Hands-on Environmental Sensing I

Praktikum - Aufbau und Charakterisierung eines Low-Cost CO2 Sensors

Daniel Kühbacher

Version: 0.1

Zuletzt bearbeitet: 2. April 2025

Autor: Daniel Kühbacher

Inhalt

[Vorbereitung 3](#_Toc193370145)

[Einführung 4](#_Toc193370146)

[Ablauf 4](#_Toc193370147)

[Aufgabe 1: Verbindung zum Microcontroller 5](#_Toc193370148)

[Aufgabe 2: Serieller Monitor 5](#_Toc193370149)

[Aufgabe 3: Temperatur und Luftfeuchtigkeit messen. 5](#_Toc193370150)

[Aufgabe 4: Inbetriebnahme der SD-Karte 6](#_Toc193370151)

[Aufgabe 5: Sensordaten auf SD-Karte speichern 6](#_Toc193370152)

[Aufgabe 6: Inbetriebnahme des CO2 Sensors 6](#_Toc193370153)

[Aufgabe 7: CO2 Beacon 7](#_Toc193370154)

[Zusatzaufgabe 7.1: Zeitstempel 7](#_Toc193370155)

[Aufgabe 8: Datenauswertung mit Python 7](#_Toc193370156)

# Vorbereitung

Zur Vorbereitung für das Praktikum sind zwischen 30 min bis 2 h erforderlich, je nach Vorerfahrung mit der **Arduino Microcontroller Programmierung** und **Python**.

Das Praktikum wird in 2er-Gruppen durchgeführt, und jede Gruppe benötigt einen eigenen Laptop. Ihr könnt euch im Voraus absprechen und Gruppen bilden. Falls ihr möchtet, könnt ihr euch einen Laptop teilen und nur einen mitbringen.

* Installiere vor dem Praktikum die **Arduino IDE**  
  Link zum Download: <https://www.arduino.cc/en/software>  
    
  Zur weiteren Vorbereitung, insbesondere wenn noch keine Erfahrung mit Arduino Programmierung hast sehe dir das folgende Video an:   
  **Arduino Crash Course in 15 Min**  
  <https://youtu.be/nL34zDTPkcs?si=MqPz2jDbrG39jyJ->
* Installiere **Visual Studio Code** und die **Erweiterung für Jupyter Notebooks** (erforderlich für die Datenauswertung in Python)   
  Link zum Download: <https://code.visualstudio.com/Download>  
    
  Zur Einführung und Installation von Jupyter sehe dir das folgende Video an:  
  <https://youtu.be/suAkMeWJ1yE?si=K90X1-_5LGSxWY5A>
* Klone das **GitHub-Repository** zum Kurs auf deinen Laptop: <https://github.com/tum-esm/HES-Praktikum.git>

# Einführung

Kohlendioxid (CO₂) macht mit etwa 0,04 % nur einen geringen Anteil der Erdatmosphäre aus. Dennoch hat es eine erhebliche Klimawirkung, da es die von der Erde abgegebene Wärmestrahlung im nahen Infrarotbereich absorbiert und teilweise zurück auf die Erdoberfläche reflektiert – ein Effekt, der als Treibhauseffekt bekannt ist. Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt wäre Leben auf der Erde nicht möglich, da die Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche bei etwa -18 °C läge. Durch menschliche Aktivitäten, insbesondere die Verbrennung fossiler Brennstoffe, steigt jedoch die CO₂-Konzentration kontinuierlich an und verstärkt den Treibhauseffekt. Dies führt zu einer globalen Erwärmung mit weitreichenden Folgen für Klima, Wetter und Ökosysteme.

Die präzise Messung von CO₂ ist essenziell, um natürliche und anthropogene Quellen sowie Senken des Treibhausgases besser zu verstehen. Nur so lassen sich gezielte Maßnahmen zur Reduktion von Emissionen entwickeln und die Auswirkungen des Klimawandels effektiver begrenzen. Eine zentrale Methode zur Bestimmung der CO₂-Konzentration basiert auf dem Lambert-Beer-Gesetz, das die Abschwächung von Lichtintensität durch Absorption beschreibt. CO₂ absorbiert infrarote Strahlung bei spezifischen Wellenlängen, wodurch seine Konzentration in der Luft durch nicht-dispersive Infrarotspektroskopie (NDIR) genau bestimmt werden kann. Diese Methode wird in Laboranalysen, Umweltmessstationen und sogar Satelliten eingesetzt, um den globalen CO₂-Gehalt kontinuierlich zu überwachen.

Im Praktikum “Hands-On Environmental Sensing” werden wir einen Low-Cost CO₂ Sensor in Betrieb nehmen, Daten erfassen und den Sensor charakterisieren. Dabei wird ein Microcontroller (ESP32-C3) so programmiert, dass er Daten von einem Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensors sowie einem CO₂ Sensor empfangen und an einen Seriellen Monitor senden sowie auf eine SD-Karte speichern kann. Daraufhin wird eine Messkampagne mit Referenzgasen durchgeführt und damit der Sensor charakterisiert.

## Ablauf

* *(15 min)* Einführung in die Zusammensetzung der Atmosphäre, Treibhauseffekt, physikalische Grundlagen und Methoden der CO₂ Gasmesstechnik
* *(15 min)* Inbetriebnahme des Microcontrollers
* *(30 min)* Inbetriebnahme des Temperatur- & Luftfeuchtigkeitssensors sowie der SD-Karte
* *(45 min)* Inbetriebnahme des CO2 Sensors und Implementierung der Messroutine
* *(30 min)* Unterschiedliche Messungen (Referenzgas, Innenluft, Außenluft)
* *(45 min)* Auswertung und Visualisierung der Daten in Python

# Aufgabe 1: Verbindung zum Microcontroller

Öffne die Arduino IDE. Gehe zu *Tools >Board >Boards Manager* und installiere „**esp32** by Espressif Systems“. Gehe zu *File >Examples >01.Basics >Blink.* Ein neues Fenster mit dem Blink Beispiel wird sich öffnen.

Verbinde nun den Microcontroller mit dem Computer. Wenn der Microcontroller erkannt wird, kannst du nun den entsprechenden PORT und das verwendete BOARD *„ESP32C3 Dev Module“* auswählen. Lade das Blink Beispiel hoch und überprüfe, ob die Verbindung zum Microcontroller erfolgreich hergestellt wurde.

Da der ESP32 zusätzlich eine RGB Led verbaut hat, können die Farben verändert werden.

ToDo 👉Verändere das Blink Beispiel so, dass die LED abwechselnd rot und grün blinkt.



# Aufgabe 2: Serieller Monitor

Um Daten vom ESP an den Laptop zu senden und anzuzeigen, verwenden wir den Seriellen Monitor. Dieser muss in der Setup Routine mit einer bestimmten Übertragungsgeschwindigkeit (Baud-Rate) initialisiert werden.

ToDo 👉 Füge diese Funktion im Blink-Beispiel hinzu und sende „LED ein“ und LED aus“ entsprechend dem LED-Zustand.



# Aufgabe 3: Temperatur und Luftfeuchtigkeit messen.

Verbinde nun den Microcontroller mit dem Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensor AHT20. Die Datenübertragung erfolgt mit I2C, sodass neben der Spannungsversorgung (3V) die Datenleitung SDA (Serial Data) und ein Takt SCL (Serial Clock) verbunden werden müssen. Verbinden SDA mit GPIO 8 und SCL mit GPIO 9 des Microcontrollers (Default Pins für I2C).

Gehe zu *Sketch >Include Library >Manage Libraries* und installiere „**DFRobot\_AHT20** by DFRobot“.

Nachdem die Library erfolgreich installiert wurde, gehe zu *File >Examples >DFRobot\_AHT20 >readAHT20.* Ein neuer Sketch mit Beispielcode zum Auslesen des Sensors sollte sich öffnen. Lade den Beispielcode hoch, um die Verbindung zum Sensor zu testen.

Nun würden wir die Messwerte gerne als Liniengraph am Computer darstellen. Hierzu bietet die Arduino IDE einen Serial Plotter.

ToDo 👉 Verändere den Beispielcode so, dass die Temperatur (in °C) und die Luftfeuchtigkeit (in %rH) im Serial Plotter dargestellt werden kann.



# Aufgabe 4: Inbetriebnahme der SD-Karte

Verbinde nun die SD-Karte mit dem Microcontroller. Sie benötigt wiederum eine Spannungsversorgung (3V) und wird mittels SPI-Busses (Serial Peripherial Interface) verbunden. Dieser benötigt jedoch im Gegensatz zu I2C zwei Datenleitungen und eine Taktleitung. Verbinden wie folgt CS (Chip Select) mit GPIO 7, SCK (Serial Clock) mit GPIO 4, SO/MISO (Master In Slave Out) mit GPIO 5 und SI/MOSI (Master Out Slave In) mit GPIO 6.

Öffne den Beispielcode „02\_SDCard.ino“ aus dem *code* Ordner.

Gehe zu *Sketch >Include Library >Manage Libraries* und installiere „**ArduinoJson** by Benoit Blanchon“.

ToDo 👉 Lade den Beispielsketch hoch um überprüfe, ob die Verbindung mit der SD-Karte funktioniert.

# Aufgabe 5: Sensordaten auf SD-Karte speichern

Nun wollen wir echte Temperatur und Luftfeuchtigkeitsmessdaten auf der SD-Karte speichern.

ToDo 👉 Integriere den Code von Aufgabe 3 in Aufgabe 4 sodass „echte“ Temperatur und Luftfeuchtigkeits-Messdaten auf der SD-Karte gespeichert werden. Plotte sie zusätzlich im Seriellen Monitor.

# Aufgabe 6: Inbetriebnahme des CO2 Sensors

Als letzten Baustein des Systems nehmen wir nun den CO2 Sensor in Betrieb. Verbinde hierzu Sensor via I2C mit dem Microcontroller, den EN (Enable) Pin mit GPIO 3 und den RDY (Ready) Pin mit GPIO 2. Da wir in weiterer Folge auch wieder die LED in Betrieb nehmen werden und diese mit dem bisher für I2C benutzten GPIO 8 verbunden ist, definieren wir nun GPIO 0 als SDA und GPIO 1 als SCL für I2C. In Abbildung 1 ist der Microcontroller und die verwendeten Pins dargestellt.

ToDo 👉 Öffne nun den Sketch *„03\_co2\_sensor.ino“,* lade das Skript hoch und überprüfe die Verbindung zum CO2 Sensor.

Ein Bild, das Screenshot, Diagramm, Pixel enthält.

KI-generierte Inhalte können fehlerhaft sein.

Abbildung – Übersicht über alle GPIOs und ihre Verwendung am ESP32C3 Devkit

# Aufgabe 7: CO2 Beacon

Da nun auch die CO2 Konzentration gemessen werden kann, sollen diese Daten auch auf der SD-Karte gespeichert und im Serial Plotter angezeigt werden.

ToDo 👉 Kombiniere den Code aus Aufgabe 5 mit dem von Aufgabe 6.

## Zusatzaufgabe 7.1: Zeitstempel

Der ESP verfügt über ein WIFI-Modul, wodurch die Möglichkeit besteht, online die aktuelle Zeit abzufragen. Unter *File >Examples >ESP32 >Time >SimpleTime* findest du ein Beispiel dafür, wie diese Zeitabfrage über einen NTP-Server (Network Time Protocol) funktioniert. Öffne den Sketch und gib die SSID und das Password für ein WLAN-Netzwerk, beispielsweise vom Handy, an. Nachdem sich das Gerät mit dem Internet verbunden hat, sollte die aktuelle Zeit im Seriellen Monitor dargestellt werden.

ToDo 👉 Integriere die Funktion zum Abrufen von Zeitstempel aus dem Beispielcode in Aufgabe 7. Die Zeitstempel sollen lediglich auf der SD-Karte zu jedem Datenpaket gespeichert werden, nicht aber im seriellen monitor angezeigt. Zur Hilfestellung befinden sich nachfolgend noch einige Code-Ausschnitte.



# Aufgabe 8: Datenauswertung mit Python

Die erhobenen Daten können nun eingelesen, geplottet und weiterverarbeitet werden. Hierzu nutzen wir Python und ein Jupyter Notebook.

Lege nun die SD-Karte in den Computer ein und kopiere das Datenfile in den Ordner *notebooks/data*.

Öffne mit Hilfe von Visual Studio Code den Ordner *notebooks*und öffnedie Datei *analysis\_notebook.ipynb* aus diesem Ordner.

ToDo 👉 Die weiteren Schritte zur Datenanalyse sind im analysis notebook beschrieben. Führe die Aufgaben dort aus.