

iCity: Intelligente Stadt  
Smart Public Buildings and Infrastructures  
CO<sub>2</sub>-Ampel zur Bestimmung der  
Raumbelegung

Humboldtgynasium Solingen  
10.08.2023

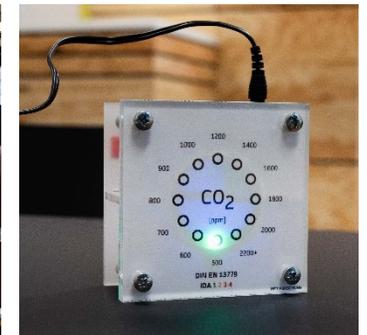
# Smart Public Buildings and Infrastructures

**Praxispartner:** Stadt Solingen (Stabsstelle Solingen Digital)

**Ausgewähltes Gebäude:** Humboldtgynasium Solingen

**Use Cases:** Energiemonitoring, Auslastung der Gebäude, Sensormanagement

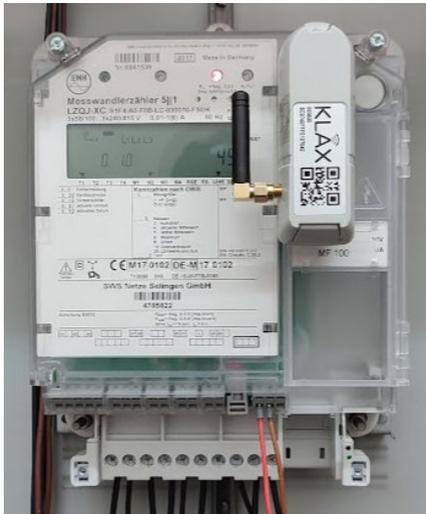
**Projekt mit dem Humboldtgynasium: CO<sub>2</sub>-Ampel zur Bestimmung der Raumbelugung**



Schulgelände Humboldtgynasium Solingen, PC-Raum R101, CO<sub>2</sub>-Ampel der HFT Stuttgart (Bilder: HFT Stuttgart)

# Energiemonitoring Humboldtgynasium

**Sensoren & Gateway:** Nachrüsten der Hauptzähler für Wärme, Strom und Gas mit passenden LoRaWAN-Sensoren. Drei Temperatursensoren in Klassenzimmern. Ausbau des LoRaWAN-Netzwerks vor Ort. Sensordaten werden per MQTT abgerufen und zusammen mit Wetterdaten in eine Datenbank überführt.



Stromzähler mit Klax v2



Neun Wärmemengenzähler mit Elvaco-Karte



Gaszähler mit EnergyCam (und IMST Range Extender)



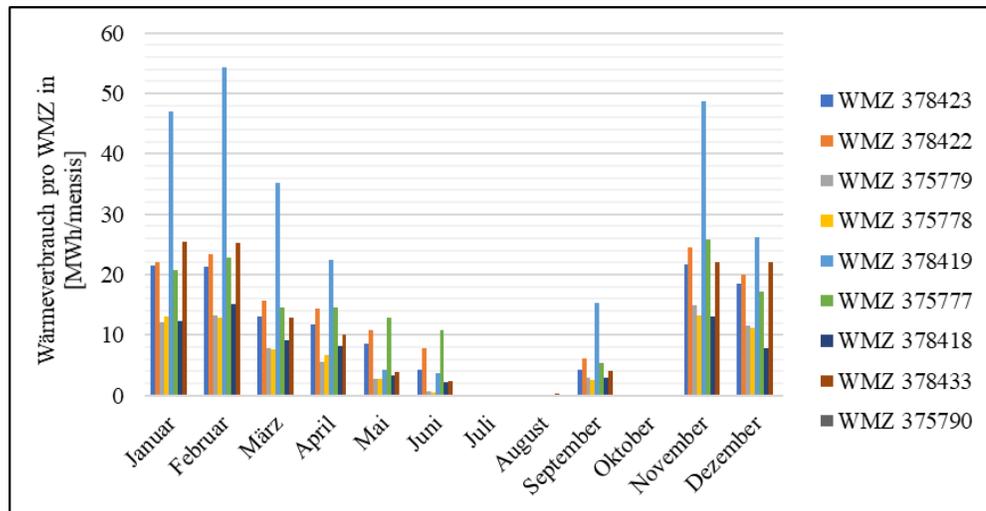
Sensor für Temperatur und Luftfeuchte (derzeit 3 in Klassenzimmern, bspw. Computerraum)



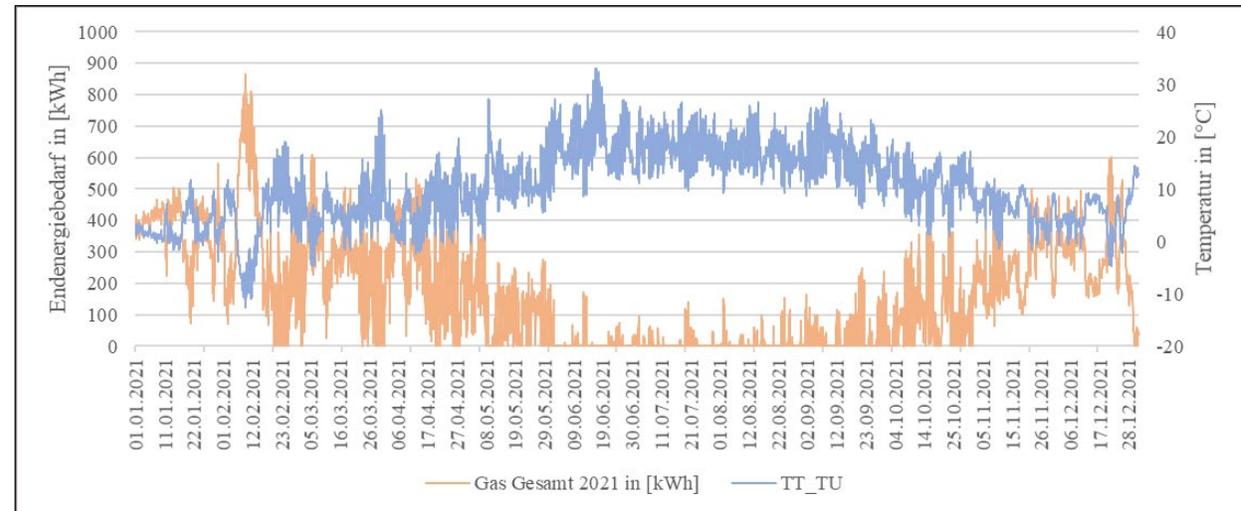
LoRaWAN-Gateway mit LTE (indoor)

# Energiemonitoring Humboldtgymnasium

- Digitalisierung der Raumpläne des Humboldtgyrnasiums Solingen
- Bemessung der Raumflächen der jeweiligen Heizstränge
- Darstellung der Energieverbräuche pro Wärmemengenzähler (WMZ) in 2022
- Darstellung der Energieverbräuche über 10 Jahre, witterungsbereinigt
- Prüfung der Daten auf Konsistenz
- Dynamisierung nach dem Heizgradstundenverfahren



Wärmeverbrauch pro WMZ in 2022 (ohne Oktober)

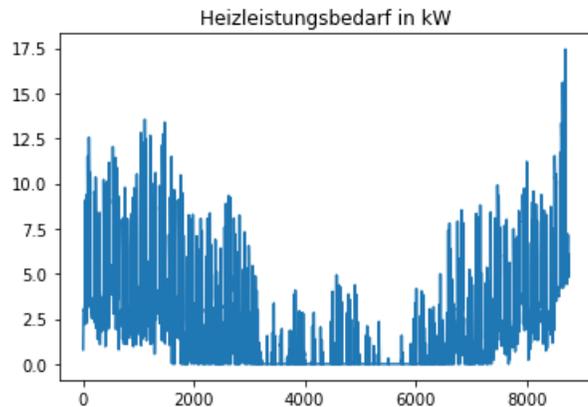


Energiebedarf gesamt in 2021 korreliert mit Wetterdaten

# Energiemonitoring Humboldtgymnasium

**Thermische Jahressimulation (8.760 h) für das „schlechteste“ Klassenzimmer (4. OG, Nord-West). Drei Szenarien:**

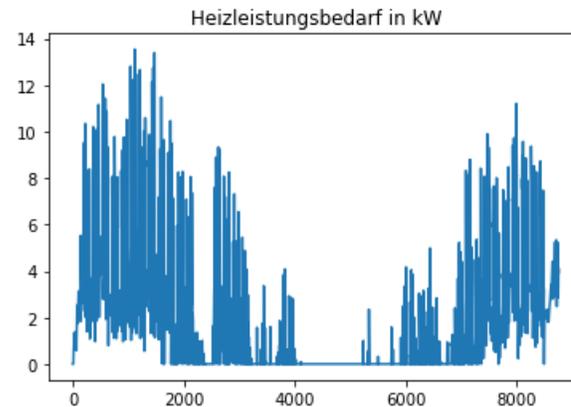
1. Statische Raumtemperatur mit Nachtabsenkung (Status Quo)
2. Steuerung der Solltemperatur durch ein Heizungsthermostat anhand Präsenz (19° Celsius Temperaturabsenkung nachts und bei ungenutztem Raum, 12° Celsius Temperaturabsenkung in den Ferien)
3. Steuerung der Solltemperatur durch ein Heizungsthermostat anhand Präsenz (16° Celsius Temperaturabsenkung nachts und bei ungenutztem Raum, 12° Celsius Temperaturabsenkung in den Ferien)



## 1) Status Quo

Spez. Nutzenergiebedarf: 221,8 kWh/m<sup>2</sup>a  
Spez. Endenergiebedarf: 254,95 kWh/m<sup>2</sup>a

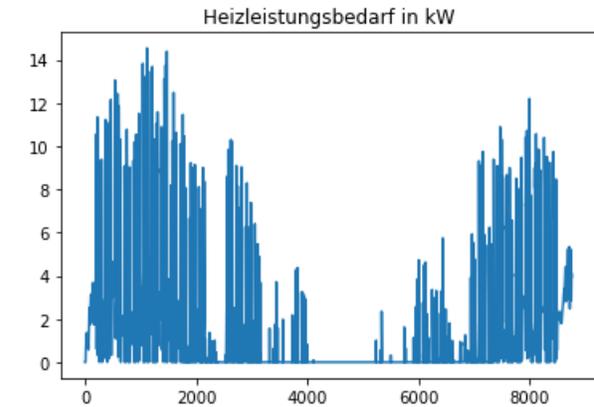
Schätzung mit 12 ct/kWh Gas:  
Kosten: 134,250.91 €/a



## 2) Steuerungskonzept 1

Spez. Nutzenergiebedarf: 186,9 kWh/m<sup>2</sup>a  
Spez. Endenergiebedarf: 214,83 kWh/m<sup>2</sup>a

Schätzung mit 12 ct/kWh Gas:  
Einsparung ca. 21.480 €/a



## 3) Steuerungskonzept 2

Spez. Nutzenergiebedarf: 156,3 kWh/m<sup>2</sup>a  
Spez. Endenergiebedarf: 179,67 kWh/m<sup>2</sup>a

Schätzung mit 12 ct/kWh Gas:  
Einsparung ca. 40.300 €/a

# Sensoren und Aktoren

Welche Sensorik und Aktorik wollen wir außerdem im Projekt verwenden?  
Beispielhafte Ausstattung von zwei Klassenräumen (R101, R314) mit:

## 1) Tektelic Präsenzsensoren LoRa

- Kosten: 60 €
- Informiert über Präsenz im Raum
- Kann Energiesparsam betrieben werden



## 2) MClimate Vicki LoRa-Thermostat

- Kosten: 75 €
- Kann Ferngesteuert werden
- Batterielaufzeit ca. 10 Jahre
- Steuerung auf Solltemperaturen bei Präsenz

## 3) Tektelic CO2-Sensoren mit

- Kosten: ca. 250 €
- Batterielaufzeit ca. 10 Jahre
- Überwachung der CO2-Werte



## 4) MClimate Wireless Thermostat

- Kosten: 190 €
- Batterielaufzeit ca. 10 Jahre
- Manuelle Steuerung aller Thermostate im Raum
- Anzeige des Raumklimas
- Feedback für intelligente Steuerung

## 5) Dragino Außenfühler

- Kosten: 60 €
- Batterielaufzeit ca. 10 Jahre
- Referenzmessung für den Fühler im Schacht



# CO2-Ampel der HFT Stuttgart

- Offener Bausatz und offene Software: <https://transfer.hft-stuttgart.de/gitlab/co2ampel>
- Programmcode (C++) ist einsehbar und kann konfiguriert werden, bspw. in Arduino IDE.
- Wi-Fi für den Versand der Daten per MQTT an einen Server.
- Lokaler Webserver für Konfiguration, Visualisierung und Download der Messdaten.



```

ampel-firmware | Arduino IDE 2.1.1
Date: Bearbeiten Sketch Werkzeuge Hilfe
Generic ESP8266 Module

ampel-firmware.ino ampel-firmware.h co2_sensor.cpp co2_sensor.h config public.h csv_writer.cpp csv_writer.h led_effects.cpp led_effects.h lorawan.cpp k...
112 *****
113 void loop() {
114   #if defined(ESP32)
115     if (config::is_lorawan_active()) {
116       //LMIC Library seems to be very sensitive to timing issues, so run it first.
117       lorawan::process();
118     }
119     if (lorawan::waiting_for_confirmation) {
120       // If node is waiting for join confirmation from Gateway, nothing else should run.
121       return;
122     }
123   }
124 #endif
125 //NOTE: Loop should never take more than 100ms. Split in smaller methods and logic if needed.
126 //NOTE: Only use millis() for duration comparison, not timestamps comparison. Otherwise, problems happen when millis roll over.
127 uint32_t t0 = millis();
128
129 keepServicesAlive();
130 // Short press for night mode, long press for calibration.
131 checkFlashButton();
132
133 sensor_console::checkSerialInput();
134
135 if (sensor::processData()) {
136   if (config::is_csv_active()) {
137     csv_writer::logIfTimeHasCome(sensor::timestamp, sensor::co2, sensor::temperature, sensor::humidity);
138   }
139 }
140
141 if (config::is_wifi_on && config::is_mqtt_active()) {
142   mqtt::publishIfTimeHasCome(sensor::timestamp, sensor::co2, sensor::temperature, sensor::humidity);
143 }
144
Ausgabe
Zeile 112, Spalte 22 Generic ESP8266 Module (Beim Verbinden)

```

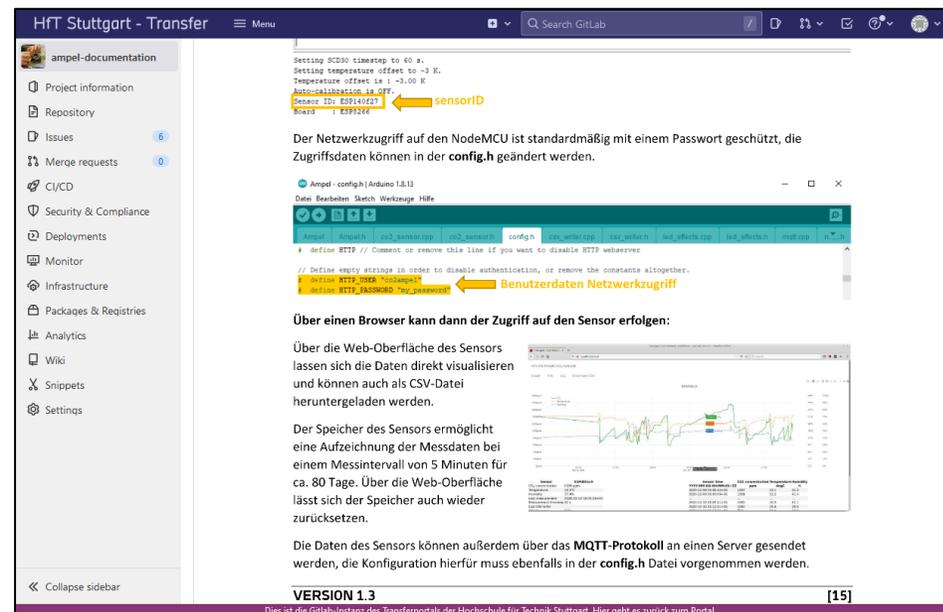
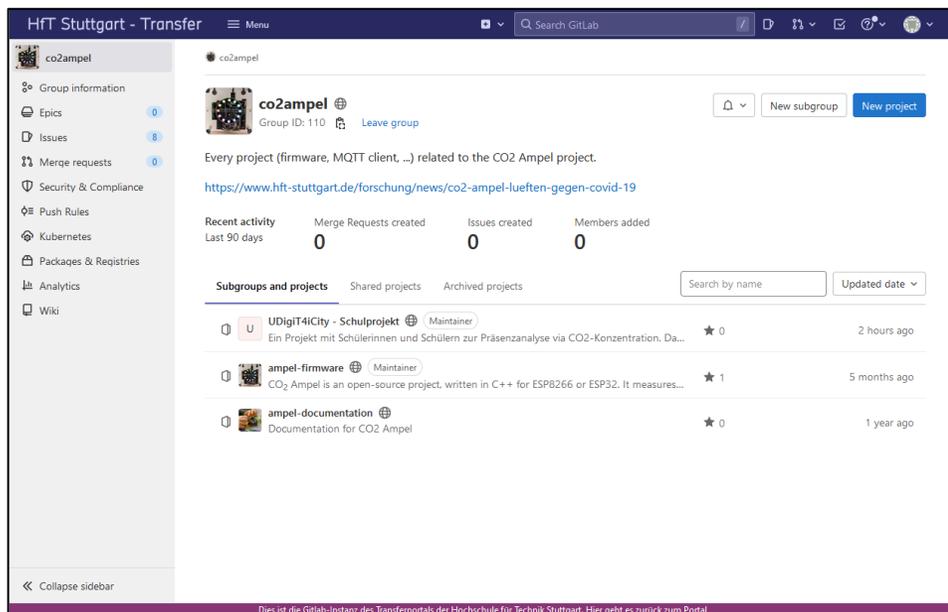
DIY-Bausatz CO2-Ampel der HFT Stuttgart: CO2-Ampel, Einzelne Komponenten, Arduino IDE mit Ampelcode (Bilder: HFT Stuttgart).

# CO2-Ampel der HFT Stuttgart

Moodle für Unterrichtsmaterialien und Dokumentation,

GitLab der HFT Stuttgart für Anleitung zur CO2-Ampel, zum Nachlesen und für Upload der Messdaten:

- <https://transfer.hft-stuttgart.de/gitlab/co2ampel/udigit4icity-schulprojekt>
- [https://transfer.hft-stuttgart.de/gitlab/co2ampel/ampel-documentation/-/blob/master/HFT\\_CO2-Ampel\\_Handbuch.pdf](https://transfer.hft-stuttgart.de/gitlab/co2ampel/ampel-documentation/-/blob/master/HFT_CO2-Ampel_Handbuch.pdf)



GitLab der HFT Stuttgart.

# CO2-Ampel – Aufgabenbeschreibung

Aufgabenbeschreibung mit grobem Fahrplan (wird dynamisch angepasst):

[https://transfer.hft-stuttgart.de/gitlab/co2ampel/udigit4icity-schulprojekt/-/blob/master/Arbeitsmaterialien/UDigit4iCity\\_Aufgabenbeschreibung\\_Humboldtgynasium\\_Solingen.pdf](https://transfer.hft-stuttgart.de/gitlab/co2ampel/udigit4icity-schulprojekt/-/blob/master/Arbeitsmaterialien/UDigit4iCity_Aufgabenbeschreibung_Humboldtgynasium_Solingen.pdf)



AP1: Was sind ppm und wie wird der Anteil berechnet?

AP2: Erfassung & Analyse der Messdaten

AP3: Entwicklung eines Workflows zur Bestimmung der Präsenz in einem Raum

AP4: Umsetzung eines Skriptes in Python, das anhand der Messwerte die Anzahl der Personen in einem Raum berechnet

AP5: Dokumentation des Projektes in Moodle und auf dem GitLab-Transfer Portal der HFT Stuttgart

# CO2-Ampel – Zugangsdaten

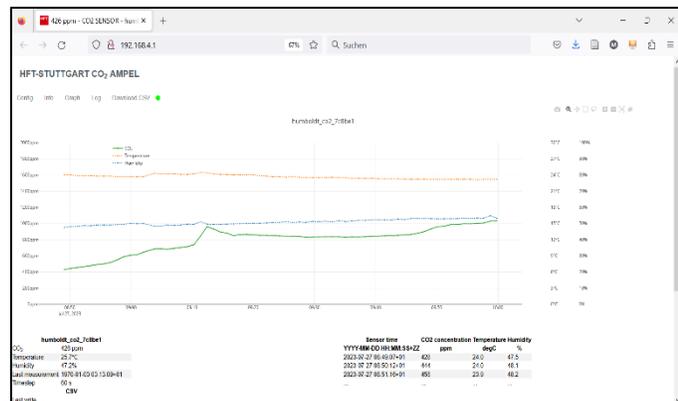
Access Point: Name der Ampel, bspw. „humboldt\_co2\_7c8be1“ (letzte 3 Byte der MAC-Adresse)  
IP-Adresse: <http://192.168.4.1>  
User: admin  
Passwort: bspw. „co2\_7c8be1“ bei Ampelname „humboldt\_co2\_1481ab“

# CO2-Ampel – Messungen durchführen

1. Verbinden mit dem Access Point, auf den Webserver der Ampel browsen: <http://192.168.4.1>
2. Wegen fehlender Internetverbindung wird zunächst die „Epoch“ (01.01.1970, 00:00 Uhr UTC) statt aktueller Zeit angezeigt:
  - a. Ganz unten auf **Set time** klicken und warten (ggf. Seite aktualisieren), bis aktuelle Zeit angezeigt wird (UTC-Zeitstempel, daher eine Stunde zurück im Sommer, im Winter zwei Stunden Differenz)
  - b. Dann **Delete CSV** klicken (neue Datei wird geschrieben, verhindert Vermischung mit alten Messdaten, falls der Zeitstempel springt)



1



1

```

humboldt_co2_7c8be1
CO2 426 ppm
Temperature 25.7°C
Humidity 47.2%
Last measurement 1970-01-03 03:13:09+01
Timestep 60 s
Last write CSV
Interval 60 s
Available space 4 kB
Sensor
Temperature offset -3.0K
Auto-calibration? Yes
Local address humboldt_co2_7c8be1.local
Local IP
MAC 8C:AA:B5:7C:8B:E1
Free heap space 33520 bytes
Largest heap block 31688 bytes
Frag 6%
Max loop duration 24212 ms
Board ESP8266
ID ESP7c8be1
Ampel firmware v0.3.1-DEV
Uptime 2 d 2 h 14 min 09 s
    
```

2

```

humboldt_co2_7c8be1
CO2 426 ppm
Temperature 25.7°C
Humidity 47.2%
Last measurement 1970-01-03 03:13:09+01
Timestep 60 s
Last write CSV
Interval 60 s
Available space 4 kB
Sensor
Temperature offset -3.0K
Auto-calibration? Yes
Local address humboldt_co2_7c8be1.local
Local IP
MAC 8C:AA:B5:7C:8B:E1
Free heap space 33520 bytes
Largest heap block 31688 bytes
Frag 6%
Max loop duration 24212 ms
Board ESP8266
ID ESP7c8be1
Ampel firmware v0.3.1-DEV
Uptime 2 d 2 h 14 min 09 s
    
```

2a

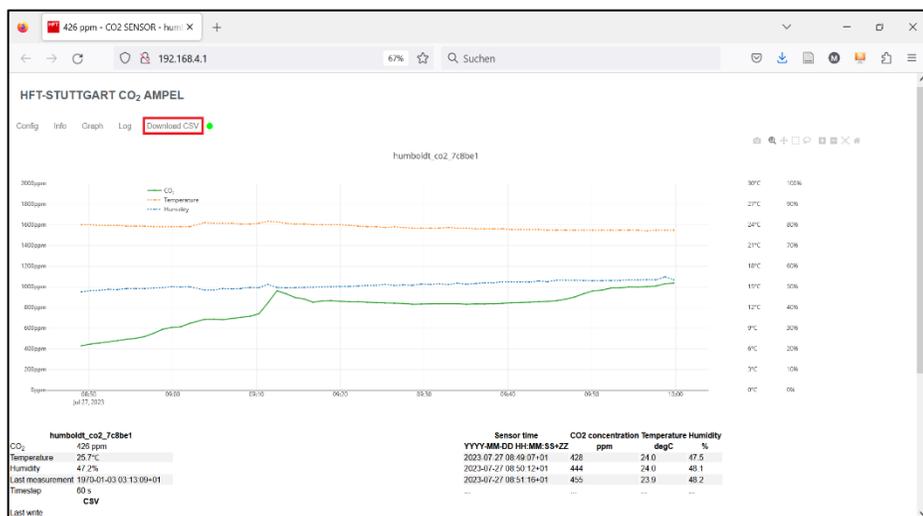
```

humboldt_co2_7c8be1
CO2 426 ppm
Temperature 25.7°C
Humidity 47.2%
Last measurement 1970-01-03 03:13:09+01
Timestep 60 s
Last write CSV
Interval 60 s
Available space 4 kB
Sensor
Temperature offset -3.0K
Auto-calibration? Yes
Local address humboldt_co2_7c8be1.local
Local IP
MAC 8C:AA:B5:7C:8B:E1
Free heap space 33520 bytes
Largest heap block 31688 bytes
Frag 6%
Max loop duration 24212 ms
Board ESP8266
ID ESP7c8be1
Ampel firmware v0.3.1-DEV
Uptime 2 d 2 h 14 min 09 s
    
```

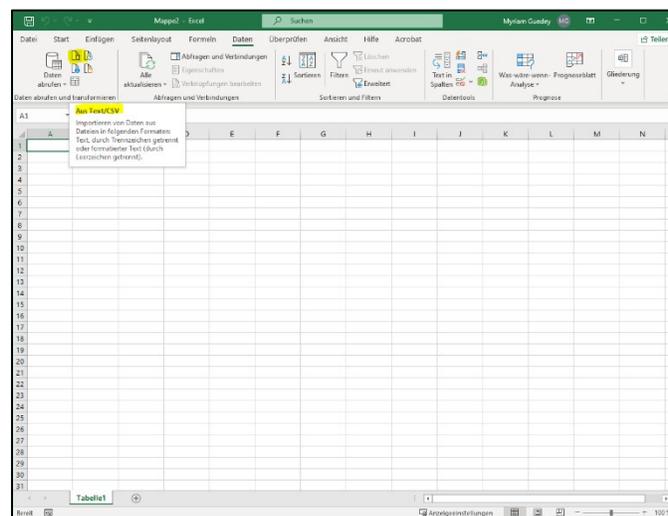
2b

# CO2-Ampel – Messungen durchführen

3. Nach Abschluss der Messreihe (Schulstunde) CSV-Datei herunterladen
4. Neue Datei in Excel öffnen, CSV-Datei importieren (im Menü „Daten“) und laden
5. Datei überprüfen, ggf. manuell korrigieren (Reihenfolge der Messungen bei gemischten Zeitstempeln)



3



4

Column1	Column2	Column3	Column4
Sensor time	CO2 concentration	Temperature	Humidity
YYYYMMDD HH:MM:SS+ZZ	ppm	degC	%
2023-08-10 11:07:34+01	464	23.0	51.3
2023-08-10 11:04:39+01	463	23.9	50.9
2023-08-10 11:05:43+01	465	24.0	51.1
1970-01-01 01:30:24+01	457	25.2	47.0
1970-01-01 01:29:28+01	456	25.3	47.0
1970-01-01 01:28:24+01	456	25.2	47.1
1970-01-01 01:27:34+01	457	25.3	47.0
1970-01-01 01:26:15+01	456	25.3	46.9
1970-01-01 01:25:10+01	455	25.3	46.9
1970-01-01 01:24:04+01	456	25.4	46.6
1970-01-01 01:23:45+01	457	25.5	46.4
1970-01-01 01:21:57+01	459	25.5	46.2
1970-01-01 01:20:52+01	459	25.6	46.1
1970-01-01 01:19:40+01	459	25.6	46.0
1970-01-01 01:18:44+01	471	25.7	45.8
1970-01-01 01:17:39+01	470	25.7	45.7
1970-01-01 01:16:35+01	472	25.7	45.7
1970-01-01 01:15:29+01	473	25.8	45.6
1970-01-01 01:14:24+01	474	25.8	45.6
1970-01-01 01:13:22+01	477	25.9	45.4
1970-01-01 01:12:17+01	476	25.9	45.4
1970-01-01 01:11:11+01	476	26.0	45.2
1970-01-01 01:10:08+01	479	26.0	45.1
1970-01-01 01:09:04+01	476	26.1	45.0
1970-01-01 01:08:00+01	482	26.1	44.9
1970-01-01 01:06:55+01	482	26.2	44.7
1970-01-01 01:05:51+01	485	26.3	44.5
1970-01-01 01:04:46+01	482	26.4	44.3

5

# CO2-Ampel – Messungen durchführen

	A	B	C	D	E
1	Column1	Column2	Column3	Column4	Column5
2	Sensor time	CO2 concentration	Temperature	Humidity	
3	YYYY-MM-DD HH:MM:SS+ZZ	ppm	degC	%	
4	2023-08-10 11:03:34+01	464	24.0	51.3	
5	2023-08-10 11:04:39+01	463	23.9	50.9	
6	2023-08-10 11:05:43+01	465	24.0	51.1	
7	1970-01-01 01:01:33+01	503	26.6	43.6	1
8	1970-01-01 01:02:38+01	496	26.5	43.8	2
9	1970-01-01 01:03:42+01	488	26.5	44.0	3
10	1970-01-01 01:04:46+01	482	26.4	44.3	4
11	1970-01-01 01:05:51+01	485	26.3	44.5	5
12	1970-01-01 01:06:55+01	482	26.2	44.7	6
13	1970-01-01 01:08:00+01	482	26.1	44.9	7
14	1970-01-01 01:09:04+01	476	26.1	45.0	8
15	1970-01-01 01:10:08+01	479	26.0	45.1	9
16	1970-01-01 01:11:13+01	476	26.0	45.2	10
17	1970-01-01 01:12:17+01	476	25.9	45.4	11
18	1970-01-01 01:13:22+01	477	25.9	45.4	12
19	1970-01-01 01:14:26+01	474	25.8	45.6	13
20	1970-01-01 01:15:30+01	473	25.8	45.6	14
21	1970-01-01 01:16:35+01	472	25.7	45.7	15
22	1970-01-01 01:17:39+01	470	25.7	45.7	16
23	1970-01-01 01:18:44+01	471	25.7	45.8	17
24	1970-01-01 01:19:48+01	469	25.6	46.0	18
25	1970-01-01 01:20:52+01	469	25.6	46.1	19
26	1970-01-01 01:21:57+01	469	25.5	46.2	20
27	1970-01-01 01:23:01+01	467	25.5	46.4	21
28	1970-01-01 01:24:06+01	466	25.4	46.6	22
29	1970-01-01 01:25:10+01	465	25.3	46.9	23
30	1970-01-01 01:26:15+01	466	25.3	46.9	24
31	1970-01-01 01:27:19+01	467	25.3	47.0	25
32	1970-01-01 01:28:24+01	466	25.2	47.1	26
33	1970-01-01 01:29:28+01	466	25.3	47.0	27
34	1970-01-01 01:30:32+01	467	25.2	47.0	28

Fehlerhafte CSV-Datei (Access Point startete neu). Muss in der Reihenfolge der Messungen korrigiert werden.

# CO2-Ampel – Hinweise

- Mindestens eine halbe Stunde am Stück konstant messen
- Falls der Access Point sich neu startet, muss nicht unbedingt die Zeit aktualisiert werden
- Ampel idealerweise auf Kopfhöhe und nicht direkt an der Tür oder an Fenstern platzieren (wg. Verwirbelung)
- Bei häufigen Werten unter 350 ppm muss die Ampel evtl. kalibriert werden:
  - Werden Messwerte unterhalb von 350 ppm CO2 gemessen, was in der Praxis nicht vorkommen sollte, wechselt die LED-Anzeige in einen **Lila** Leuchtmodus. Dann sollte der Sensor recalibriert werden: (a) Dazu platzieren Sie das Gerät einige Minuten am offenen Fenster. Drücken und halten Sie den „FLASH“ Knopf auf der Platine. Die LEDs zeigen einen **blauen** Ring, der für einige Sekunden einen Countdown herunterläuft. Wenn alle blauen LEDs erloschen sind, kann der Knopf losgelassen werden. (b) Alternativ kann die Kalibrierung auch über die serielle Schnittstelle („send“ im Webserver der Ampel) durch den Befehl „calibrate“ gestartet werden). Die Nächste Messung erfolgt, wenn für ca. 2 Minuten stabile Messwerte an der Außenluft gemessen werden. War die Kalibrierung erfolgreich, wird dies durch ein **grünes** Lauflicht signalisiert. Die nächste, kalibrierte Messung erfolgt dann nach ca. 1 Minute.

# Kontakt

## **Myriam Guedey und Robert Otto**

Forschung | iCity | UDigiT4iCity (Smart Public Buildings and Infrastructures)

Kompetenzzentrum für Digitalisierung in Forschung, Lehre und Wirtschaft (ZeDFLoW)

[myriam.guedey@hft-stuttgart.de](mailto:myriam.guedey@hft-stuttgart.de), [robert.otto@hft-stuttgart.de](mailto:robert.otto@hft-stuttgart.de)