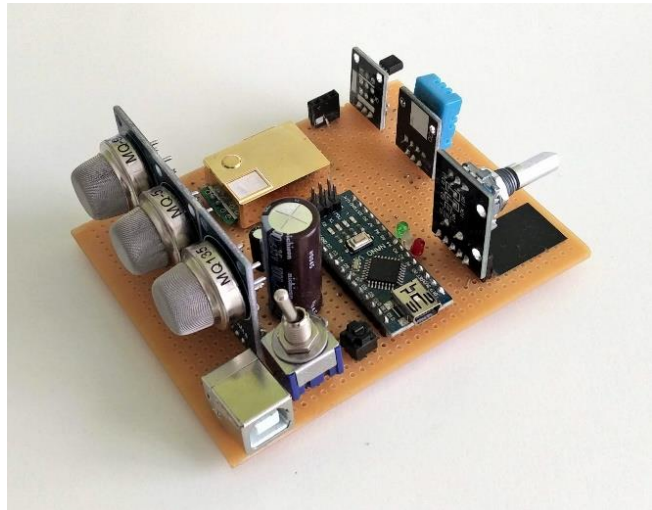


Abb. 9: Das vollständige Messgerät auf einer Platine

die Länge des Messintervalls eingestellt werden kann. Neben dem Arduino sind drei farbige LEDs (Abb. 9), die während der Messung visuelle Rückmeldung über die CO₂-Konzentration geben und zwei Kondensatoren, die Spannungsspitzen kompensieren können und kurzzeitige Schwankungen im Schaltkreis dämpfen. Aufgrund der notwendigen Heizleistung der drei MQ Sensoren beträgt die Gesamtstromstärke in der Aufwärmphase zeitweise bis zu 1 A, was weit über der offiziellen Spezifikation von 200 mA maximaler Stromstärke des Arduinos liegt. Daher ist eine USB-B-Buchse zum Anschluss einer externen Stromversorgung hinzugefügt worden, die nach Bedarf mit einem Schalter vom Stromkreis (vgl. Abb. 10) getrennt werden kann. Die Temperatursensoren sind möglichst weit von den MQ-Sensoren entfernt positioniert, um den Einfluss ihrer Heizspulen auf die Messung zu minimieren.

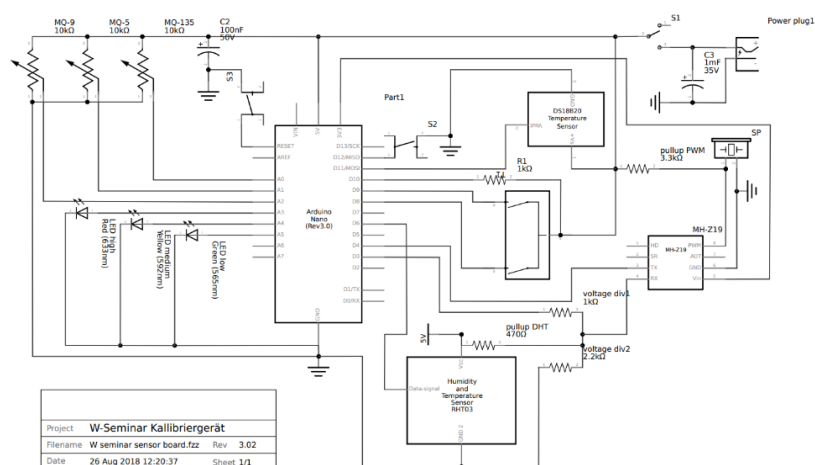


Abb. 10: Schaltplan des Messgeräts

4. Diskussion

4.1. Bestimmung eines sinnvollen Maximalwerts der CO₂-Konzentration im Unterricht

Eine Messung der Kohlenstoffdioxid-Konzentration ist nur sinnvoll, wenn man sich an einem vorbestimmten Grenzwert orientieren kann. Dieser wird im Folgenden bestimmt.

Auffällig ist, dass insbesondere abstraktere und komplexere Anforderungsbereiche²³ stark von den Änderungen im CO₂-Gehalt der Luft betroffen sind - Bereiche, die besonders in höheren Bildungseinrichtungen wie Gymnasien oder Universitäten gefragt sind. Damit diese Fähigkeiten effektiv gefördert und im Unterricht eingesetzt werden können, wird eine maximale Dauerkonzentration von 1.000 ppm²⁴ vorgeschlagen, da in den zu Beginn²⁵ erwähnten Studien keine starken Verbesserungen durch weitere Reduktion der Kohlenstoffdioxid-Konzentration festgestellt werden können. Selbst bei 1.000 ppm sinkt die Fähigkeit zur Informationsnutzung um 23 % im Vergleich zu ihrer Ausprägung bei 600 ppm CO₂, durchschnittlich reduzierten sich die Leistungen in den geprüften Fähigkeitsbereichen um 10,9 %. Eine solche Leistungseinbuße entspricht bei der Notengebung in der Oberstufe zwei Notenpunkten, stellt aber in Abwägung mit den notwendigen Lüftungsmaßnahmen für eine weitere Verbesserung einen sinnvollen Richtwert dar. Über kurze Zeiträume hinweg sind im normalen Unterricht höhere Konzentrationen vertretbar, aber besonders in Prüfungssituationen ist eine Einhaltung dieses Maximalwertes zu empfehlen.

4.2. Interpretation und Zusammenfassung der Messergebnisse

4.2.1. Exponentieller Konzentrationsverlauf beim Lüften

Die in Abb. 11 dargestellte Messung zeigt mehrere für die Konzentrationsverläufe charakteristische Merkmale auf. Zum einen sind dies die sehr hohen Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen, die sowohl der optische Sensor als auch die elektrochemischen Sensoren zu Beginn registrieren. Diese werden zum Großteil durch die Atemluft der Person, die das Messgerät beim Transport trägt verursacht und sind daher zu vernachlässigen. Zum anderen ist eine starke Linearität des Konzentrationsanstiegs zu beobachten. Dies bedeutet, dass die Menge an pro Zeiteinheit ausgestoßenem CO₂ konstant bleibt und sich auch der dazu proportionale Sauerstoffverbrauch nicht ändert. Im Gegensatz dazu verhält sich der Konzentrationsverlauf beim Lüften ($t > 1500$ s in Abb. 11) nahezu wie eine exponentielle

²³ Strategisches Denken, Reaktionsfähigkeit in Krisensituationen und Informationsnutzung

²⁴ Vgl. (Allen Joseph G., 2015)

²⁵ s. Auswirkungen von Kohlenstoffdioxid auf die Konzentrationsfähigkeit des Menschen

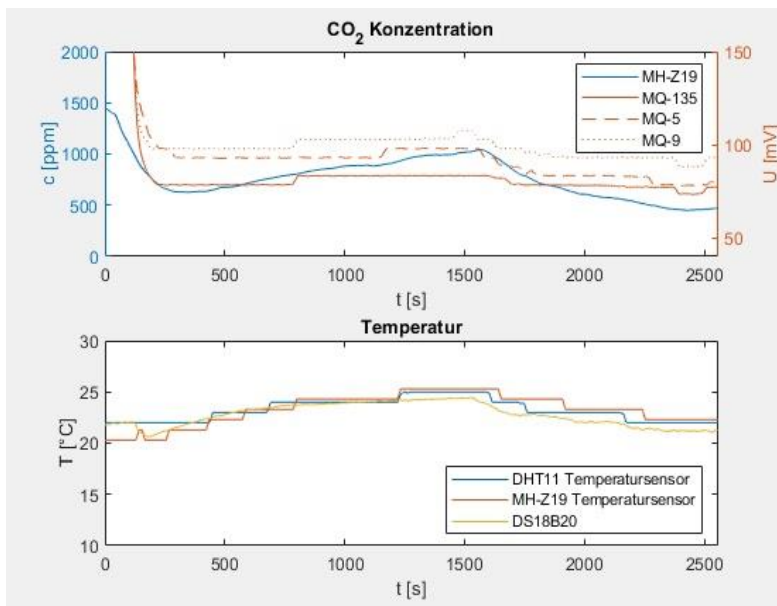


Abb. 11: repräsentative Messung einer Unterrichtsstunde

exponentielle Funktion mit negativem Exponenten folgender Form handelt:

$$f(t) = e^{-d \cdot t + a} + c$$

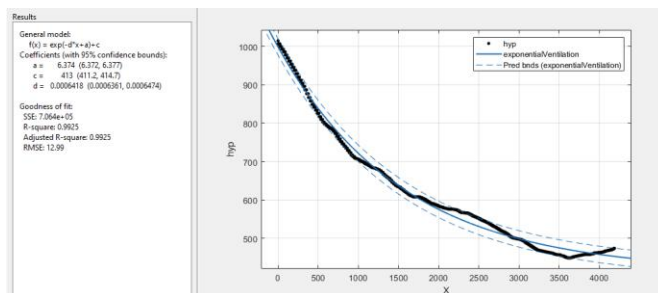


Abb. 12: Kurvenangleich einer exponentiellen Funktion

$c = 413$ ppm die Hypothese²⁷.

4.2.2. Selektion des geeignetsten elektrochemischen Sensors

Weil in der Weiterentwicklung des Messgeräts nur einer der elektrochemischen Sensoren weiter verwendet werden soll, wird im folgenden Abschnitt der geeignetste ausgewählt. Der Sensor sollte möglichst schwach auf äußere Einflüsse wie Temperatur reagieren und ein starkes Ansprechverhalten bei Kohlenstoffdioxid besitzen. Da bei den drei betrachteten Sensoren kein relevanter Unterschied in der Spannungsänderung bei Temperaturschwankungen festgestellt werden konnte, ist das ausschlaggebende Kriterium ihre Empfindlichkeit auf CO₂. Um diese zu untersuchen, wird ein Messabschnitt betrachtet, in dem bei geschlossenen Fenstern der CO₂-Gehalt konstant ansteigt. Der Sensor mit der

Funktion. Da sich der Kohlenstoffdioxid-Konzentrationsgradient zwischen Frischluft und Raumluft beim Lüften mit der Zeit verringert, verlangsamt sich auch der Austausch von Innen- und Außenluft entsprechend. Eine Analyse mit MATLAB bestätigt die Vermutung, dass es sich bei der Entwicklung um eine

Die berechneten Koeffizienten sind in diesem Fall $d = 6,418 \times 10^{-4}$ und $a = 6.374$ mit einer additiven Konstante von 413 für c . Da die CO₂-Konzentration von Außenluft etwa 411 ppm²⁶ beträgt, bestätigt eine Annäherung an die Asymptote

²⁶ Durchschnittliche atmosphärische CO₂-Konzentration (Earth's CO2 Home Page, 2007)

²⁷ Bestimmtheitsmaß der Funktion = 99,25 %.

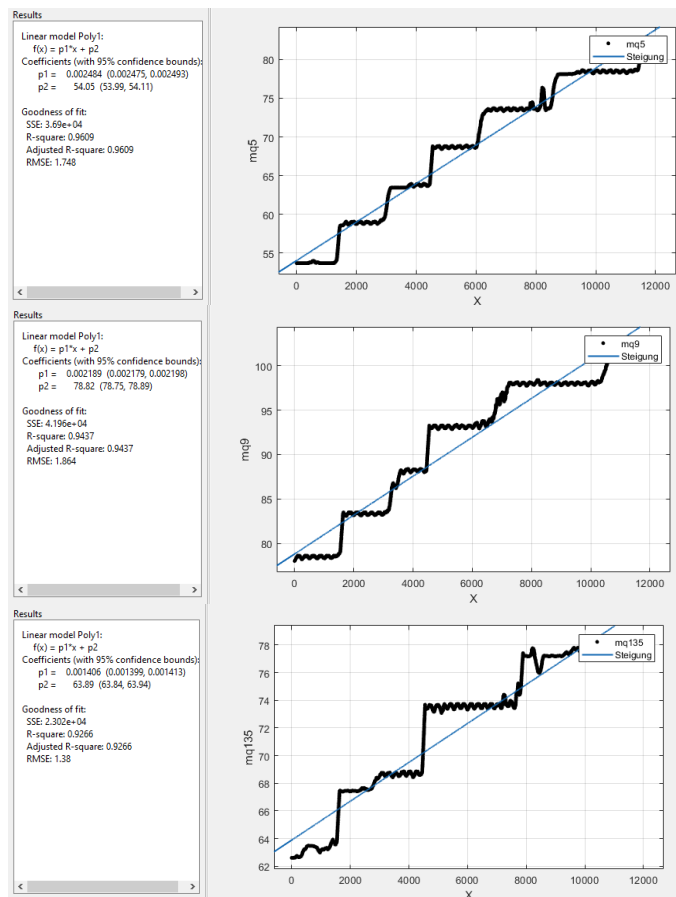


Abb. 13: Vergleich der Spannungsverläufe und Bestimmung ihrer Steigung

Schritten ermöglicht. Zum Teil können die Sprünge durch nachträgliches Filtern der Daten entfernt werden, die so erreichten Spannungsverläufe sind aber trotz dessen ungenauer als eine hochauflösende Messung.

4.2.3. Berechnung der CO₂-Konzentration aus der elektrischen Spannung

Indem die gemessenen Spannungen der MQ-Sensoren als x-Werte und die realen, mit dem optischen Sensor gemessenen CO₂-Konzentrationen als y-Werte eingesetzt werden, entsteht ein Scatterplot, der die Korrelation der beiden Sensorwerte darstellt. Die Funktion, die diese Beziehung beschreibt, kann anschließend verwendet werden, um durch Einsetzen der an den MQ-Sensoren gemessenen Spannungen die CO₂-Konzentration zu berechnen. Bei den in MATLAB analysierten Messungen handelt es sich mit 93,81 % Bestimmtheit um eine lineare Beziehung der Form $y = mx + a$. Der für m bestimmte Wert ist 45,65 mit einer mittleren Abweichung von 3,2 zwischen einzelnen Messungen, es kann aber kein universell gültiger Wert für a bestimmt werden, da er zwischen einzelnen Messreihen mit 1500 ± 1.200 stark variiert. Es konnte keine Korrelation mit der Luftfeuchtigkeit und mit 47,63 % Bestimmtheit eine Korrelation zwischen Temperatur und den MQ-Sensorwerten festgestellt werden. Der vollständige Term zur Berechnung der Kohlenstoffdioxid-

höchsten Steigung in diesem Intervall ist folglich am besten geeignet. Die in MATLAB bestimmten Steigungen sind bei MQ-5 $2,48 \times 10^{-3}$, MQ-9 $2,19 \times 10^{-3}$ und MQ-135 $1,41 \times 10^{-3}$. MQ-5 ist damit von den verwendeten elektrochemischen Sensoren der am besten geeignete.

Bei Betrachtung der Spannungsverläufe der elektrochemischen Sensoren in Abb. 13, stechen besonders die stufenartigen An- und Abstiege heraus. Diese liegen an der niedrigen 10-bit Auflösung des Arduino internen Analog-zu-Digital-Konverters, der nur Spannungsmessungen in ca. 4,9 mV

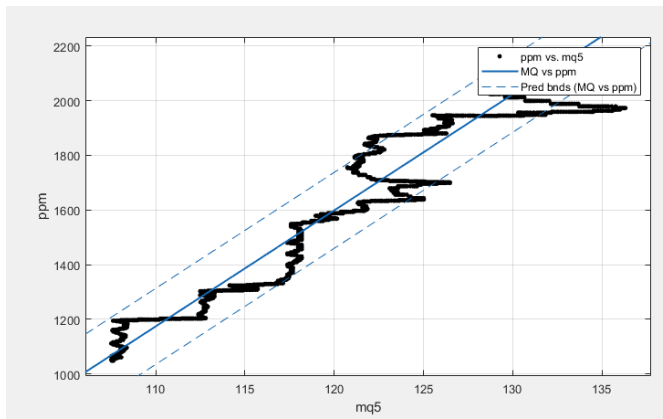


Abb. 14: Reale CO₂-Konzentration in Abhängigkeit von der am MQ-5 Sensor gemessenen Spannung

Konzentration aus der am MQ-5 Sensor gemessenen Spannung $[U]$ und der Temperatur $[\vartheta]$ ist:

$$c_a(U, \vartheta) = 45,65 U - 81,8 \vartheta - a$$

Aufgrund der hohen Variabilität von k wird dieser Wert für jede Messung individuell festgelegt, indem das Gerät zu Beginn kalibriert wird. Der resultierende Graph wird zur besseren

Lesbarkeit mit einem gleitenden Mittelwert-Filter der Länge 1.200 stark geglättet. Die mit



Abb. 15: Vergleich der Berechneten Konzentrationsverläufe mit der optischen Referenz

dieser Methode errechneten Konzentrationsverläufe haben eine relative mittlere Abweichung von 9,25 % von den Referenzwerten des optischen Sensors (Abb. 15). Hiermit wird also auch die Hypothese bestätigt, dass mit den kostengünstigeren elektrochemischen Sensoren vergleichbare Ergebnisse erhalten werden können.

4.2.4. Kostenoptimierung des Messgeräts

Mit der oben bestimmten Funktion zur Berechnung der CO₂-Konzentration kann eine kostengünstigere Version des Messgeräts entwickelt werden. Dazu wird der elektrochemische MQ-5 Sensor in Kombination mit dem hochauflösenden DS18B20 Temperatursensor empfohlen, die von einem 5 V Mikroprozessor ausgelesen werden. Da sowohl die Sensoren als auch der Prozessor mit derselben Spannung arbeiten, ist kein Spannungswandler nötig. Um die analoge Spannung am MQ-5 Sensor auszulesen, sollte er einen integrierten Analog-zu-Digital-Konverter mit mindestens 10-bit Auflösung enthalten. Um das Gesamtsystem weiter zu vereinfachen, ist eine LED Anzeige am Messgerät denkbar,

weil damit die Notwendigkeit eines externen Rechners komplett entfällt. Indem die Anzahl der Sensoren reduziert wird, sinkt der Stromverbrauch auf $<200 \text{ mA}$ ²⁸, sodass das Gerät von Anschlüssen, die mindestens dem USB 2.0 Standard entsprechenden, als Stromquelle betrieben werden kann. Das auf diese Weise optimierte Messgerät soll regelmäßig kalibriert werden, um die additive Konstante a des oben erschlossenen Terms neu festzulegen. Diese manuelle Kalibrieremethode ergäbe sich in der Praxis als sehr zeitintensiv, weshalb ein Algorithmus für eine automatische Kalibrierung vorgeschlagen wird. Diese könnte rechnerisch über die Bestimmung der Asymptote erfolgen, an die sich der exponentielle Werteverlauf beim Lüften annähert, da ihr Wert die Kohlenstoffdioxid-Konzentration von 411 ppm ²⁹ annimmt.

Ein beispielhaftes, nach den obigen Kriterien zusammengestelltes Warngerät hätte Bruttomaterialkosten von $3,14 \text{ €}$ ³⁰ und wäre für eine Anwendung in Klassenzimmern angemessen.

4.2.5. Allgemeine Berechnung der Lüftungsintervalle

Da der Konzentrationsverlauf bei geschlossenen Räumen annähernd linear ansteigt, kann die Steigung bestimmt werden. Eine Kurvenangleichung mehrerer Messabschnitte in MATLAB bestätigt die beobachtete Linearität³¹ und gibt quantitative Auskunft über die Steigung $[m]$, die die Änderung der CO_2 -Konzentration pro Zeiteinheit³² darstellt.

$$\frac{\Delta c}{t} = m$$

Es wird angenommen, dass die Steigung abhängig ist von dem Volumen des Raumes $[V]$, der Anzahl Personen $[n_{\text{pers}}]$ und einem konstanten Faktor $[k]$, der den Beitrag einer Einzelperson zur Gesamtkonzentration pro Zeiteinheit beschreibt. In Annahme des Terms

$$\frac{\Delta c}{t} = \frac{n_{\text{pers}} \cdot k}{V}$$

ergibt sich unter Einsetzen einer Grundfläche von 80 m^2 ³³, einer Deckenhöhe von 3 m und einer gemessenen Änderungsrate von $29,3 \frac{\text{ppm}}{\text{min}}$ bei 23 Personen für den Faktor k der Wert $281,1 \frac{\text{m}^3 \text{ppm}}{\text{min} \cdot \text{Person}}$. Nach Betrachtung aller Messungen ergab sich ein durchschnittlicher Faktor

²⁸ z.B. Stromverbrauch eines ATmega328 ist $<6,6 \text{ mA}$, der Stromverbrauch der Sensoren beträgt bei 5 V : MQ-5 $<160 \text{ mA}$, DS18B20 = $1,5 \text{ mA}$

²⁹ Durchschnittliche atmosphärische CO_2 -Konzentration, Vgl. (Earth's CO_2 Home Page, 2007)

³⁰ Materialpreis ohne Gehäuse und Netzteil, vollständige Preisliste befindet sich im Anhang.

³¹ Bestimmtheitsmaße liegen zwischen $99,54 \%$ und $98,24 \%$ bei den einzelnen Messungen.

³² x-Achse in Abb.: 2 repräsentiert Messpunkte und nicht Zeit. Umrechnungsfaktor zu Minuten ist $261,1$.

³³ Grundflächen der Räume werden manuell gemessen und könnten daher von der tatsächlichen Größe abweichen.

von $271,87 \frac{\text{m}^3 \text{ppm}}{\text{min} \cdot \text{Person}}$ mit einer mittleren Abweichung von 6,84 zwischen den resultierenden Konstanten. Die geringe mittlere Abweichung bestätigt die Resultate. Nun kann eine allgemeine Formel zur Bestimmung der Lüftungsintervalle in Abhängigkeit von dem Volumen der Klassenräume und der Anzahl sich darin aufhaltenden Personen in folgender Form aufgestellt werden:

$$t = \frac{V \cdot (c_{\max} - c_{\text{start}})}{k \cdot n_{\text{pers}}}$$

Unter Einsetzen von 1.000 ppm als Grenzwert [c_{\max}] sowie 600 ppm als Grundwert eines gelüfteten Klassenraumes [c_{start}] und der berechneten Konstante k ergibt sich:

$$t(V, n_{\text{pers}}) = 1,47 \frac{V}{n_{\text{pers}}}$$

Die mit dieser Methode berechneten Zeiten betragen für die oben betrachtete Beispielsituation 15,3 min. Um ein vollständiges Durchlüften des Raumes zu erreichen, sollten bei großen Räumen mehrere Fenster mindestens 5 min vollständig geöffnet bleiben, sodass der angenommene Grundwert von 600 ppm erreicht werden kann. In der betrachteten Beispielsituation dauert damit der gesamte Lüftungszyklus 20,3 min. Da so kurze Intervalle als nicht realisierbar angesehen werden, wird bei kleinen Klassenräumen zweimaliges Lüften während einer Unterrichtseinheit empfohlen.

4.3. Vergleich mit der Literatur

Die gemessenen Ergebnisse können im Vergleich mit anderen Studien in ihrer Plausibilität bestätigt werden. Der in diesem Projekt gemessene Höchstwert der CO₂-Konzentration von 2.965 ppm ist nicht mit anderen, größer angelegten Studien zu dem Thema vergleichbar³⁴, die bis zu 4.996 ppm als Maximalwert nennen, da bei einer höheren Anzahl Messungen die Wahrscheinlichkeit von stark abweichenden Extremwerten entsprechend steigt. Bei Betrachtung der Median- und Mittelwerte hingegen, lässt sich eine hohe Übereinstimmung mit anderen Arbeiten feststellen. Das Umweltbundesamt berichtet von 1.567 ppm als Median, eine Abweichung von etwa 10 % zu den in dieser Arbeit bestimmten 1.407 ppm, während andere Studien einen Median von nur 1.290 ppm³⁵ nennen. Die großen Differenzen ergeben sich als Folge der Unterschiede zwischen den Schulgebäuden in denen gemessen wird und des unterschiedlichen Lüftungsverhaltens an verschiedenen Schulen.

Der im Laufe dieser Arbeit bestimmte Grenzwert von 1.000 ppm, ab dem gelüftet werden sollte, deckt sich ebenfalls mit anderen Vorgaben, wie der des Ministeriums für ein lebenswertes Österreich, das ihn als „Richtwert für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen, in denen geistige Tätigkeiten verrichtet werden“³⁶ bezeichnet oder der des deutschen Umweltbundesamtes, das ab 1.000 ppm den Zustand „hygienisch auffällig“³⁷ nennt. Auch einige weitere Publikationen verwenden den als Pettenkofer Zahl³⁸ bezeichneten Grenzwert von 1.000 ppm als Richtwert für verbrauchte Luft.

4.4. Reflexion auf Fehlerquellen und Bewertung der Messergebnisse

Es kann nicht eindeutig bestimmt werden, ob die gemessenen Spannungsänderungen an den elektrochemischen Sensoren allein durch Kohlenstoffdioxid hervorgerufen werden, oder ob diese Korrelation rein zufällig ist, weil die elektrochemischen Sensoren neben CO₂ auch auf weitere Stoffe in der Luft, wie Methan oder Kohlenstoffmonoxid ansprechen. Andere Gase, auf die die Sensoren reagieren, sollten aber im Alltag eine einige Größenordnungen niedrigere Konzentration³⁹ haben als CO₂, sodass ihre Auswirkungen außen vor gelassen werden. Obwohl die Datenblätter der MQ-Sensoren den Einfluss von Luftfeuchtigkeit auf die Resultate anführen, wird er aufgrund der geringen beobachteten Korrelation vernachlässigt.

³⁴ Langzeitstudie zum Lüftungsverhalten von 251 Schulstunden vgl. (Lahrz Thomas, 2008)

³⁵ Vgl. S. 17 (Tappler, 2017)

³⁶ Vgl. S. 37 (Tappler, 2017)

³⁷ S. 1368 (Lahrz Thomas, 2008)

³⁸ Vgl. (Wasserhygiene, 2017), vgl. (Baunetz Wissen, 2008)

³⁹ Konzentration von Methan, dem häufigsten der im MQ-5 Datenblatt gelisteten Gase, liegt in Luft bei 1,8 ppm im Vergleich zu 411 ppm CO₂ vgl. (Chemie Schule, 2013)

Es ist zu beachten, dass CO₂ nicht der einzige Stoff ist, der die Luftqualität beeinflusst. Um eine umfassende Bewertung der Lüftungssituation vornehmen zu können, müssen auch andere Faktoren wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder Feinstaubbelastung in Betracht gezogen werden. Obwohl die aus den Messungen ersichtlichen Lüftungsintervalle mit der Rechnung übereinstimmen, sind sie im Schulalltag nur schwer umsetzbar. Besonders in kalten Monaten würde ein so häufiges und langes Lüften einerseits erhöhte Heizkosten verursachen und andererseits auch wegen der Kälte im Raum den Unterricht negativ beeinflussen. Auch in städtischen Schulen, die intensiv befahrene Straßen in der Nähe haben, könnte sich ein derartiges Lüftungsverhalten aufgrund der Lärmbelastung negativ auf die Aufmerksamkeit der Schüler auswirken.

4.5. Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen

In einer möglichen folgenden Projektphase sollten einige Prototypen des kostenoptimierten Messgeräts gebaut und es sollte eine neue Software mit automatischer Kalibrierfunktion entwickelt werden. Das mit neuer Funktionalität ausgestattete Messgerät könnte in einem Pilotprojekt an mehreren Schulen getestet werden, um mehr Daten zu sammeln und bisherige Schlüsse zu bestätigen. Im Rahmen dessen könnte eine Studie über die Noten der Schüler in belüfteten Klassenzimmern die erhofften positiven Auswirkungen genauer untersuchen. Die Technologie kann in einer weiteren Entwicklungsphase außerdem als Teil eines automatisierten Belüftungssystems verwendet werden, das bei Überschreiten einer definierten CO₂-Konzentration selbstständig die Fenster öffnet.

4.6. Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Lüftungsmaßnahmen und das Bewusstsein für die Problematik am Ernst-Mach-Gymnasium unzureichend sind, da in allen untersuchten Unterrichtsstunden eine Konzentration über dem empfohlenen 1.000 ppm Richtwert erreicht und oft sogar die 2.000 ppm Marke überschritten wird. Eine Verbesserung des Lüftungsverhaltens ist dringend erforderlich und könnte durch eine Einführung der vorgeschlagenen, kostengünstigen Warngeräte beschleunigt werden. Ein erster Schritt wäre mit Hilfe der Berechnungsformel für Lüftungsintervalle auf Seite 18 Schülerinnen und Schüler sowie Lehrer für die Problematik zu sensibilisieren.

5. Literatur- und Quellenverzeichnis

- ADDICARE*. (1. 7 2014). Abgerufen am 8. 10 2018 von DS18B20 Digital Temperature Sensor: <https://www.addicore.com/DS18B20-Digital-Temperature-Sensor-p/161.html>
- Allen Joseph G., P. M. (26. 10 2015). Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environmental Health Perspectives*, S. 805–812. doi:1289/ehp.1510037
- Banggood Shopping*. (5. 6 2009). Abgerufen am 8. 10 2018 von MH-Z19 0-5000PPM infraroter CO2 Sensor für CO2 Innenraumluft Qualitätsmonitor: https://www.banggood.com/de/MH-Z19-0-5000PPM-Infrared-CO2-Sensor-For-CO2-Indoor-Air-Quality-Monitor-UARTPWM-p-1094463.html?cur_warehouse=CN
- Baunetz Wissen*. (3. 6 2008). Abgerufen am 26. 9 2018 von Glossar: Pettenkofer-Wert: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/p/pettenkofer-wert-2493079>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit*. (15. 12 2016). Abgerufen am 21. 9 2018 von Innenraumluft – Was ist das Problem?: <https://www.bmu.de/themen/gesundheit-chemikalien/gesundheit-und-umwelt/innenraumluft/innenraumluft-was-ist-das-problem/>
- Chemie Schule*. (27. 1 2013). Abgerufen am 10. 7 2018 von Luft: <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Luft>
- CO2 Meter*. (20. 9 2018). Abgerufen am 22. 9 2018 von Indoor Air Quality In the Classroom: <https://www.co2meter.com/blogs/news/7334762-indoor-air-quality-in-the-classroom>
- Coley David A., R. G. (2007). The Effect of Low Ventilation Rates on the Cognitive Function of a Primary School Class. *International Journal of Ventilation*, 2, S. 107-112. doi:10.1080/14733315.2007.11683770
- core Electronics*. (16. 1 2018). Abgerufen am 8. 10 2018 von <https://core-electronics.com.au/nano-v3-0-board.html>
- Dr. U. Heudorf, P.-D. (2007). Bringt die Passivhausschule die Lösung der raumlufthygienischen Probleme in Schulen? (S. Frankfurt, Hrsg.) *Das Gesundheitswesen*, 7. doi:10.1055/s-2007-985133
- Earth's CO2 Home Page*. (2007). Abgerufen am 3. 11 2018 von <https://www.co2.earth/>
- ECOthinkGroup*. (kein Datum). Abgerufen am 26. 8 2018 von <http://www.ecothinkgroup.com/the-effects-of-elevated-carbon-dioxide-levels-in-schools/>
- Fromme, D. T. (24. 2 2012). Effect of classroom air quality on students' concentration: Results of a cluster-randomized cross-over experimental study. *Indoor Air*, 5, S. 378-387. doi:10.1111/j.1600-0668.2012.00774.x
- Gary E. Gibson Ph.D., W. P. (7 1981). Brain dysfunction in mild to moderate hypoxia. *The American Journal of Medicine*, 70(6). doi:10.1016/0002-9343(81)90834-2
- Harris, D. C. (2014). *Lehrbuch der Quantitativen Analyse* (8. Ausg.). (G. W. Werner, Hrsg.) Springer Spektrum.
- Lahrz Thomas, D. W. (11 2008). Gesundheitliche Bewertung von Kohlenstoffdioxid in der Innenraumluft. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz*, 51, S. 1358–1369. doi:10.1007/s00103-008-0707-2
- lukie80. (5. 12 2017). *MySensors*. Abgerufen am 10. 7 2018 von MH-Z19 Teardown: <https://forum.mysensors.org/topic/7761/mh-z19-teardown>
- Oehmcke, T. (1901). *Mitteilungen über die Luft in Versammlungssälen, Schulen und in Räumen für öffentliche Erholung und Belehrung*. München: Oldenburg.
- Olimex*. (1. 2 1999). Abgerufen am 9. 10 2018 von SNS-MQ135: <https://www.olimex.com/Products/Components/Sensors/SNS-MQ135/resources/SNS-MQ135.pdf>
- Plyler, W. S. (3. 3 1951). Absorption Spectra of Water Vapor and Carbon Dioxide in the Region of 2.7 Microns. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 3, S. 246-265.

- PotentialLabs*. (1. 5 2013). Abgerufen am 8. 10 2018 von DHT11 Humidity and Temperature Sensor: <https://potentiallabs.com/cart/dht-11-humidity-and-temperature-sensor>
- Richards, J. G. (2009). *Hypoxia*. Amsterdam: Elsevier.
- Roboter Bausatz Shop*. (1. 6 2013). Abgerufen am 8. 10 2018 von MQ-9 Sensor für Kohlenmonoxid und entflammbare Gase: <https://www.roboter-bausatz.de/1063/mq-9-sensor-fuer-kohlenmonoxid-und-entflammbare-gase>
- Romm, J. (10. 26 2015). *ThinkProgress*. Abgerufen am 26. 8 2018 von Exclusive: Elevated CO2 Levels Directly Affect Human Cognition, New Harvard Study Shows: <https://thinkprogress.org/exclusive-elevated-co2-levels-directly-affect-human-cognition-new-harvard-study-shows-2748e7378941/>
- Satish Usha, M. J. (12 2012). Is CO2 an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO2 Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives*, 12, S. 1671-1677. doi:10.1289/ehp.1104789
- Tappler, D.-I. P. (9. 11 2017). *Richtlinien zur Bewertung der Innenraumluft – Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter*. Ministerium für ein lebenswertes Österreich.
- Tham Kwok Wai, P. W. (2015). Indoor environmental quality, occupant perception, prevalence of sick building syndrome symptoms, and sick leave in a Green Mark Platinum-rated versus a non-Green Mark-rated building: A case study. *Science and Technology for the Built Environment*, 1, S. 35-44. doi:10.1080/10789669.2014.967164
- Wasserhygiene, S. V.-u. (26. 5 2017). *SVLW*. Abgerufen am 26. 9 2018 von Pettenkofer-Zahl und CO2-Konzentrationen: <https://www.svlw.ch/427-pettenkofer-zahl-und-co2-konzentrationen>
- Yi, J. P. (8. 9 2010). ScienceDirect. *Procedia Engineering*, 5, S. 1248-1251. doi:10.1016/j.proeng.2010.09.339

6. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Arduino Nano Mikrocontroller	6
Abb. 2: DS18B20 Temperatursensor	7
Abb. 3: DHT11 Feuchte- und Temperatursensor	7
Abb. 4: MH-Z19 optischer CO ₂ -Sensor	8
Abb. 5: MQ-9 elektrochemischer Sensor	8
Abb. 6: Empfindlichkeitskurven des MQ-135 für verschiedene Stoffe	9
Abb. 7: Screenshot der Sensordaten einer Messung	10
Abb. 8: Repräsentative CO ₂ -Messung einer Unterrichtsstunde	12
Abb. 9: Das vollständige Messgerät auf einer Platine	13
Abb. 10: Schaltplan des Messgeräts	13
Abb. 11: repräsentative Messung einer Unterrichtsstunde	15
Abb. 12: Kurvenangleich einer exponentiellen Funktion	15
Abb. 13: Vergleich der Spannungsverläufe und Bestimmung ihrer Steigung	16
Abb. 14: Reale CO ₂ -Konzentration in Abhängigkeit von der am MQ-5 Sensor gemessenen Spannung	17
Abb. 15: Vergleich der Berechneten Konzentrationsverläufe mit der optischen Referenz	17
Abb. 16: Kostenliste des kostenoptimierten Messgeräts	24
Abb. 17: Messung mit 23 Schülern, Fenster ist bei $t = 1.500$ s geöffnet worden	25
Abb. 18: Messung in einem kleineren Raum, 22 Schüler, nach 42 min werden 2.000 ppm überschritten	26
Abb. 19: Raumwechsel bei $t = 2.800$ s	27
Abb. 20: Starke Linearität beim Konzentrationsverlauf, hoher Temperaturanstieg	28
Abb. 21: Starke Linearität beim Konzentrationsverlauf, geringer Temperaturanstieg	29
Abb. 22: Hochauflösender Schaltplan des Messgeräts	30

Folgende Abbildungen sind aus dem Internet entnommen:

- Abb. 1: <https://core-electronics.com.au/nano-v3-0-board.html>
Abb. 2: <https://www.addicore.com/DS18B20-Digital-Temperature-Sensor-p/161.html>
Abb. 3: <https://potentiallabs.com/cart/dht-11-humidity-and-temperature-sensor>
Abb. 4: https://www.banggood.com/de/MH-Z19-0-5000PPM-Infrared-CO2-Sensor-For-CO2-Indoor-Air-Quality-Monitor-UARTPWM-p-1094463.html?cur_warehouse=CN
Abb. 5: <https://www.roboter-bausatz.de/1063/mq-9-sensor-fuer-kohlenmonoxid-und-entflammbare-gase>

Jegliche weiteren Abbildungen sind Eigenanfertigungen.

7. Anhang

Komponente	Beispiel Komponente	Kosten ⁴⁰
Mikroprozessor	ATMega328p - AU	1,40 €
Oszillator	16 Mhz Quarzoszillator 49 S	0,08 €
Anschluss	USB Mikro Stecker	0,06 €
Anzeige	5 x SMD 0805 LEDs weiß	0,05 €
Platine	50 x 70 mm PCB	0,10 €
Temperatursensor	DS18B20	0,46 €
Elektrochemischer Gassensor	MQ-5 Gassensor	0,99 €
Gesamt		3,14 €

Abb. 16: Preisliste des kostenoptimierten Messgeräts

⁴⁰ Preise von AliExpress, Stand 28. Oktober 2018.

Einige beispielhafte Messreihen, der vollständige Datensatz liegt der Arbeit digital bei.

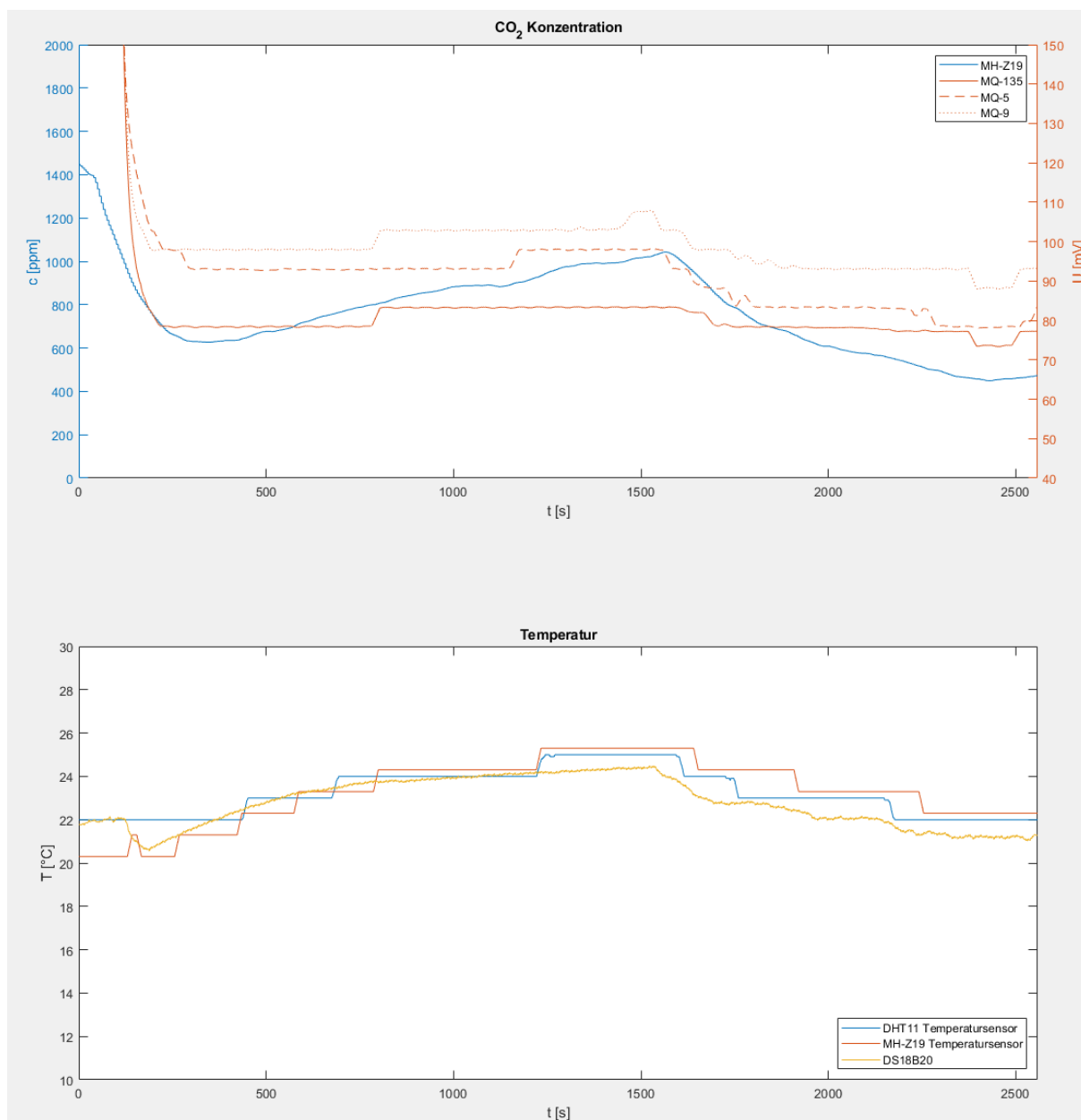


Abb. 17: Messung mit 23 Schülern, Fenster ist bei $t = 1.500\text{ s}$ geöffnet worden

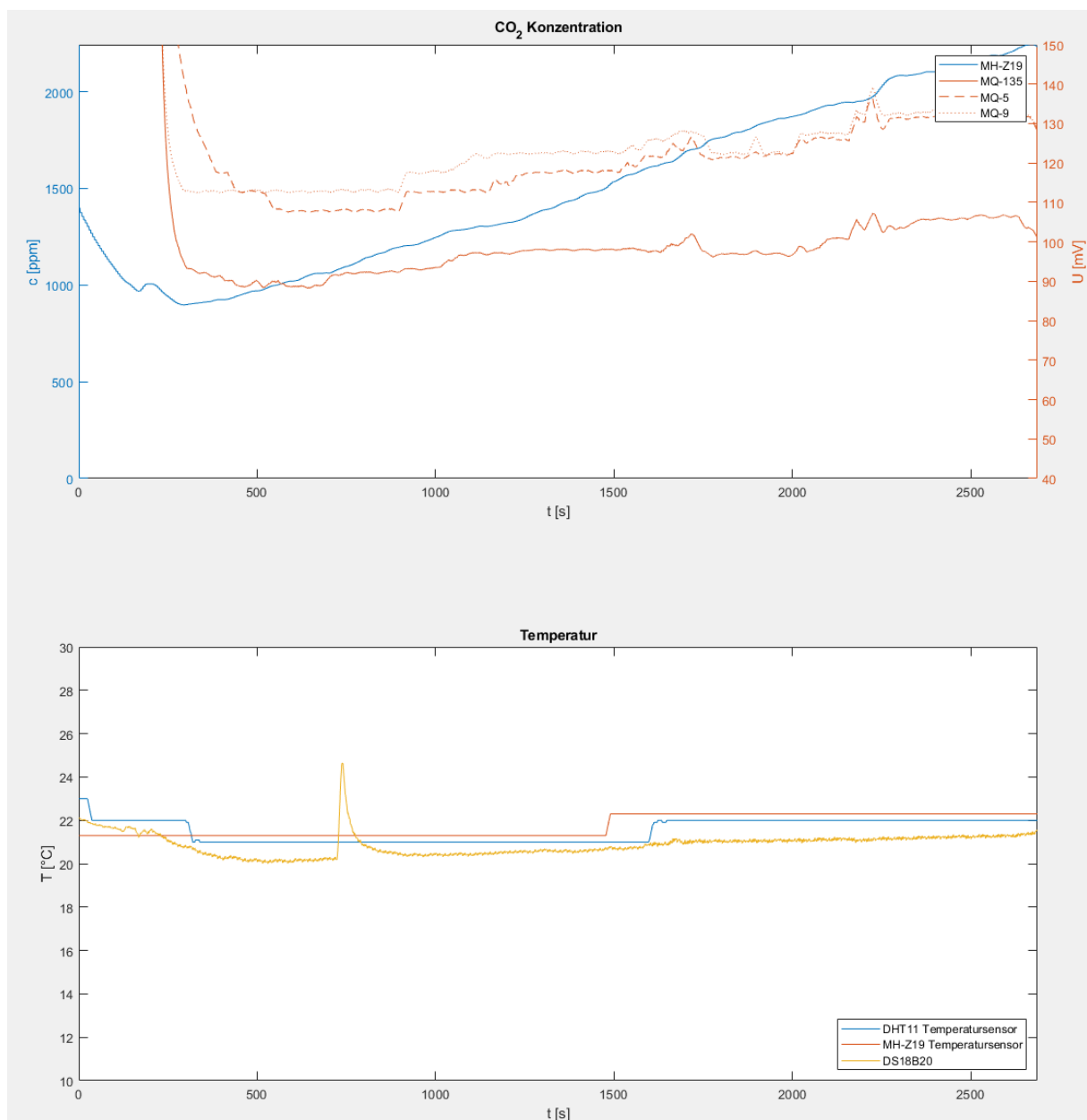


Abb. 18: Messung in einem kleineren Raum, 22 Schüler, nach 42 min werden 2.000 ppm überschritten

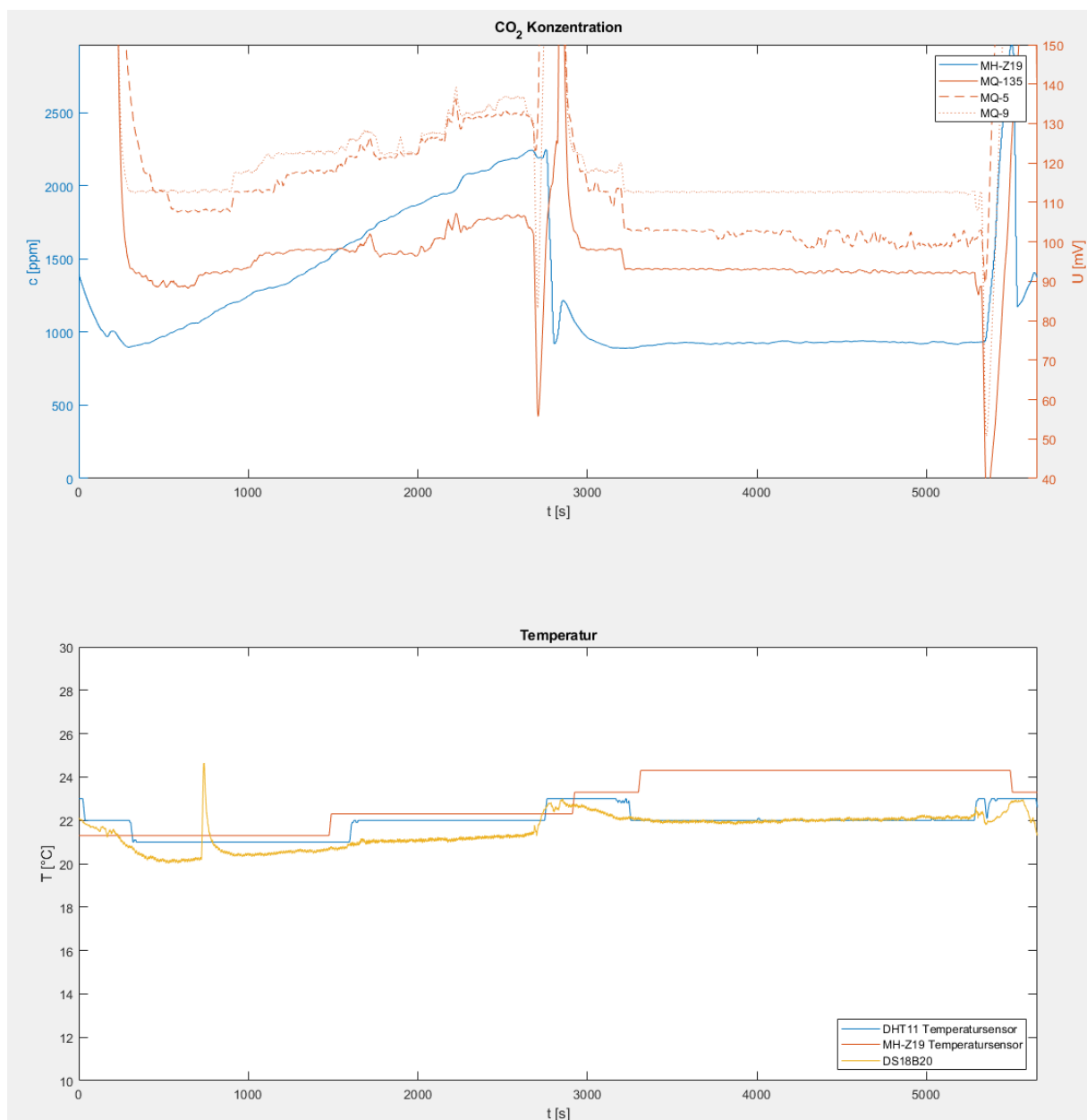


Abb. 19: Raumwechsel bei $t = 2.800$ s

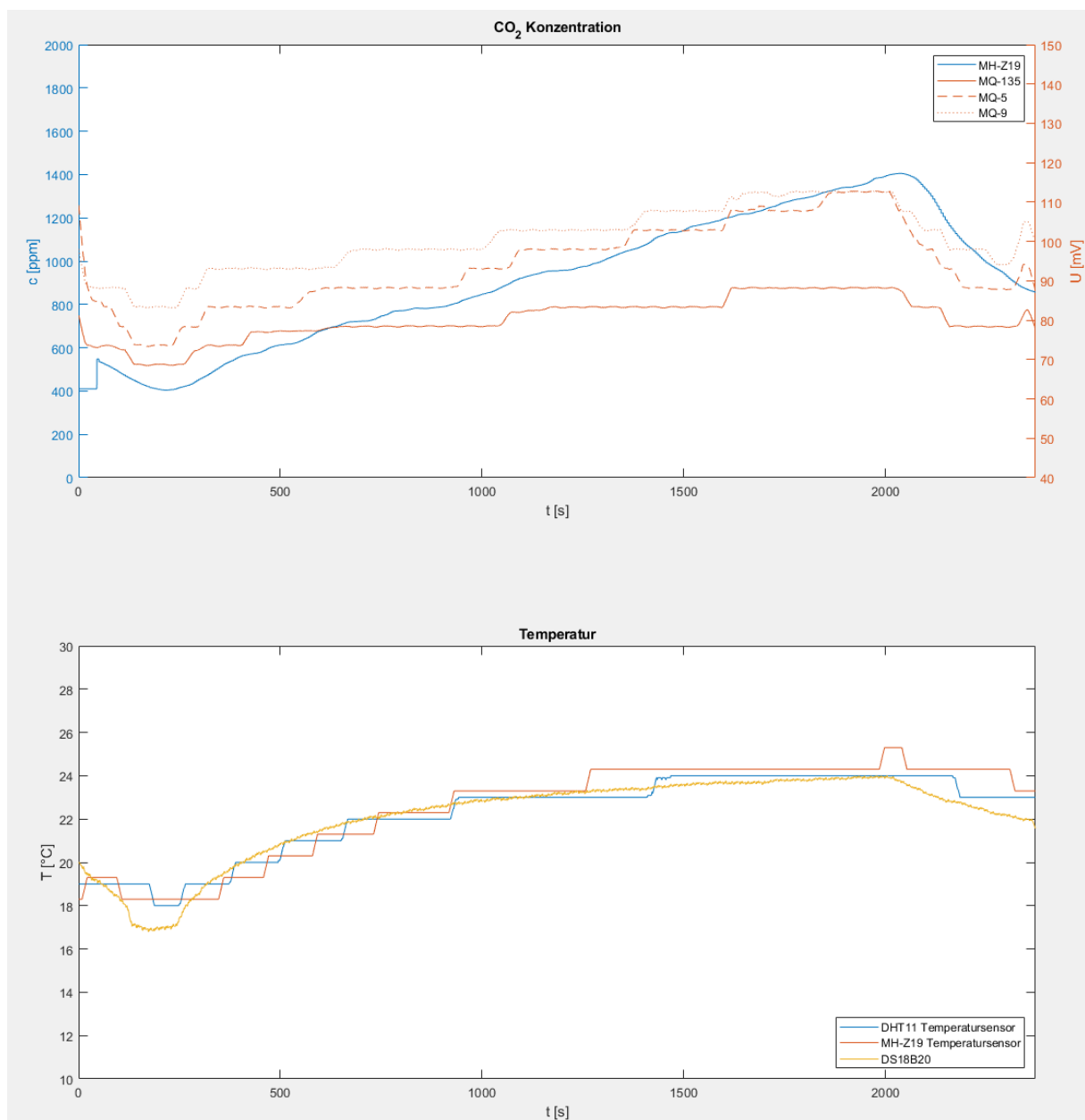


Abb. 20: Starke Linearität beim Konzentrationsverlauf, hoher Temperaturanstieg

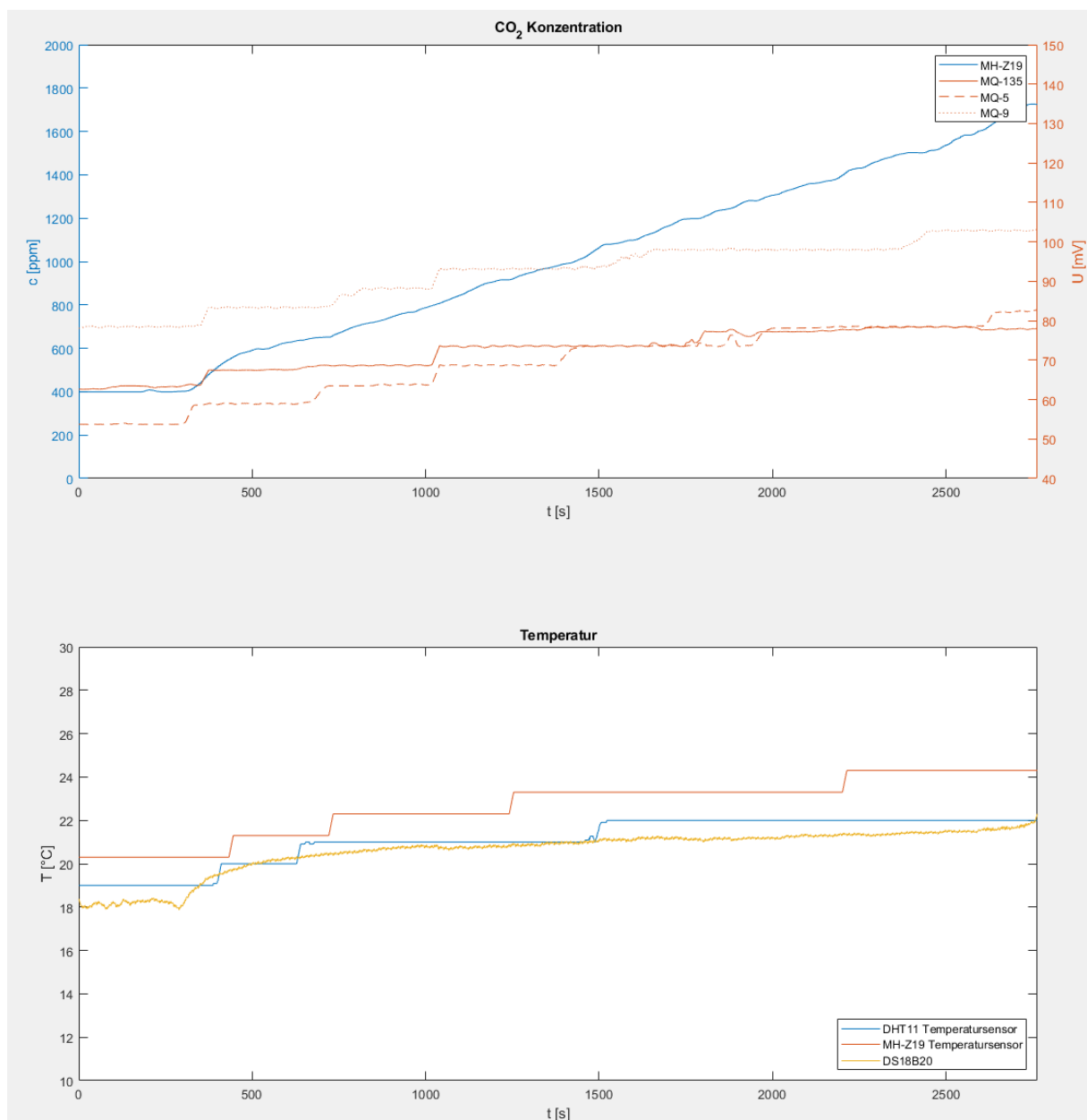


Abb. 21: Starke Linearität beim Konzentrationsverlauf, geringer Temperaturanstieg

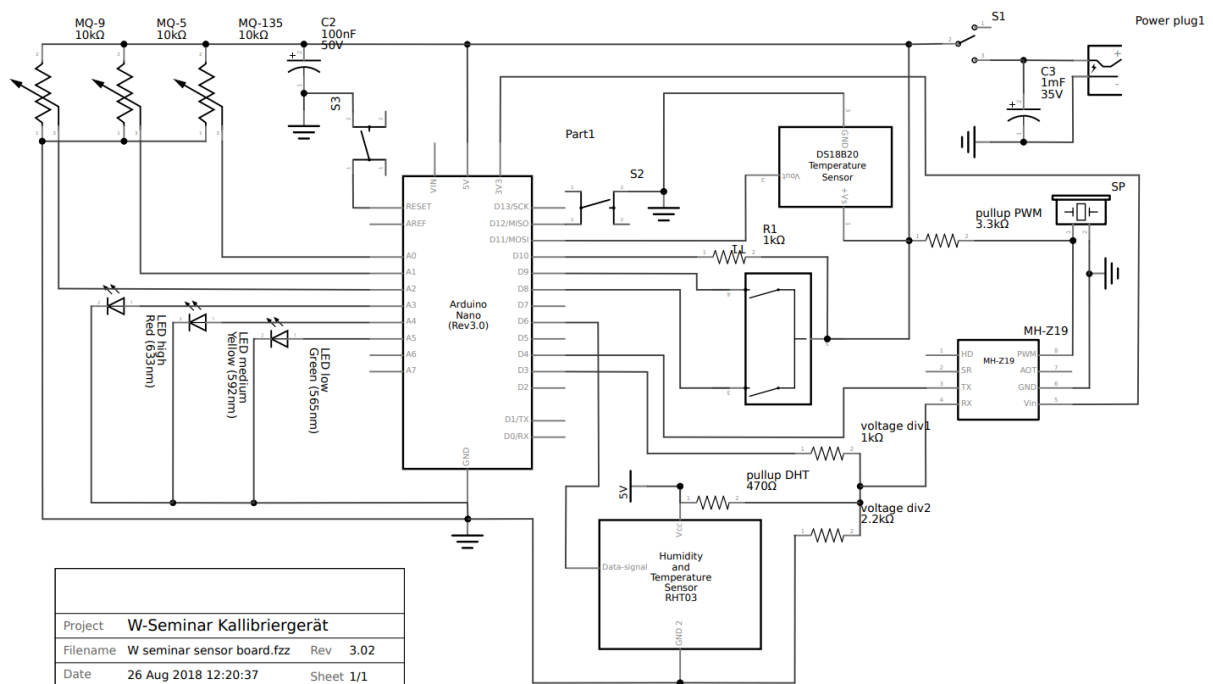


Abb. 22: Hochauflösender Schaltplan des Messgeräts

Inhalt der CD:

- MATLAB Workspace mit verwendeten Methoden und angepassten Funktionen
- MATLAB Screenshots einiger Analysen
- Screenshots früherer Messungen aus SerialPlot
- Rohdaten die in der Auswertung verwendet wurden
- Arduino Programm in PDF und INO Format
- MATLAB Funktionen zum Einlesen und Anzeigen der Datensätze
- Excel Tabelle zur Berechnung von k
- Excel Tabelle zur Berechnung der Lüftungsintervalle
- Programm zur Anzeige großer Datensätze, wurde später durch MATLAB ersetzt
- Schaltplan des Messgeräts
- Digitale Version der Seminararbeit
- Einstellungen für SerialPlot
- Aufgerufene Webseiten
- Weiteres

8. Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die Seminararbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ort, Datum

Unterschrift des Schülers